



AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO RESILIENTE E PERMANENTE EM  
CARREGAMENTO MULTISTÁGIO DE SOLOS E SOLO-RAP ESTABILIZADOS COM  
EMULSÃO ASFÁLTICA

Alexandre Simas de Medeiros

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Rio de Janeiro  
Novembro de 2024

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO RESILIENTE E PERMANENTE EM  
CARREGAMENTO MULTISTÁGIO DE SOLOS E SOLO-RAP ESTABILIZADOS COM  
EMULSÃO ASFÁLTICA

Alexandre Simas de Medeiros

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM  
ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Aprovada por: Prof. Marcelino Aurelio Vieira da Silva D.Sc.

Prof. Luciano Pivoto Specht D.Sc.

Profa. Liedi Legi Bariani Bernucci D.Sc.

Prof. Filipe Almeida Correa do Nascimento D.Sc.

Prof. Hostílio Xavier Ratton Netto D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ: BRASIL

NOVEMBRO DE 2024

Alexandre Simas de Medeiros

Avaliação da deformação resiliente e permanente em carregamento multiestágio de solos e solo-rap estabilizados com emulsão asfáltica / Alexandre Simas de Medeiros: Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XXVII, 437 p: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva  
Tese (doutorado): UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia de Transportes, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 368-374

1. Multiestágio. 2. Estabilização. 3. Emulsão Asfáltica  
I. Silva, Marcelino Aurelio Vieira da. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

Dedico este trabalho a Deus e minha família: minha esposa

Izadora e meus filhos Júlia e Victor Medeiros.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

AVALIAÇÃO DA DEFORMAÇÃO RESILIENTE E PERMANENTE EM  
CARREGAMENTO MULTISTÁGIO DE SOLOS E SOLO-RAP ESTABILIZADOS  
COM EMULSÃO ASFÁLTICA

Alexandre Simas de Medeiros

Novembro/2024

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Este estudo investigou a resposta mecânica (resiliente e plástica) de solos estabilizados com asfalto, utilizando emulsão asfáltica, sob carregamento multiestágio. A pesquisa avaliou a influência da estabilização granulométrica e asfáltica, na deformação resiliente e plástica dos materiais. Após se determinar o teor de emulsão asfáltica com ensaio de tração indireta, foram feitas variações de  $\pm 0,5\%$  em relação a esse teor, e três corpos-de-prova com diferentes concentrações de emulsão foram moldados. Esses corpos-de-prova foram submetidos a ensaios triaxiais dinâmicos sob carregamento multiestágio, totalizando 50.000 ciclos de carga. Compostos com 30 e 50% de fresados, estabilizados ou não com asfalto também foram avaliados. O estudo foi dividido em quatro experimentos principais. O primeiro experimento analisou como diferentes tipos de solo e variações no percentual de ligante (emulsão asfáltica) influenciam a deformação permanente (DP), a deformação resiliente (DR) e o módulo resiliente (MR) ao longo de ciclos de carga. O segundo experimento investigou o impacto da incorporação de fresado asfáltico, combinado ou não com emulsão, nas mesmas propriedades mecânicas. O terceiro experimento focou na variação de tensões confinantes e desvio, combinadas com diferentes teores de emulsão, para determinar seu efeito no módulo resiliente dos solos. O quarto experimento explorou as interações entre o fresado, a emulsão e os ciclos de carga na resposta mecânica do solo estabilizado. A principal inovação deste estudo reside na aplicação do carregamento multiestágio para avaliar, pela primeira vez, a resposta mecânica de solos estabilizados com cimento asfáltico de petróleo e fresado asfáltico. Além disso, o estudo analisou os domínios de *shakedown* dos solos e compostos, utilizando o modelo de Tseng e Lytton em cada ciclo de carregamento. Os resultados mostraram que a adição de cimento asfáltico e fresado, atuou de forma distinta em ambos os solos e compostos. A estabilização granulométrica utilizando fresado asfáltico evidenciou melhorias nas respostas plásticas e elásticas do solo mais fino. A análise estatística, conduzida por ANOVA, reforçou a importância das interações entre os fatores (tipo de solo, percentual de fresado e ligante, e ciclos de carga) na modulação das variáveis dependentes elencadas. A ANOVA indica que a emulsão e o fresado exercem impactos significativos no comportamento mecânico do solo granular, enquanto, no solo mais fino, o fresado se destaca como o principal fator de influência, com a emulsão desempenhando um papel menos relevante.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

EVALUATION OF RESILIENT AND PERMANENT DEFORMATION IN  
MULTI-STAGE LOADING OF SOILS AND RAP-SOIL STABILIZED WITH  
ASPHALT EMULSION

Alexandre Simas de Medeiros

November/2024

Orientador: Marcelino Aurelio Vieira da Silva

This study investigated the mechanical response (resilient and plastic) of asphalt-stabilized soils using asphalt emulsion under multi-stage loading. The research evaluated the influence of gradation and asphalt stabilization on the resilient and plastic deformation of the materials. After determining the asphalt emulsion content through indirect tensile strength testing, variations of  $\pm 0.5\%$  around this content were applied, and three specimens with different emulsion concentrations were molded. These specimens were subjected to dynamic triaxial tests under multi-stage loading, totaling 50,000 load cycles. Mixtures containing 30% and 50% reclaimed asphalt pavement (RAP), with or without asphalt stabilization, were also evaluated. The study was divided into four main experiments. The first experiment analyzed how different soil types and variations in binder content (asphalt emulsion) influence permanent deformation (PD), resilient deformation (RD), and resilient modulus (MR) over loading cycles. The second experiment investigated the impact of incorporating RAP, combined or not with emulsion, on the same mechanical properties. The third experiment focused on the variation of confining and deviatoric stresses, combined with different emulsion contents, to assess their effect on the resilient modulus of the soils. The fourth experiment explored the interactions among RAP, emulsion, and loading cycles on the mechanical response of stabilized soils. The main innovation of this study lies in the application of multi-stage loading to evaluate, for the first time, the mechanical response of soils stabilized with petroleum asphalt cement (PAC) and RAP. Additionally, the study analyzed the shakedown domains of soils and mixtures using the Tseng and Lytton model at each loading cycle. The results showed that the addition of PAC and RAP influenced both soils and mixtures differently. Gradation stabilization using RAP demonstrated improvements in the plastic and elastic responses of finer soils. Statistical analysis, conducted through ANOVA, reinforced the importance of the interactions among factors (soil type, RAP and binder percentages, and loading cycles) in modulating the dependent variables. ANOVA indicates that the emulsion and RAP have significant impacts on the mechanical behavior of granular soils, while in finer soils, RAP stands out as the main influencing factor, with emulsion playing a less relevant role.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>28</b>
<b>1.1</b>	<b>Considerações iniciais.....</b>	<b>30</b>
<b>1.2</b>	<b>Formulação do problema.....</b>	<b>33</b>
<b>1.3</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>33</b>
<b>1.4</b>	<b>Hipóteses.....</b>	<b>35</b>
<b>1.5</b>	<b>Objetivos da pesquisa .....</b>	<b>35</b>
<b>1.6</b>	<b>Delimitação da pesquisa .....</b>	<b>36</b>
<b>1.7</b>	<b>Contribuições e inovações desta pesquisa .....</b>	<b>36</b>
<b>1.8</b>	<b>Relevância do estudo .....</b>	<b>37</b>
<b>1.9</b>	<b>Estrutura da tese.....</b>	<b>37</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>39</b>
<b>2.1</b>	<b>Considerações iniciais.....</b>	<b>39</b>
<b>2.2</b>	<b>Emulsão asfáltica .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3</b>	<b>Estabilização asfáltica .....</b>	<b>42</b>
<b>2.4</b>	<b>Fresado asfáltico .....</b>	<b>44</b>
<b>2.5</b>	<b>Estudos sobre solo emulsão desenvolvidos no Brasil.....</b>	<b>47</b>
<b>2.6</b>	<b>Estudos internacionais sobre o uso de emulsão asfáltica .....</b>	<b>57</b>
<b>2.7</b>	<b>Módulo resiliente .....</b>	<b>60</b>
<b>2.8</b>	<b>Deformação Permanente em múltiplos estágios .....</b>	<b>64</b>
<b>2.9</b>	<b><i>Shakedown</i> .....</b>	<b>71</b>
<b>2.10</b>	<b>Considerações finais do capítulo .....</b>	<b>79</b>
<b>3</b>	<b>MÉTODO CIENTÍFICO .....</b>	<b>82</b>
<b>3.1</b>	<b>Aplicabilidade do método .....</b>	<b>86</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E APLICAÇÃO DO MÉTODO .....</b>	<b>88</b>
<b>4.1</b>	<b>Considerações iniciais.....</b>	<b>88</b>

<b>4.2</b>	<b>Plano experimental</b> .....	<b>89</b>
<b>4.3</b>	<b>Caracterização dos materiais</b> .....	<b>93</b>
4.3.1	Caracterização das regiões onde foram coletadas as amostras.....	93
<b>4.3.1.1</b>	<b>Município de Pinheiral</b> .....	<b>93</b>
<b>4.3.1.2</b>	<b>Município de Três Rios</b> .....	<b>98</b>
<b>4.2.1.3</b>	<b>Coleta do fresado (CBUQ)</b> .....	<b>102</b>
4.3.2	Caracterização física e química das amostras.....	104
<b>4.2.2.1</b>	<b>Caracterização física das amostras</b> .....	<b>105</b>
<b>4.2.2.2</b>	<b>Caracterização química das amostras</b> .....	<b>112</b>
4.3.3	Escolha da Emulsão.....	115
4.3.4	Preparação das amostras .....	116
4.3.5	Compactação das amostras e secagem .....	120
<b>4.4</b>	<b>Ensaio de tração por compressão diametral utilizando pórtico Lottman 121</b>	
<b>4.5</b>	<b>Deformação permanente e resiliente em múltiplos estágios</b> .....	<b>124</b>
4.5.1	Análise do Shakedown .....	130
<b>4.6</b>	<b>Módulo resiliente</b> .....	<b>135</b>
<b>4.7</b>	<b>Análise estatística da deformação plástica e elástica</b> .....	<b>139</b>
4.7.1	Teste ANOVA .....	142
4.7.2	Definindo os fatores do experimento.....	144
<b>4.8</b>	<b>Considerações finais do capítulo</b> .....	<b>146</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>150</b>
<b>5.1</b>	<b>Caracterização física</b> .....	<b>150</b>
5.1.1	Granulometria do solo 1 .....	150
5.1.2	Granulometria do solo 2 .....	152
5.1.3	Granulometria do fresado .....	153
5.1.4	Granulometria do fresado sem ligante.....	154

5.1.5	Granulometria (solo1 mais fresado) .....	156
5.1.6	Granulometria (solo2 mais fresado) .....	158
<b>5.2</b>	<b>Curva de compactação .....</b>	<b>161</b>
<b>5.3</b>	<b>Parâmetros geotécnicos do solo .....</b>	<b>166</b>
<b>5.4</b>	<b>Caracterização química .....</b>	<b>167</b>
5.4.1	MEV/EDS.....	167
5.4.2	pH e intemperismo químico .....	175
<b>5.5</b>	<b>Emulsão escolhida.....</b>	<b>176</b>
<b>5.4</b>	<b>Dosagem utilizando TCD .....</b>	<b>177</b>
<b>5.5</b>	<b>Módulo resiliente .....</b>	<b>179</b>
5.5.1	Módulo resiliente do solo 1 .....	179
5.5.2	Ajuste do modelo composto para o solo 1.....	188
5.5.3	Módulo resiliente do solo 2 .....	191
5.5.4	Ajuste do modelo composto para o solo 2.....	200
<b>5.6</b>	<b>Deformação permanente e resiliente em múltiplos estágios .....</b>	<b>203</b>
5.6.1	Análise das deformações do solo 1.....	205
5.6.2	Análise das deformações do solo 2.....	211
<b>5.7</b>	<b>Análise do coeficiente angular e linear da linearização da DP .....</b>	<b>217</b>
5.7.1	Solo 1 x Solo 1 + 1,5% de emulsão.....	218
5.7.2	Solo 1 x Solo 1 + 2% de emulsão.....	221
5.7.3	Solo 1 x Solo 1 + 2,5% de emulsão.....	225
5.7.4	Solo 1 x Solo 1 + 30% de fresado .....	228
5.7.5	Solo 1 x Solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão.....	233
5.7.6	Solo 1 x Solo 1 + 50% de fresado .....	238
5.7.7	Solo 1 x Solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão.....	243
5.7.8	Solo 2 x Solo 2 + 0,5% emulsão.....	248

5.7.9	Solo 2 x Solo 2 + 1% emulsão.....	252
5.7.10	Solo 2 x Solo 2 + 1,5% emulsão.....	257
5.7.11	Solo 2 x Solo 2 + 30% de fresado .....	262
5.7.12	Solo 2 x Solo 2 + 30% de fresado + 1% emulsão .....	268
5.7.13	Solo 2 x Solo 2 + 50% de fresado .....	273
5.7.14	Solo 2 x Solo 2 + 50% de fresado + 1% emulsão .....	278
<b>5.7</b>	<b>Shakedown .....</b>	<b>283</b>
5.7.1	Avaliação do shakedown pela norma CEN EN 13286-7 .....	283
5.7.2	Avaliação do Shakedown pelo modelo de Tseng e Lytton .....	288
<b>5.7.2.1</b>	<b>Análise do <i>Shakedown</i> para o solo 1.....</b>	<b>289</b>
<b>5.7.2.2</b>	<b>Análise do <i>Shakedown</i> para o solo 2.....</b>	<b>306</b>
5.7.3	Influência do multiestágio na regressão não linear .....	323
<b>5.8</b>	<b>Análise estatística utilizando JAMOVl .....</b>	<b>333</b>
5.8.1	Experimento 1.....	334
<b>5.8.1.1</b>	<b>Solo 1.....</b>	<b>334</b>
<b>5.8.1.2</b>	<b>Solo 2.....</b>	<b>341</b>
5.8.2	Experimento 2.....	347
<b>5.8.2.1</b>	<b>Solo 1.....</b>	<b>347</b>
<b>5.8.2.2</b>	<b>Solo 2.....</b>	<b>353</b>
5.8.3	Experimento 3.....	359
<b>5.8.3.1</b>	<b>Solo 1.....</b>	<b>359</b>
<b>5.8.3.2</b>	<b>Solo 2.....</b>	<b>360</b>
5.8.4	Experimento 4.....	362
<b>5.8.4.1</b>	<b>Solo 1.....</b>	<b>362</b>
<b>5.8.4.2</b>	<b>Solo 2.....</b>	<b>364</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>368</b>

<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS .....</b>	<b>370</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>372</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>381</b>
<b>A.1</b>	<b>Script do R.....</b>	<b>381</b>
<b>A.2</b>	<b>Interface gráfica Biblioshiny .....</b>	<b>384</b>
<b>A.3</b>	<b>Análise bibliométrica.....</b>	<b>385</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>392</b>
<b>B.1</b>	<b>Preparação dos materiais e equipamento para ensaio .....</b>	<b>392</b>
<b>B.2</b>	<b>Montagem do corpo de prova no equipamento .....</b>	<b>392</b>
<b>B.3</b>	<b>Ajustes do ensaio.....</b>	<b>393</b>
<b>B.4</b>	<b>Após o ensaio .....</b>	<b>394</b>
	<b>ANEXO C.....</b>	<b>395</b>
<b>C.1</b>	<b>Script para realizar o teste não paramétrico no R .....</b>	<b>395</b>
	<b>ANEXO D.....</b>	<b>396</b>
<b>D.1</b>	<b>DP e DR em múltiplos estágios do solo 1 .....</b>	<b>396</b>
<b>D.2</b>	<b>DP e DR em múltiplos estágios do solo 2 .....</b>	<b>414</b>
	<b>ANEXO E.....</b>	<b>432</b>
	<b>ANEXO F .....</b>	<b>435</b>
	<b>APÊNDICE A .....</b>	<b>436</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação das tensões cisalhantes sobre ponto e rotação dos planos principais .....	61
Figura 2: Respostas de deformação permanente (%) de misturas de CB em função do número de ciclos de carga .....	66
Figura 3: Método científico da pesquisa.....	83
Figura 4: Aplicação do método científico da pesquisa .....	88
Figura 5: Segunda parte do método científico .....	89
Figura 6: Dados Pluviométricos e de umidade relativa da estação meteorológica de Resende (INMET).....	94
Figura 7: Dados de radiação e amplitude térmica da estação meteorológica de Resende (INMET) .....	94
Figura 8: Localização da jazida onde foi extraído o primeiro solo .....	96
Figura 9: Mapa de solos da Embrapa da região de Pinheiral.....	97
Figura 10: Vista da jazida onde foi extraído o primeiro solo .....	97
Figura 11: Dados pluviométricos e umidade relativa da estação meteorológica de Três Rios (INMET) .....	99
Figura 12: Dados de radiação e amplitude térmica da estação meteorológica de Três Rios (INMET) .....	99
Figura 13: Localização donde foi extraído o segundo solo .....	100
Figura 14: Mapa de solos da Embrapa da região de Três Rios.....	101
Figura 15: Vista da faixa de domínio da BR-040 donde foi extraído o segundo solo.....	102
Figura 16: Fresadora PM620 em operação na BR-116.....	102
Figura 17: Bits da fresadora PM620 .....	103
Figura 18: Profundidade da fresagem realizada na BR-116.....	103
Figura 19: Comboio que acompanha a fresadora durante a operação .....	104
Figura 20: Organograma da caracterização física e química do solo .....	105
Figura 21: Peneirador elétrico da Soloteste .....	106
Figura 22: Sedimentação .....	106
Figura 23: Concha de Casagrande .....	107
Figura 24: Placa de vidro esmerilhada e molde .....	107

Figura 25: Compactador de solos .....	108
Figura 26: Cápsulas de alumínio e bandeja com solo para secagem em estufa a 100°C.....	108
Figura 27: Densidade real dos grãos do solo .....	109
Figura 28: Rotarex e fresado asfáltico .....	109
Figura 29: Ensaio de perda de massa por imersão.....	111
Figura 30:Preparação da amostra de solo para análise no MEV/EDS.....	112
Figura 31: Solos sendo preparados e bancada de ensaios da Geotecnia/COPPE/UFRJ .....	113
Figura 32: Garrafas para armazenagem de emulsão asfáltica.....	116
Figura 33: molde tripartido.....	116
Figura 34: I (solo), II (solo + água+ emulsão + água de diluição) e.....	117
Figura 35: Solo imerso em água por 24h (1h de ensaio) .....	117
Figura 36: Solo e solo emulsão após 24h de imersão.....	117
Figura 37: Homogeneização do solo com emulsão asfáltica.....	118
Figura 38: CPs estabilizados com emulsão asfáltica .....	121
Figura 39: Secagem dos corpos de prova no laboratório.....	121
Figura 40: Multiprensa e pórtico Lottman.....	122
Figura 41: Serra elétrica cortando o CP.....	123
Figura 42: CPs cortados na multiprensa .....	123
Figura 43: Ajuste linear a curva de deformação permanente .....	128
Figura 44: Pontos para análise da DP e DR.....	128
Figura 45: Taxa de deformação permanente vertical versus deformações permanentes verticais, escala logarítmica (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004) - Adaptado pelo autor.....	131
Figura 46: Classificação baseada na deformação permanente (SOLIMAN E SHALABY; 2015): adaptado pelo autor .....	132
Figura 47: Deformação resiliente vertical versus número de ciclos de carga (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004): Adaptado pelo autor.....	132
Figura 48: Deformação vertical resiliente versus razão entre tensões (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004): Adaptado pelo autor.....	133
Figura 49: Limites para determinar o domínio de <i>shakedown</i> .....	134

Figura 50: Classificação baseada na deformação e resilientes (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004): adaptado pelo autor .....	135
Figura 51: Classificação baseada na deformação resiliente (SOLIMAN E SHALABY; 2015): adaptado pelo autor .....	135
Figura 52: Laço de histerese formado pela deformação do material .....	136
Figura 53: Gráfico 3D do modelo composto .....	139
Figura 54: Curva granulométrica do solo 1 .....	152
Figura 55: Curva granulométrica do solo 2 .....	153
Figura 56: Curva granulométrica do fresado .....	154
Figura 57: Curva granulométrica do fresado sem ligante.....	156
Figura 58: Curva granulométrica composto 1 .....	157
Figura 59: Curva granulométrica composto 2 .....	158
Figura 60: Curva granulométrica composto 3 .....	159
Figura 61: Curva granulométrica composto 4 .....	160
Figura 62: Curva de compactação do solo 1 .....	161
Figura 63: Curva de compactação do composto 1 .....	162
Figura 64: Curva de compactação do composto 2 .....	163
Figura 65: Curva de compactação do solo 2.....	164
Figura 66: Curva de compactação do composto 3 .....	165
Figura 67: Curva de compactação do composto 4 .....	165
Figura 68: Espectro de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) mostrando a composição elementar do solo 1 .....	169
Figura 69: Micrografia de varredura eletrônica e mapeamento EDS do solo 1	170
Figura 70: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do solo 1	171
Figura 71: Espectro de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) mostrando a composição elementar do solo 1.....	173
Figura 72: Micrografia de varredura eletrônica e mapeamento EDS do solo 2	174
Figura 73: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do solo 2	175
Figura 74: Tração por compressão diametral do solo 1 .....	178
Figura 75: Tração por compressão diametral do solo 2.....	179
Figura 76: MR do solo 1 e do solo 1 + 1,5% de emulsão.....	180
Figura 77: MR do solo 1 e do solo 1 + 2% de emulsão.....	181

Figura 78: MR do solo 1 e do solo 1 + 2,5% de emulsão.....	182
Figura 79: MR do solo 1 e do solo 1 + 30% de fresado .....	183
Figura 80: MR do solo 1 e do solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão.....	184
Figura 81: MR do solo 1 e do solo 1 + 50% de fresado .....	185
Figura 82: MR do solo 1 e do solo 1 + 50% de fresado 2% de emulsão.....	186
Figura 83: Gráfico 3D do modelo composto do solo 1 e seus compostos.....	191
Figura 84: MR do solo 2 e do solo 2 + 0,5% de emulsão.....	192
Figura 85: MR do solo 2 e do solo 2 + 1% de emulsão.....	193
Figura 86: MR do solo 2 e do solo 2 + 1,5% de emulsão.....	194
Figura 87: MR do solo 2 e do solo 2 + 30% de fresado .....	195
Figura 88: MR do solo 2 e do solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão.....	196
Figura 89: MR do solo 2 e do solo 2 + 50% de fresado .....	197
Figura 90: MR do solo 2 e do solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão.....	198
Figura 91: Gráfico 3D do modelo composto do solo 2 e seus compostos.....	202
Figura 92: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e .....	206
Figura 93: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e .....	207
Figura 94: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e .....	207
Figura 95: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e .....	208
Figura 96: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e .....	209
Figura 97: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e .....	210
Figura 98: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e .....	211
Figura 99: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e .....	212
Figura 100: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e ...	213
Figura 101: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e ...	213
Figura 102: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e ...	214
Figura 103: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e ...	215
Figura 104: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e ...	215
Figura 105:: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e ..	216
Figura 106: Distância entre ponto e reta.....	218
Figura 107: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 1) .....	218

Figura 108: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 2)	219
Figura 109: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 3)	220
Figura 110: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 4)	220
Figura 111: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 5)	221
Figura 112: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 1)	222
Figura 113: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 2)	222
Figura 114: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 3)	223
Figura 115: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 4)	224
Figura 116: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 5)	224
Figura 117: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 1)	225
Figura 118: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 2)	226
Figura 119: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 3)	226
Figura 120: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 4)	227
Figura 121: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 5)	228
Figura 122: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 1)	229
Figura 123: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 2)	230

Figura 124: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 3).....	231
Figura 125: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 4).....	232
Figura 126: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 5).....	233
Figura 127: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 1) .....	234
Figura 128: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 2) .....	235
Figura 129: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 3) .....	236
Figura 130: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 4) .....	237
Figura 131: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 5) .....	238
Figura 132: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 1).....	239
Figura 133: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 2).....	240
Figura 134: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 3).....	241
Figura 135: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 4).....	242
Figura 136: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 5).....	243
Figura 137: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 1) .....	244
Figura 138: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 2) .....	245
Figura 139: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 3) .....	246

Figura 140: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 4) .....	247
Figura 141: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 5) .....	247
Figura 142: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 1).....	248
Figura 143: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 2).....	249
Figura 144: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 3).....	250
Figura 145: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 4).....	251
Figura 146: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 5).....	252
Figura 147: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 1).....	253
Figura 148: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 2).....	254
Figura 149: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 3).....	255
Figura 150: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 4).....	256
Figura 151: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 5).....	257
Figura 152: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 1).....	258
Figura 153: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 2).....	259
Figura 154: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 3).....	260
Figura 155: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 4).....	261

Figura 156: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 5).....	262
Figura 157: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 1).....	263
Figura 158: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 2).....	264
Figura 159: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 3).....	265
Figura 160: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 4).....	266
Figura 161: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 5).....	267
Figura 162: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 1) .....	268
Figura 163: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 2) .....	269
Figura 164: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 3) .....	270
Figura 165: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 4) .....	271
Figura 166: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 5) .....	272
Figura 167: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 1).....	273
Figura 168: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 2).....	274
Figura 169: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 3).....	275
Figura 170: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 4).....	276
Figura 171: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 5).....	277

Figura 172: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 1) .....	278
Figura 173: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 2) .....	279
Figura 174: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 3) .....	280
Figura 175: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 4) .....	281
Figura 176: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 5) .....	282
Figura 177: Variação da DP para o solo 1 .....	285
Figura 178: Variação da DP para o solo 2 .....	287
Figura 179: Influência dos coeficientes $P$ , $b$ e $em$ no comportamento do modelo .....	289
Figura 180: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 1 .....	291
Figura 181- Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 1 ....	292
Figura 182: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 1 estabilizado com 1,5% de emulsão asfáltica.....	293
Figura 183: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado com 1,5% de emulsão.....	294
Figura 184: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 1 estabilizado com 2% de emulsão asfáltica.....	295
Figura 185: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado com 2% de emulsão.....	296
Figura 186: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 1 estabilizado com 2,5% de emulsão asfáltica.....	297
Figura 187: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado com 2,5% de emulsão.....	298
Figura 188: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 1 estabilizado com 30% de fresado .....	299
Figura 189: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado 30% de fresado .....	300

Figura 190: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 1 estabilizado com 30% de fresado e 2% de emulsão.....	301
Figura 191: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado 30% de fresado + 2% de emulsão.....	302
Figura 192: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 1 estabilizado com 50% de fresado .....	303
Figura 193: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado 50% de fresado .....	304
Figura 194: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 1 estabilizado com 50% de fresado e 2% de emulsão.....	305
Figura 195: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado 50% de fresado e 2% de emulsão .....	306
Figura 196: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 2 .....	307
Figura 197: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 2 ....	308
Figura 198: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão .....	309
Figura 199: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão.....	310
Figura 200: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão .....	312
Figura 201: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão.....	312
Figura 202: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 2 estabilizado com 1,5% de emulsão .....	314
Figura 203: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 1,5% de emulsão.....	314
Figura 204: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 2 estabilizado com 30% de fresado .....	316
Figura 205: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão.....	316
Figura 206: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 2 estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão.....	318

Figura 207: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão.....	318
Figura 208: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 2 estabilizado com 50% de fresado .....	320
Figura 209: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 50% de fresado .....	320
Figura 210: Limites de <i>Shakedown</i> do solo 2 estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão.....	322
Figura 211: Limites de <i>Shakedown</i> utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão .....	323
Figura 212: Dados observados e modelo para o solo 1 controle do estágio 2 (a esquerda sem ajuste e a direita com ajuste – $N > 20$ ).....	325
Figura 213: Dados observados e modelo para o solo 1 controle do estágio 3 (a esquerda sem ajuste e a direita com ajuste – $N > 20$ ).....	327
Figura 214: Dados observados e modelo para o solo 1 controle do estágio 4 (a esquerda sem ajuste e a direita com ajuste – $N > 20$ ).....	329
Figura 215: Dados observados e modelo para o solo 1 controle do estágio 4 (a esquerda sem ajuste e a direita com ajuste – $N > 20$ ).....	330
Figura 216: Interação ciclos*teor de emulsão sobre a DP.....	336
Figura 217: Interação entre ciclos*teor de emulsão sobre a DR para o solo 1.	337
Figura 218: Interação entre ciclos*teor de emulsão sobre b para o solo 1 .....	339
Figura 219: Interação entre ciclos*teor de emulsão sobre o MR para o solo 1	341
Figura 220:: Interação entre ciclos*teor de emulsão sobre a DP para o solo 2	343
Figura 221: Interação entre ciclos*teor de emulsão sobre a DR para o solo 2.	344
Figura 222: Interação entre ciclos*teor de emulsão sobre b para o solo 2 .....	346
Figura 223: Interação entre ciclos*teor de emulsão sobre o MR para o solo 2	347
Figura 224: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a DP para o solo 1.....	349
Figura 225: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a DR para o solo 1.....	350
Figura 226: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre b para o solo 1.....	351

Figura 227: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre o MR para o solo 1.....	353
Figura 228: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a DP para o solo 2.....	354
Figura 229: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a DR para o solo 2.....	356
Figura 230: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a b para o solo 2.....	357
Figura 231: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a b para o solo 2.....	359
Figura 232: Efeito da interação entre o teor de emulsão e os ciclos no MR do solo 1 .....	360
Figura 233: Efeito da interação entre o teor de emulsão e os ciclos no MR do solo 2 .....	362
Figura 234: Efeito da interação entre o teor de emulsão, ciclos e fresado no MR do solo 1.....	364
Figura 235: Efeito da interação entre o teor de emulsão, ciclos e fresado no MR do solo 2.....	366

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação entre as tensões solicitantes de (YAGHOUBI et al; 2023)...	67
Tabela 2: Análise Comparativa de Estudos sobre Deformação Permanente e Comportamento de <i>Shakedown</i> em Materiais de Pavimentação .....	78
Tabela 3: Experimento 1: Influência da Emulsão.....	90
Tabela 4: Experimento 2: Influência do Fresado e do Fresado-Emulsão .....	90
Tabela 5: Variáveis Dependentes para Ambos os Experimentos .....	91
Tabela 6: Experimento 3: Influência da Emulsão.....	91
Tabela 7: Experimento 4: Influência do Fresado e do Fresado-Emulsão .....	92
Tabela 8: Variável dependente para ambos os experimentos .....	92
Tabela 9: Ensaios e normas .....	105
Tabela 10: Relação entre as tensões solicitantes .....	124
Tabela.11: Ciclo de carregamento para cálculo do MR.....	138
Tabela 12: Matriz fatorial do experimento 1 .....	144
Tabela 13: Matriz fatorial do experimento 2 .....	144
Tabela 14: Matriz fatorial do experimento 3 .....	145
Tabela 15: Matriz fatorial do experimento 4 .....	145
Tabela 16: Parâmetros geotécnicos do solo 1 e 2 .....	166
Tabela 17: Composição química do solo 1 .....	167
Tabela 18: Composição química do solo 2.....	172
Tabela 19: pH e intemperismo químico.....	176
Tabela 20: Classificação da emulsão asfáltica .....	177
Tabela 21: MR médio do solo 1.....	188
Tabela 22: Modelo composto para o solo 1 e seus compostos .....	188
Tabela 23: MR médio do solo 2.....	200
Tabela 24: Modelo composto para o solo 2 e seus compostos .....	200
Tabela 25: Análise do <i>shakedown</i> pelo desempenho plástico do solo 1 .....	284
Tabela 26: Análise do <i>shakedown</i> pelo desempenho plástico do solo 2 .....	286
Tabela 27: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1.....	290

Tabela 28: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 1,5% de emulsão asfáltica.....	292
Tabela 29: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 2% de emulsão asfáltica.....	294
Tabela 30: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 2,5% de emulsão asfáltica.....	296
Tabela 31: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 30% de fresado.....	298
Tabela 32: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 30% de fresado e 2% de emulsão .....	300
Tabela 33: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 50% de fresado.....	302
Tabela 34: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 50% de fresado e 2% de emulsão .....	304
Tabela 35: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2.....	306
Tabela 36: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão .....	308
Tabela 37: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão .....	311
Tabela 38: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 1,5% de emulsão .....	313
Tabela 39: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 30% de fresado.....	315
Tabela 40: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão .....	317
Tabela 41: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 50% de fresado.....	319
Tabela 42: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão .....	321
Tabela 43: Valores de $em$ , $P$ e $b$ para modelo com e sem ajuste do estágio 2 ( $N > 20$ ).....	326

Tabela 44: Valores de $em$ , $P$ e $b$ para modelo com e sem ajuste do estágio 3 (N > 20).....	328
Tabela 45: Valores de $em$ , $P$ e $b$ para modelo com e sem ajuste do estágio 4 (N > 20).....	329
Tabela 46: Valores de $em$ , $P$ e $b$ para modelo com e sem ajuste do estágio 5 (N > 20).....	331
Tabela 47: Teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.....	333
Tabela 48: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre a DP para o solo 1.....	335
Tabela 49: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre a DR para o solo 1.....	337
Tabela 50: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre b para o solo 1.....	338
Tabela 51: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o MR para o solo 1.....	340
Tabela 52: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o DP para o solo 2.....	342
Tabela 53: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre a DR para o solo 2.....	344
Tabela 54: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre b para o solo 2.....	345
Tabela 55: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o MR para o solo 2.....	346
Tabela 56: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre a DP para o solo 1.....	348
Tabela 57: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre a DR para o solo 1.....	349
Tabela 58: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre b para o solo 1.....	351
Tabela 59: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre o MR para o solo 1.....	352

Tabela 60: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre a DP para o solo 2 .....	354
Tabela 61: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre a DR para o solo 2.....	355
Tabela 62: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre b para o solo 2 .....	356
Tabela 63: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre b para o solo 2 .....	358
Tabela 64: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o MR segundo norma DNIT 134 para o solo 1 .....	360
Tabela 65: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o MR segundo norma DNIT 134 para o solo 2 .....	361
Tabela 66: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre o MR segundo norma DNIT 134 para o solo 1 .....	363
Tabela 67: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre o MR segundo norma DNIT 134 para o solo 2.....	365

## 1 INTRODUÇÃO

A estabilização de solos com asfalto e fresado representa uma alternativa viável tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental para a construção de pavimentos. O fresado, um resíduo amplamente disponível resultante de obras de reabilitação de pavimentos, pode ser reaproveitado, desde que seja corretamente estabilizado, ao invés de ser descartado. Esse reaproveitamento transforma um passivo ambiental em um recurso valioso, contribuindo para a sustentabilidade do setor de construção civil.

Além disso, a utilização de solo estabilizado com asfalto permite o emprego de solos locais na construção de pavimentos, o que reduz significativamente a necessidade de extração de materiais de jazidas, um processo ambientalmente impactante. O uso de materiais locais também diminui os custos associados ao transporte, tornando o processo de construção mais econômico.

Para que essa prática se torne uma realidade não apenas na construção de rodovias, mas também em outras aplicações de pavimentação, é essencial que os materiais sejam devidamente testados em laboratório. Esses materiais precisam passar por uma série de ensaios rigorosos para garantir sua confiabilidade e desempenho ao longo do tempo. Apenas com a validação científica e técnica, a utilização do asfalto e do fresado na estabilização de solos se tornará uma opção confiável e amplamente adotada pelos projetistas de pavimentos.

Essa abordagem não só promove a sustentabilidade ambiental, por meio da redução de resíduos e da preservação de recursos naturais, como também representa uma solução econômica para os desafios da construção de pavimentos, ao otimizar o uso de recursos disponíveis e reduzir custos operacionais.

No entanto, mesmo com os esforços contínuos para modelar e padronizar a estabilização dos solos utilizando emulsão asfáltica, é imprescindível levar em conta as características únicas e anisotrópicas de cada fração de solo. Essas peculiaridades são cruciais, pois cada tipo de solo exibe um comportamento particular que é intrinsecamente determinado por sua composição química, distribuição granulométrica, teor de umidade, além de fatores como pressão e temperatura na região de formação, entre outras variáveis geológicas. A compreensão dessas especificidades é vital, não apenas para garantir a eficiência da estabilização, mas também para prever a longevidade e a resistência das infraestruturas construídas. À medida que os estudos avançam, o acúmulo de conhecimento sobre o comportamento dos solos tropicais tem proporcionado uma base mais sólida para a engenharia, permitindo uma avaliação mais precisa

sobre a viabilidade econômica e técnica da aplicação da emulsão asfáltica em projetos de construção e manutenção de pavimentos rodoviários. Esse avanço não só aprimora as práticas existentes, mas também abre portas para inovações que podem resultar em pavimentos mais duráveis e sustentáveis.

Portanto, a busca pela otimização do uso da estabilização asfáltica com materiais diversos na pavimentação se estende por décadas. Com o avanço das técnicas e o surgimento de novos ensaios, a necessidade de adequar o conhecimento adquirido às modernas ferramentas de estudo dos materiais estabilizados com asfalto torna-se cada vez mais evidente.

Em se tratando da utilização do fresado, é possível se mensurar os seguintes dados: ao se observar a extensão total da malha rodoviária federal, excluindo as vias planejadas, é de 75.257 mil quilômetros, com 65.735 mil quilômetros (90,5%) pavimentados e 9.522 mil quilômetros (9,5%) não pavimentados. Dentre as rodovias pavimentadas, 11.429 quilômetros são administrados por meio de concessão federal, conforme Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2023).

Considerando a fresagem superficial da camada de rolamento a uma profundidade média de 5 cm, em uma pista única com duas faixas de rolamento totalizando uma largura de 7,2 m e uma vida útil de 10 anos, a cada década estariam disponíveis aproximadamente 887.940 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de asfalto fresado para reaproveitamento no próprio pavimento como material local, levando em conta apenas as rodovias federais.

Segundo SABITA (2020), a fresagem do revestimento asfáltico, obtido por meio da fresagem de pavimento, é o processo de remoção de uma camada superficial de asfalto ou cimento asfáltico de uma estrutura de pavimento existente. Esse processo é realizado por máquinas fresadoras equipadas com lâminas rotativas que cortam e removem o material do pavimento. A fresagem é realizada para diversos propósitos, incluindo a preparação para reciclagem, regularização do perfil, melhoria da adesão, aumento da capacidade de drenagem e redução da altura do pavimento.

A importância de expandir o conhecimento sobre a estabilização de solos com emulsão asfáltica fica evidente, especialmente ao se destacar sua viabilidade econômica na construção e manutenção de pavimentos rodoviários. Além disso, é fundamental ressaltar o papel crucial do fresamento asfáltico na remoção seletiva de camadas superficiais, contribuindo para melhorias no perfil do pavimento e prolongando sua vida útil. Como consequência do fresamento, ocorre a disponibilidade significativa de asfalto fresado para reaproveitamento, o que se destaca como uma oportunidade sustentável e econômica na gestão de materiais para pavimentação.

Com relação a técnica para avaliar o comportamento dos solos e compostos estabilizados com asfalto, a utilização de ensaios de carregamento em múltiplos estágios representa um avanço significativo. Esses ensaios replicam de maneira mais realista as condições em que os pavimentos são submetidos no campo. Em um ambiente real, os pavimentos recebem diferentes valores de carga ao longo do tempo, variando conforme o tipo de veículo, o peso da carga transportada e as condições de tráfego. Os equipamentos triaxiais ainda não permitem um carregamento randomizado ou aleatório, sendo o carregamento multiestágio a tecnologia que mais se aproxima das condições reais de campo

Conforme Cabral; Barroso e Silva (2021), ao aplicar diferentes níveis de carga durante os ensaios de laboratório, é possível simular de forma mais realista o estresse e as solicitações que o pavimento enfrentará ao longo de sua vida útil. Essa abordagem proporciona uma avaliação mais precisa e confiável do desempenho estrutural dos pavimentos, permitindo identificar possíveis falhas e necessidades de manutenção com antecedência.

Assim sendo, a estabilização de solos com asfalto e fresado, juntamente com a adoção de práticas e técnicas modernas, apresenta-se como uma solução integrada que pode aliar sustentabilidade, economia e desempenho para o futuro da pavimentação rodoviária no Brasil.

## **1.1 Considerações iniciais**

Este estudo busca contribuir para o desenvolvimento da pesquisa acadêmica sobre solos e compostos estabilizados com emulsão e solo-fresado estabilizado com emulsão, utilizando o método de carregamento multiestágio para analisar a resposta plástica e elástica desses materiais. A estabilização de solos com emulsão é uma técnica viável e de baixo custo que permite o reaproveitamento de materiais locais, proporcionando a resistência estrutural necessária para a base ou sub-base de pavimentos, conforme as demandas do tráfego e as condições do subleito e do pavimento (ABEDA, 2010).

Para compreender o conceito de emulsão asfáltica, conforme descrito por Pinto Sal e Pinto Isa (2019), é importante reconhecer que as emulsões asfálticas de petróleo (EAP) são sistemas bifásicos compostos por dois líquidos imiscíveis. Esses líquidos formam uma dispersão coloidal e uma fase asfáltica é dispersa em uma fase aquosa (emulsão direta) ou vice-versa (emulsão inversa). A estabilidade dessas emulsões é mantida pelo uso de agentes

emulsificantes e estabilizantes, que impedem a coalescência dos glóbulos de asfalto ao revesti-los com uma película protetora.

A técnica de carregamento em estágios múltiplos, conforme destacam diversos estudos, como os de Rahman et al. (2023) e Maghool et al. (2022), desempenha um papel crucial na avaliação do comportamento mecânico de materiais utilizados na construção de pavimentos, especialmente materiais granulares. Sua principal vantagem é a significativa redução do tempo e do esforço necessário para testar uma ampla gama de níveis de estresse em uma única amostra, em comparação com os testes de estágio único. Além disso, essa técnica permite avaliar o comportamento de misturas e materiais sob diferentes níveis de estresse, fornecendo uma compreensão abrangente do desempenho mecânico sob condições variáveis, como as encontradas em pavimentos.

A contribuição da técnica de carregamento em multiestágio para a pesquisa é significativa. Pois possibilita uma análise detalhada da deformação permanente e resiliente, proporcionando aos projetistas uma visão mais precisa de como os materiais respondem às variações nas condições de carregamento, simulando de forma mais realista as condições de campo. Esta técnica também reduz a variabilidade experimental ao eliminar a necessidade de moldar múltiplas amostras, tornando os testes mais eficientes e realistas. Além disso, este estudo propõe uma inovação científica ao avaliar simultaneamente as respostas resilientes e plásticas de solos estabilizados com asfalto em um único teste, apresentando os resultados em um mesmo gráfico que considera a deformação total e permanente.

Foram realizados ensaios com seis diferentes concentrações de emulsão asfáltica, variando de 1% a 6% em relação massa seca do solo, utilizando uma emulsão catiônica de ruptura lenta. Os solos estabilizados foram submetidos a testes de compressão diametral em uma multiprensa, a fim de avaliar sua resposta mecânica. O teor ótimo obtido foi utilizado para estabilizar o solo nos ensaios subsequentes. A partir dessa dosagem, foram realizados ajustes de  $\pm 0,5\%$  de emulsão para os corpos de prova (CPs) de solo-emulsão, e a dosagem ótima foi utilizada para avaliar o desempenho do solo-fresado-emulsão. As amostras foram então moldadas e submetidas a testes de carregamento multiestágio e de módulo resiliente.

O método utilizado neste estudo segue uma abordagem estruturada em quatro etapas principais: seleção de materiais, preparação da amostra, escolha do teor, e realização de ensaios mecânicos. Na seleção de materiais, a escolha da emulsão é fundamental e deve considerar características como o pH e os índices de plasticidade ( $K_i$  e  $K_r$ ) do material, que influenciam diretamente na escolha do tipo de emulsão asfáltica mais adequada. As amostras de solo são

classificadas com base em suas propriedades físicas e químicas, garantindo uniformidade e representatividade nos testes.

A preparação da amostra envolve a aplicação de uma energia de compactação adequada para assegurar que o material atinja a densidade desejada. Após a compactação, o material passa por um processo de cura, e ocorrem reações químicas que promovem o endurecimento do composto. Na escolha do teor, realizam-se ensaios mecânicos para determinar a dosagem adequada de emulsão, testando diferentes variações (teor negativo, ideal e positivo) para identificar a quantidade de emulsão que oferece as melhores características físicas e de estabilidade ao material.

Por fim, os ensaios mecânicos são realizados para avaliar como o solo estabilizado responde a múltiplos ciclos de carregamento. Esses ensaios incluem a análise do *shakedown*, que verifica a capacidade do material de suportar cargas repetidas sem sofrer deformações permanentes significativas, assegurando sua durabilidade. A pesquisa foi organizada em quatro experimentos principais, cada um com uma matriz fatorial que permite examinar a interação entre diferentes variáveis, como tipos de solo, teores de emulsão, percentuais de fresado e ciclos de carregamento.

No primeiro experimento, o foco está em analisar como diferentes níveis de emulsão, combinados com dois tipos de solo, afetam variáveis como deformação permanente (DP), deformação resiliente (DR), fator de forma "b" e módulo resiliente (MR). O segundo experimento aborda a influência do percentual de fresado e da emulsão sobre as propriedades mecânicas dos solos, testando diversas combinações para entender sua durabilidade ao longo de ciclos de carregamento. No terceiro experimento, a variação na dosagem de emulsão é analisada em relação ao Módulo Resiliente (MR) durante diferentes ciclos de carregamento, e no quarto, todos os fatores estudados são integrados para avaliar sua contribuição para a rigidez do solo, medida por meio do Módulo Resiliente.

Em todos esses experimentos, a Análise de Variância (ANOVA) é utilizada como ferramenta estatística para comparar as médias das respostas mecânicas e determinar a significância das diferenças observadas. Devido a esta abordagem, o estudo visa fornecer uma base sólida para a validação das hipóteses e o desenvolvimento de soluções inovadoras para a estabilização de pavimentos.

## **1.2 Formulação do problema**

Não há um método padronizado para se estabilizar o solo ou compostos com asfalto. Os perfis de solos são muito variados ao redor do mundo. Cada país ou órgão de tráfego utiliza seu método para estabilizar solos e compostos com asfalto. Na tese de Sant'Ana (2009) é possível se encontrar essa uma lista com os distintos tipos de métodos para se estabilizar solos e compostos com asfalto.

O problema de pesquisa deste estudo centraliza-se na necessidade de investigar de forma específica como a estabilização dos solos e compostos com asfalto, utilizando a emulsão asfáltica como vetor, afeta sua resposta mecânica sob carregamento multietápico.

A pesquisa visa, então, preencher lacunas de conhecimento sobre a interação entre solos e compostos estabilizados com asfalto sob carregamento multiestágio. Assim sendo, auxiliando na investigação e no entendimento da utilização da estabilização asfáltica para uma melhor aplicação prática dessa técnica de estabilização em projetos de engenharia civil e geotécnica.

Considerando a diversidade de processos e materiais relacionados à pavimentação asfáltica, torna-se interessante explorar abordagens ou técnicas que envolvam o estudo de deformações em múltiplos estágios, seja no processo de fabricação, aplicação ou avaliação de pavimentos, criando um liame de pesquisa.

## **1.3 Justificativa**

A pesquisa científica é um processo contínuo de geração e disseminação do conhecimento, e a revisão bibliométrica desempenha um papel crucial nesse processo ao avaliar a produção acadêmica e suas tendências ao longo do tempo. Uma revisão bibliométrica envolve a análise quantitativa de artigos científicos, buscando padrões e insights relevantes para um campo de estudo específico.

As análises quantitativas e qualitativas desta análise bibliométrica podem ser consultadas no Anexo 1.

Para a seleção do primeiro conjunto de palavras-chave, foram utilizados 10 artigos cujas pesquisas abrangiam o conceito de carregamento multiestágio. Dessa forma, as seguintes palavras-chave foram empregadas para realizar as buscas nas bases acadêmicas: ("multi-sequenced repeated load" OR "multi stage" OR "multi-stage" OR multistage) AND pavement.

No entanto, é importante notar que poucos trabalhos não mencionam explicitamente o carregamento multiestágio em seus títulos, resumos ou palavras-chave. Em alguns casos, esses trabalhos abordam exclusivamente os resultados de ensaios mecânicos, utilizando termos como "deformação permanente" ou "módulo resiliente", embora estejam de fato realizando carregamento multiestágio.

Quando os termos "módulo resiliente" e "deformação permanente" são incluídos nas buscas, a quantidade de trabalhos encontrados aumenta para mais de 2000 documentos, o que desvia o foco da análise.

Além disso, não foram identificados trabalhos nos agrupamentos formados na primeira etapa da busca que tratassem do uso de emulsão asfáltica.

Com o propósito de identificar com maior precisão a lacuna na pesquisa, recorreu-se a um segundo conjunto de palavras-chave na busca: ("resilient modulus" OR "multi-sequenced repeated load" OR "multi stage" OR "multi-stage" OR multistage OR "Permanent Deformation") AND (bitumen OR bituminous OR asphalt) AND emulsion. Desta maneira, buscou-se reunir os documentos que explorassem tanto o carregamento multiestágio e seu comportamento mecânico quanto a utilização de emulsão asfáltica. Foram encontrados 165 documentos, dos quais 125 eram artigos com 331 autores.

A busca nas bases iniciou utilizando as palavras-chave: estabilização asfáltica e pavimento. Foi possível, então, observar que há, a partir de 2006, um incremento de trabalhos acadêmicos que tratam do tema. A estabilização asfáltica permite que se utilizem materiais locais na construção de rodovias, tornando este um processo mais sustentável do ponto de vista econômico, pois gasta-se menos com o transporte de materiais, e ambiental, porque se emite menos gases de efeito estufa transportando materiais a longas distâncias.

A revisão bibliométrica revelou uma crescente produtividade científica no campo da estabilização asfáltica para pavimentação, especialmente após 2006. Este aumento pode estar relacionado à busca por métodos mais sustentáveis e eficientes, em linha com discussões internacionais sobre mudança climática, como a COP 12. No entanto, há uma lacuna de pesquisa identificada na integração entre o carregamento multiestágio e a estabilização de solos usando emulsão asfáltica. Embora existam estudos que abordem a estabilização asfáltica, poucos mencionam explicitamente o carregamento multiestágio. Portanto, há uma oportunidade para investigar essa interseção entre carregamento multiestágio e estabilização asfáltica de solos, especialmente considerando os benefícios potenciais em termos de eficiência e sustentabilidade na construção de pavimentos. Este estudo propõe preencher essa lacuna,

buscando compreender a relação entre deformações resilientes e permanentes utilizando a técnica de carregamento multiestágio, contribuindo assim para avanços significativos na área da engenharia de pavimentos.

#### **1.4 Hipóteses**

A hipótese principal deste estudo é que a adição de cimento asfáltico com o uso da emulsão asfáltica pode aumentar a coesão e resistência do solo, reduzindo, assim, a deformação permanente e incrementando a resiliente, aprimorando o domínio do *shakedown*, avaliada pelo carregamento em multiestágio.

Hipóteses secundárias:

Espera-se que a estabilização granulométrica e asfáltica, melhore as respostas plásticas e elásticas para o composto utilizando o carregamento multiestágio.

Existem estudos científicos que não recomendam o uso de estabilização asfáltica em solos com alto percentual de finos (silte e argila). Porém com o surgimento do método de dimensionamento mecanístico-empírico, acredita-se que a estabilização asfáltica e granulométrica pode resultar em um aprimoramento significativo da resistência e resposta mecânica desses solos e compostos sob solicitações em multiestágio.

#### **1.5 Objetivos da pesquisa**

O objetivo principal deste estudo é:

- Avaliar a resposta resiliente e plástica do solo e do solo-fresado estabilizado com cimento asfáltico, bem como a ocorrência de *shakedown*, utilizando uma emulsão asfáltica de ruptura lenta sob carregamento em múltiplos estágios.

Os objetivos secundários incluem:

- Analisar a influência do filme de betume no comportamento do solo submetido à tração por compressão diametral e auxiliar na escolha do teor adequado de emulsão para realização dos ensaios de carregamento em multiestágio.
- Analisar a influência das estabilizações asfáltica e granulométrica no módulo resiliente do solo e do solo fresado.

- Avaliar o impacto da estabilização de solos com a adição de asfalto e fresado na resistência e resposta mecânica do solo mais fino e mais pedregulhoso, por meio de ensaios laboratoriais em solicitações multiestágio, visando identificar melhorias no comportamento dos solos e compostos estabilizados.

## **1.6 Delimitação da pesquisa**

Delimitação: Para o ensaio de tração por compressão diametral, utilizou-se um limite de 6% de emulsão em relação ao peso seco da amostra. Esse limite foi definido com base na economicidade da utilização da emulsão, ponderando-se que para valores superiores a este limite, outras técnicas de estabilização deveriam ser consideradas.

Para o carregamento multiestágio, foram utilizados cinco carregamentos em múltiplos estágios, até o limite da razão de 1:4 entre a tensão confinante e a tensão desviadora, com base na revisão da literatura e na norma europeia EN-13286-7 (CEN, 2004<sup>a</sup>).

O fresado foi utilizado com o intuito de se diminuir a quantidade de material passante na peneira #0,075.

Não é possível generalizar os resultados desta pesquisa, sendo esta uma contribuição para construção do conhecimento sobre estabilização asfáltica sob a influência de um carregamento em múltiplos estágios.

## **1.7 Contribuições e inovações desta pesquisa**

O estudo introduz uma abordagem inovadora ao investigar a estabilização asfáltica de solos e compostos com fresado utilizando emulsão asfáltica por meio do carregamento multiestágio, uma técnica que tem sido pouco explorada na literatura. Ao avaliar como diferentes teores de emulsão afetam o comportamento de diferentes materiais (solo e solo-fresado) a pesquisa fornece novas perspectivas sobre a viabilidade e eficácia dessas misturas na construção de pavimentos.

Esta pesquisa utiliza a teoria do *shakedown* para caracterizar e classificar as misturas estabilizadas em termos de sua resposta à deformação permanente em cada estágio de carregamento. Esta aplicação permite uma melhor compreensão dos limites de desempenho das misturas sob carregamento cíclico, tanto para o solo estabilizado quanto para o composto

estabilizado, fornecendo uma base teórica sólida para futuras investigações e práticas de engenharia.

Uma inovação científica importante é a avaliação simultânea das respostas resilientes e plásticas de solos estabilizados com asfalto, apresentada em um único gráfico que considera a deformação total e permanente. Essa abordagem permite uma compreensão mais completa do comportamento dos materiais sob condições variáveis de carga.

Este estudo se propõe a avaliar a resposta plástica e elástica de solos estabilizados no mesmo ensaio, utilizando a técnica de carregamento em multiestágio, que o ensaio que mais se aproxima das condições reais de campo, permitindo simular de forma mais realista as condições de tráfego e identificar possíveis falhas precocemente.

A pesquisa propõe a integração dos estudos de estabilizações asfálticas e granulométrica com o uso de fresado, uma abordagem inovadora que busca melhorar as propriedades mecânicas dos pavimentos.

## **1.8 Relevância do estudo**

A pesquisa destaca a reutilização de fresado asfáltico, um resíduo gerado em obras de reabilitação de pavimentos. Este reaproveitamento não só contribui para a redução de passivos ambientais, mas também promove a sustentabilidade na construção civil, transformando resíduos em recursos valiosos. Sem aumentar demasiadamente a resistência do material estabilizado, a emulsão pode contribuir para um processo contínuo de reciclagem.

Este estudo enfatiza a importância de empregar solos locais na construção de pavimentos, o que reduz a necessidade de extração de materiais de jazidas e os custos associados ao transporte. Essa prática, além de ser economicamente vantajosa, minimiza os impactos ambientais.

## **1.9 Estrutura da tese**

Na introdução será apresentado a motivação da pesquisa, incluindo as considerações iniciais que delineiam o problema central. A formulação do problema é explicitada, seguida da justificativa que aborda a relevância acadêmica e prática do estudo. A revisão bibliométrica é detalhada utilizando o software *Biblioshiny*, scripts em R e uma análise gráfica. Além disso,

são discutidas as premissas e hipóteses, os objetivos da pesquisa, e uma visão geral da estrutura da tese.

O capítulo de revisão da literatura oferece uma análise abrangente sobre emulsões asfálticas, estabilização asfáltica e fresado asfáltico, com foco em estudos nacionais e internacionais. Discussões sobre o módulo resiliente, deformação permanente em múltiplos estágios e o conceito de *shakedown* são incluídas. O capítulo conclui com uma síntese das considerações finais, destacando os principais pontos abordados.

No terceiro capítulo, sobre o Método Científico, é apresentada a metodologia científica adotada para a pesquisa, com uma discussão sobre sua aplicabilidade. São detalhadas as abordagens e métodos específicos utilizados, proporcionando uma compreensão clara dos procedimentos metodológicos que sustentam o estudo.

No quarto capítulo sobre Materiais e Aplicação do Método, é detalhado os materiais utilizados e a aplicação dos métodos científicos. Inicia com uma descrição das regiões onde foram coletadas as amostras, seguida de uma caracterização física e química dessas amostras. Inclui a escolha da emulsão, preparação das amostras e a descrição dos ensaios mecânicos realizados, concluindo com uma análise estatística das regiões plástica e elástica.

No quinto capítulo, que aborda os resultados obtidos conforme aplicação do método do quarto capítulo, estes resultados são apresentados e discutidos detalhadamente. A caracterização física e química das amostras é explorada, juntamente com análises de granulometria, curvas de compactação, parâmetros geotécnicos e módulo resiliente. São incluídas discussões sobre deformação permanente e resiliente em múltiplos estágios, análise do *shakedown* e uma análise estatística utilizando o software JAMOVI.

A conclusão oferece uma síntese dos principais achados da pesquisa, discutindo as considerações iniciais e as conclusões derivadas dos resultados apresentados nos capítulos anteriores. Aqui se encontrará uma visão consolidada das contribuições do estudo.

O capítulo final discute as limitações do estudo e apresenta considerações finais. São oferecidas proposições para novos estudos, baseadas nas descobertas e nas lacunas identificadas ao longo da pesquisa. É uma seção crucial para identificar futuras direções de pesquisa e possíveis melhorias.

## **2 REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1 Considerações iniciais**

Apesar de existirem estudos sobre a estabilização de solos para pavimentos com emulsão asfáltica, a maioria deles utiliza metodologia advinda do uso adaptado de outros métodos de estabilização, como os dias de cura do cimento Portland. Portanto é forçoso se aprimorar a técnica para o uso de emulsões asfálticas com solos tropicais, construindo metodologia própria para encontrar a forma mais racional e coerente para seu uso em campo e testes em laboratórios, (FERREIRA, 1980).

Este capítulo aborda aspectos teóricos e experimentais relacionados ao uso de emulsão asfáltica e fresado asfáltico na estabilização de solos e compostos. Aqui, são explorados os conceitos de emulsão asfáltica, suas classificações, e a importância da escolha adequada do tipo e concentração do agente emulsificante para garantir a estabilidade e eficácia da estabilização do solo.

O capítulo também discute a importância do carregamento em multiestágio, uma técnica mais atual para avaliar a resposta mecânica de solos estabilizados sob diferentes condições de carga, simulando de forma mais realista as condições encontradas em pavimentos. Este método é destacado por sua capacidade de fornecer uma análise detalhada tanto das respostas resilientes quanto das plásticas do material, aspectos críticos para a avaliação do desempenho de pavimentos.

Ademais, são apresentados estudos que ilustram a aplicação prática das teorias discutidas, fornecendo uma base empírica para a escolha dos métodos de estabilização e as variáveis a serem consideradas nos ensaios experimentais. Com isso, consolida-se o entendimento teórico necessário para a realização da pesquisa e estabelece as bases metodológicas que orientarão os experimentos subsequentes, garantindo a relevância e a aplicabilidade dos resultados obtidos.

## 2.2 Emulsão asfáltica

Conforme descrito em ABEDA (2010), o processo de emulsificação do cimento asfáltico (CAP) em partículas micrométricas e sua dispersão no meio aquoso é obtido por meio da aplicação de energia térmica e mecânica, por meio do moinho coloidal, resultando em uma emulsão de asfalto em água. A adição de agentes emulsificantes é necessária para evitar que as partículas de asfalto se aglomerem, mantendo as duas fases em equilíbrio durante um período que pode variar de algumas semanas a alguns meses. O agente emulsificante é uma substância tensoativa que diminui a energia ou tensão superficial e aumenta a área interfacial entre as fases (asfalto e água). A escolha do tipo e da concentração do agente emulsificante determina a carga da partícula e a reatividade da emulsão produzida. A emulsão asfáltica pode ser utilizada na estabilização de solos, melhorando a capacidade de suporte e impermeabilidade dos solos, destacando-se sua eficácia na estabilização. No entanto, a cura úmida pode prejudicar o comportamento resiliente da mistura solo-emulsão, sendo importante considerar outros métodos de cura que possam proporcionar melhores propriedades mecânicas e durabilidade à mistura.

Ainda segundo supracitado manual, O processo de ruptura da emulsão asfáltica ocorre quando os glóbulos de asfalto dispersos na água entram em contato com o agregado mineral. A velocidade em que ocorre a separação e a evaporação da água depende de vários fatores, como o tipo de emulsão, reatividade/superfície específica dos agregados, teor de umidade dos mesmos, temperaturas dos materiais e ambiente e ação mecânica de compactação. O sinal de ruptura é dado pela mudança de cor da emulsão, que passa de marrom para preta. Nas emulsões catiônicas, o processo de ruptura se dá principalmente por reação química de atração eletrostática entre o emulsificante e o agregado, enquanto nas emulsões aniônicas e não iônicas, ocorre pela evaporação da água. O tempo de ruptura e cura das emulsões durante sua aplicação dependerá da técnica e dos materiais empregados, bem como das condições ambientais. A estabilização de solos com emulsão asfáltica é uma técnica que tem sido estudada no Brasil, com resultados positivos na melhoria das propriedades mecânicas das misturas solo-emulsão. No entanto, a cura úmida pode prejudicar o comportamento resiliente da mistura solo-emulsão, sendo importante considerar outros métodos de cura que possam proporcionar melhores propriedades mecânicas e durabilidade à mistura.

As emulsões são classificadas com base no tempo de ruptura e na carga da partícula, podendo ser catiônicas, aniônicas, neutras ou anfotéricas, e podem ser categorizadas como de

ruptura rápida, média, lenta ou controlada. Dependendo do teor de ligante asfáltico, as emulsões podem ser classificadas em diferentes grupos, como RR-1C, RR-2C, RM-1C, RM-2C, entre outros. Cada categoria possui suas especificações de viscosidade, teor de ligante asfáltico e aplicação recomendada, abrangendo desde serviços de pintura de ligação até reciclagem a frio de revestimentos asfálticos. Essa classificação é fundamental para garantir a adequação das emulsões asfálticas às diferentes necessidades de construção e manutenção de pavimentos.

As emulsões de ruptura rápida, média e lenta são utilizadas em diferentes áreas da pavimentação de acordo com suas características e propriedades.

a) Emulsões de Ruptura Rápida:

- São utilizadas em tratamentos superficiais, selantes e pintura de ligação.
- Ideais para aplicações em que a rápida adesão aos agregados é necessária, como em superfícies de baixo tráfego e em serviços de manutenção rápida.

b) Emulsões de Ruptura Média:

- São empregadas em materiais pré-misturados abertos (agregados isentos, praticamente, de pó e de baixa área superficial, por exemplo, britas) e camadas de base.
- Indicadas para misturas com agregados isentos de pó e de baixa área superficial, como britas utilizadas em materiais pré-misturados abertos.

c) Emulsões de Ruptura Lenta:

- São comumente utilizadas em misturas densas e semidensas.
- Recomendadas para revestimentos asfálticos de granulometria densa, proporcionando excelente comportamento estrutural em vias de médio volume de tráfego.

Existe, também, a emulsão de ruptura controlada que é um tipo específico de emulsão asfáltica que possui propriedades controladas de forma a permitir um tempo de ruptura predefinido e controlado. Esse tipo de emulsão é projetado para oferecer uma estabilidade adequada durante o processo de aplicação e compactação da mistura asfáltica, garantindo que a ligação entre os agregados e o ligante asfáltico ocorra no momento desejado.

A emulsão de ruptura controlada é especialmente útil em condições climáticas específicas, como em regiões com temperaturas mais baixas e umidade elevada, pois o tempo de ruptura da emulsão convencional pode ser comprometido. Ao controlar o tempo de ruptura, essa emulsão permite uma melhor aderência entre os agregados e o ligante asfáltico, resultando em uma mistura mais homogênea e durável.

Portanto, a emulsão de ruptura controlada, identificada pela sigla RC (ruptura controlada), é uma opção técnica que oferece maior controle sobre o processo de aplicação de emulsões asfálticas em condições específicas, contribuindo para a qualidade e durabilidade do pavimento asfáltico.

Cada tipo de emulsão é selecionado com base nas exigências da aplicação específica, levando em consideração fatores como o tipo de agregado, as condições ambientais e o desempenho desejado da mistura asfáltica.

### **2.3 Estabilização asfáltica**

A estabilização asfáltica é um processo utilizado na engenharia de pavimentos para melhorar as propriedades de materiais granulares, como solo, agregados ou materiais reciclados, por intermédio da adição de um ligante asfáltico, como emulsão de asfalto ou asfalto espumado. Esse processo tem como objetivo principal aumentar a resistência, durabilidade e estabilidade do material, resultando em um pavimento mais robusto e capaz de suportar as cargas de tráfego e as condições ambientais adversas.

A estabilização asfáltica pode ser empregada em diversas situações, como na construção de novos pavimentos, na reabilitação de pavimentos existentes, na reciclagem de materiais asfálticos e na melhoria de propriedades mecânicas do solo. Ao adicionar o ligante asfáltico ao material granular, cria-se uma mistura homogênea que apresenta maior coesão, resistência à água e capacidade de suporte de carga.

Além disso, a estabilização asfáltica contribui para a redução da deformação permanente, o controle da umidade no material, a reciclagem de materiais asfálticos e a melhoria das propriedades mecânicas do pavimento. Esse processo é fundamental para a construção de pavimentos duráveis, econômicos e sustentáveis, garantindo a segurança e a eficiência da infraestrutura rodoviária.

De acordo com o manual SABITA (2020), a estabilização asfáltica tem como função principal melhorar as propriedades do material, proporcionando maior resistência e durabilidade ao pavimento. Além disso, a estabilização asfáltica contribui para a redução da deformação permanente, o controle da umidade no material, a reciclagem de materiais asfálticos e a melhoria das propriedades mecânicas do pavimento.

O uso de emulsões asfálticas tem se mostrado uma técnica promissora na estabilização e melhoria de solos para aplicações em pavimentação. Diversos estudos recentes exploraram as vantagens desse método, demonstrando melhorias significativas em diferentes tipos de solos e condições de aplicação.

Um estudo realizado por Abdullah e Al-Abdul Wahhab (2019) investigou a estabilização de solos utilizando emulsão de asfalto com enxofre (ESA). Os resultados indicaram que a ESA pode ser utilizada com sucesso para melhorar a resistência e a durabilidade de solos tratados, tornando-os mais adequados para aplicação em pavimentos rodoviários. Este estudo destaca que a incorporação de enxofre na emulsão asfáltica resulta em uma matriz mais estável e menos suscetível a deformações, especialmente em condições de alta carga.

Oluyemi-Ayibiowu (2019) explorou o comportamento de solos lateríticos quando estabilizados com emulsão asfáltica. Os solos lateríticos, que são comuns em regiões tropicais e apresentam desafios significativos em termos de estabilidade, responderam de maneira favorável à estabilização com emulsão asfáltica. O estudo mostrou uma melhoria nas propriedades mecânicas desses solos, sugerindo que a emulsão asfáltica pode ser uma solução viável para a construção de pavimentos em áreas com solos problemáticos.

A estabilização de solos expansivos com emulsão asfáltica foi objeto de investigação de Thajeel et al. (2023). O estudo focou em solos argilosos, que são conhecidos por sua propensão a expansão e contração, causando problemas significativos em pavimentos. Os autores observaram que a estabilização com emulsão asfáltica resultou em uma redução significativa na expansividade dos solos, além de melhorar a resistência à compressão, o que é crucial para a durabilidade dos pavimentos construídos sobre esses solos.

Outro estudo relevante foi conduzido por Gálvez-Cooper (2023), que avaliou o impacto da adição de emulsão asfáltica e limalhas de aço em solos argilosos. Os resultados mostraram que essa combinação não apenas melhorou a estabilidade do solo, mas também aumentou a resistência à erosão, o que é particularmente importante em regiões sujeitas a condições climáticas extremas.

Por fim, Khawla (2016) comparou os efeitos da adição de emulsão asfáltica e cimento Portland em solos arenosos. O estudo concluiu que a combinação de emulsão asfáltica e cimento resultou em um desempenho superior em termos de resistência e durabilidade, sugerindo que essa mistura pode ser uma alternativa eficiente para pavimentação em áreas com solos arenosos.

Os artigos analisados demonstram uma variedade de abordagens metodológicas para avaliar a eficácia dessa estabilização, utilizando diferentes ensaios laboratoriais. Entre os ensaios comumente empregados, destacam-se:

- Ensaio de compressão não confinada (UCS): Frequentemente utilizado para medir a resistência à compressão dos solos estabilizados, este ensaio é essencial para verificar o ganho de resistência proporcionado pela adição de emulsão asfáltica.
- Ensaio CBR (California Bearing Ratio): Este ensaio avalia a capacidade de suporte do solo, sendo crucial para determinar a viabilidade do solo estabilizado para uso em pavimentos.
- Ensaio de expansão livre: Fundamental para solos expansivos, este ensaio mede a capacidade de expansão do solo em presença de água, permitindo avaliar a redução na expansividade após a estabilização.
- Ensaio de cisalhamento direto e ensaio triaxial: Utilizados para avaliar a resistência ao cisalhamento e a estabilidade dos solos, estes ensaios são importantes para entender o comportamento do solo sob diferentes condições de carga.
- Ensaio de compactação proctor: Utilizado para determinar a densidade máxima e a umidade ótima dos solos estabilizados, este ensaio é fundamental para garantir a qualidade da compactação em campo.

Esses ensaios fornecem uma visão abrangente das melhorias nas propriedades físicas e mecânicas dos solos estabilizados com emulsão asfáltica, assegurando que os pavimentos resultantes possuam a resistência e durabilidade necessárias para um desempenho eficiente.

Adicionalmente, a pesquisa em questão visa aprofundar o entendimento sobre o comportamento dos solos estabilizados ao submetê-los a ensaios em carregamento multiestágio. Este tipo de ensaio é crucial para simular condições reais de carregamento, permitindo a análise detalhada da resposta do solo estabilizado ao longo de diferentes níveis de estresse, o que é vital para a concepção de pavimentos que possam suportar cargas repetidas e variadas ao longo do tempo.

## **2.4 Fresado asfáltico**

Conforme descrito no manual de estabilização asfáltica da África do Sul, SABITA (2020), o fresado asfáltico, também conhecido como *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), tem

se tornado uma prática cada vez mais comum na construção e reabilitação de pavimentos. Sua utilização é justificada por diversos fatores, incluindo benefícios econômicos, ambientais e técnicos, conforme a seguir:

- O uso de RAP reduz a necessidade de novos materiais agregados e betuminosos, economizando recursos naturais e financeiros. Isso é particularmente importante em áreas onde os materiais de construção são escassos ou caros.
- A reciclagem do asfalto fresado contribui para a sustentabilidade ambiental ao reduzir a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários e diminuir a demanda por novos materiais, o que, por sua vez, reduz a exploração de pedreiras e a emissão de poluentes associada ao processo de produção de novos materiais.
- O RAP possui propriedades que podem melhorar o desempenho dos pavimentos. Este pode ser integrado a novas misturas asfálticas, proporcionando uma boa aderência e durabilidade.
- A utilização de RAP pode reduzir significativamente os custos de construção e manutenção dos pavimentos. A economia provém tanto da redução de material virgem quanto da diminuição dos custos de transporte e disposição de resíduos.
- O material fresado é coletado das rodovias durante processos de manutenção e reabilitação. Esse material é, então, processado para remover impurezas e obter uma granulometria adequada para reutilização.
- O RAP pode ser usado em diferentes proporções, dependendo das especificações do projeto. O fresado pode ser incorporado em misturas a quente (HMA), misturas a frio, ou utilizado em camadas de base estabilizadas com betume.

Para garantir a qualidade do pavimento final, são realizados diversos ensaios laboratoriais e de campo. Esses testes avaliam propriedades como a resistência à compressão, módulo resiliente, e desempenho sob cargas repetidas.

Conforme Tebaldi, G. et al. (2018), é possível reabilitar uma espessura considerável do pavimento por meio do método reciclagem à frio. No entanto, em termos da espessura removida do pavimento, este método pode ser subdividido em reciclagem completa ou parcial. A reciclagem parcial, também conhecida como "partial-depth recycling" (PDR), é um processo de reutilização de materiais asfálticos em que apenas camadas superficiais do pavimento são removidas e recicladas. No método de reciclagem parcial, parte da camada asfáltica é triturada e alguns materiais aditivos como emulsão de betume e geralmente um aditivo hidráulico como

cimento, cal ou outros tipos de pozzolanas podem ser adicionados à mistura e compactados novamente na estrada.

Conforme documento citado no parágrafo anterior, o método de reciclagem profunda, também conhecido como recuperação em profundidade completa: *full-depth reclamation* (FDR):, toda a profundidade da camada asfáltica, e às vezes uma parte da camada subjacente, são usadas no processo de reciclagem. Este método é especialmente útil nos casos em que os problemas no pavimento são contribuições de todas as camadas e as camadas subjacentes não têm qualidade desejável. Um dos problemas encontrados durante o processo de FDR é a presença de solos de baixa qualidade, especialmente argilas. Na maioria dos casos, foram estabelecidas limitações para a presença de solos de grãos finos na camada FDR. Em geral, a presença desses solos em uma estrutura de pavimento sempre foi um dos principais desafios enfrentados pelos engenheiros.

Na obra escrita por Assis (2016), a fresagem que foi realizada com uma fresadora modelo 2000 VC da Wirtgen, um equipamento de grande porte com capacidade de corte de até 15 cm em uma única passada. Para a realização dos ensaios, foram selecionadas amostras em diferentes espessuras de corte e velocidades de avanço, conforme uma matriz específica que considerava três velocidades (3, 6 e 10 m/min) e três espessuras (3, 5 e 8 cm). As amostras foram coletadas no campo e posteriormente analisadas em laboratório.

Os ensaios envolveram a determinação das curvas granulométricas para as amostras fresadas, tanto com quanto sem a extração do betume. Foram traçadas três curvas principais: uma para o material original, outra para o material fresado sem a extração do betume, e a terceira para o material fresado com a extração do betume. O processo de extração do betume foi realizado com o equipamento Rotarex, permitindo uma análise mais precisa da granulometria resultante.

Ainda segundo o autor, os resultados indicaram que a fresagem modifica significativamente a granulometria do material, especialmente no que diz respeito à quantidade de finos, que é reduzida. A curva granulométrica resultante para o material com extração do betume mostrou-se mais densa, deslocando-se para cima, enquanto a curva para o material sem extração apresentou uma menor quantidade de material passante em cada peneira, devido à presença de grumos. Essas mudanças na granulometria podem impactar negativamente a coesão da mistura reciclada, especialmente na reciclagem “in situ” a frio, sendo a falta de finos é um desafio adicional para a obtenção de uma mistura coesa.

Outro resultado importante está relacionado à velocidade de avanço da fresadora. O aumento da velocidade de avanço resultou em grumos maiores, o que acentuou a extrapolação dos limites inferiores das faixas granulométricas recomendadas para pavimentação. Isso implica que a velocidade do equipamento deve ser cuidadosamente controlada para evitar a formação de grumos de tamanho indesejado, que podem afetar negativamente a reciclagem do material.

As curvas granulométricas obtidas com a extração do betume mostraram-se mais densas, deslocando-se para cima, o que é indicativo de que a fresagem causa uma quebra significativa dos agregados ao longo da linha de corte. Esse efeito deve ser considerado no dimensionamento das misturas recicladas, especialmente naquelas utilizadas como camadas de base ou de revestimento asfáltico.

Além disso, a produtividade dos equipamentos de fresagem variou consideravelmente dependendo das condições do pavimento e do ambiente. Por exemplo, em áreas urbanas com alta densidade de interferências, como tampões de ferro e sarjetões, a produtividade foi significativamente menor em comparação a rodovias ou vias expressas.

O material resultante da fresagem é descrito por Assis (2016) como sendo muito rico em ligante, o que influencia diretamente a quantidade de emulsão necessária para a reciclagem "in situ" a frio. Em geral, a quantidade média de emulsão incorporada no processo é de aproximadamente 1,5% em peso. Essa baixa quantidade é suficiente para atuar como um agente ligante, pois o fresado já contém uma quantidade significativa de ligante asfáltico remanescente, reduzindo assim a necessidade de adição de grandes quantidades de emulsão.

## **2.5 Estudos sobre solo emulsão desenvolvidos no Brasil**

A pesquisa intitulada "Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica" de Micelli (2006), teve como foco principal a caracterização e estudo de três tipos distintos de solos provenientes do Estado do Rio de Janeiro, submetidos à estabilização com emulsão asfáltica, com ênfase na análise de sua deformabilidade, utilizando abordagens fundamentadas na Mecânica dos Pavimentos. A metodologia empregada envolveu a coleta de amostras de solos de diversas regiões do interior do Estado do Rio de Janeiro, seguida pela realização de ensaios de caracterização desses solos no Laboratório de Solos do IME, bem como a análise dos resultados obtidos. Dentre os ensaios

realizados, destacam-se os de resistência, visando avaliar o comportamento mecânico das misturas solo-emulsão como base de pavimentos e revestimento primário de vias de baixo custo, além de ensaios de desgaste, como o Loaded Wheel Test (LWT) e o Wet Track Abrasion Test (WTAT).

Os solos investigados foram classificados de acordo com suas características, sendo o Solo A classificado como TRB A-2-4 (NA': Não Laterítico Arenoso), indicando sua adequação para utilização em bases e sub-bases de pavimentos, dependendo do CBR. O Solo B, por sua vez, foi classificado como TRB A-7-5 (LG'- Laterítico Argiloso), apresentando desempenho desfavorável em pavimentação, embora exibisse comportamento laterítico. Já o Solo C foi classificado como TRB A-7-6 (LG': Laterítico Argiloso), também com desempenho inadequado em pavimentação, porém também demonstrando características lateríticas.

A homogeneização dos corpos de prova com emulsão foi realizada seguindo os seguintes passos:

- Ensaio de umidade higroscópica do solo;
- Separação da quantidade de solo e de emulsão a ser ensaiada;
- Cálculo da quantidade de água e de emulsão a serem adicionadas;
- Adição de uma parte da água de moldagem (água de dispersão), previamente calculada;
- Adição de outra parte à emulsão asfáltica (água de diluição) previamente calculada;
- Adição da emulsão diluída ao solo e posterior homogeneização manual;
- Homogeneização mecânica por três minutos em misturador de solos;
- Moldagem e compactação na energia Proctor normal dos corpos-de-prova;
- Pesagem dos corpos-de-prova;
- Colocação dos corpos-de-prova em cura seca (ao ar livre) ou em cura úmida (na câmara úmida). Nesse segundo caso, o corpo-de-prova é envolvido em filme de PVC antes de ser colocado na câmara úmida.

Os resultados obtidos revelaram a viabilidade da estabilização dos solos estudados com emulsão asfáltica, evidenciando melhorias nas propriedades mecânicas das misturas solo-emulsão. Além disso, foram observados efeitos positivos advindos da adição de emulsão

asfáltica nas características das misturas, o que reforça seu potencial uso em aplicações de pavimentação.

A emulsão RL mostrou-se mais fácil de ser misturada em comparação com a emulsão RM, que muitas vezes causava ruptura antes da conclusão da mistura. A umidade residual dos corpos de prova aumentou proporcionalmente com a quantidade de emulsão, evidenciando o efeito impermeabilizante da emulsão. Os corpos de prova estabilizados apresentaram menor fragilidade do que os solos puros secos ao ar, devido ao poder aglutinante da emulsão no solo.

Primeiramente, a adição de emulsão asfáltica demonstrou melhorias na capacidade de suporte e impermeabilidade dos solos, destacando-se sua eficácia na estabilização. No entanto, ao avaliar o comportamento mecânico dos solos estabilizados em relação aos solos puros, observou-se que o solo arenoso apresentou um aumento considerável em todos os parâmetros de resistência analisados. Isso é atribuído à adição de coesão ao solo, melhorando sua capacidade de resistir a esforços externos.

Por outro lado, nos solos plásticos, os resultados foram variados. Em curtos prazos, a adição de emulsão resultou em uma redução na resistência à compressão simples, mas a longo prazo, houve um aumento significativo no módulo de resiliência. Essa tendência sugere que, apesar da diminuição inicial na resistência, a estabilização com emulsão promove uma melhoria gradual nas propriedades mecânicas do solo.

Além disso, a análise dos ensaios de desgaste revelou diferentes respostas dos solos estabilizados. Enquanto o solo A apresentou melhorias significativas, com menor deformação permanente, o solo B não obteve resultados satisfatórios. Essas discrepâncias podem ser atribuídas às características intrínsecas dos solos e à interação específica entre os materiais do solo e a emulsão.

A conclusão em relação à cura úmida indicou que esse processo pode prejudicar o comportamento resiliente da mistura solo-emulsão. Foi observado que, em geral, os resultados foram piores do que para o solo puro, com uma deformação permanente maior na fase de condicionamento do ensaio em comparação com a cura seca. Isso sugere que a cura úmida pode afetar negativamente a resistência e a durabilidade da mistura.

A cura úmida pode não ser a melhor opção para a estabilização de solos com emulsão asfáltica, sendo importante considerar outros métodos de cura que possam proporcionar melhores propriedades mecânicas e durabilidade à mistura.

A pesquisadora Soliz (2007), no seu estudo intitulado “Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica”, tem como objetivo avaliar o método de dosagem aplicado a três diferentes tipos de solos do Estado do Rio de Janeiro, estabilizados quimicamente com emulsões asfálticas, e analisar os ganhos de módulo de resiliência desses solos estabilizados. Esses ganhos de módulo de resiliência refletem no dimensionamento mecânico para utilização desses solos como bases, sub-bases ou revestimentos de pavimentos de baixo volume de tráfego. A metodologia incluiu revisão bibliográfica, realização de ensaios de caracterização, classificação MCT, compactação na energia Proctor normal, mistura solo-emulsão, ensaios de resistência e análise dos resultados obtidos.

Os solos utilizados foram classificados da seguinte forma: solo 1: Classificação TBR A-1-b, Classificação MCT NA' (Não Laterítico Arenoso); solo 2: Classificação TBR A-7-5, Classificação MCT NG' (Não Laterítico Argiloso); e solo 3: Classificação TBR A-2-4, Classificação MCT NS' (Não Laterítico Siltoso).

A homogeneização dos corpos de prova com emulsão foi realizada seguindo os seguintes passos:

- Colocação do solo sobre uma bandeja limpa.
- Adição de uma parte da água de compactação calculada ao solo.
- Mistura do solo e preparação para receber a emulsão.
- Pesagem da quantidade de emulsão calculada de acordo com o teor desejado.
- Remoção do excesso de emulsão, se houver.
- Adição da quantidade determinada de água de diluição em um béquer para homogeneizá-la.
- Espalhamento da emulsão sobre o solo.
- Enxágue do béquer com a água reservada para evitar resíduos de emulsão.
- Mistura do solo com a emulsão.
- Procedimentos adicionais para garantir a homogeneização da massa.
- Moldagem dos corpos de prova com a mistura solo-emulsão.
- Verificação da umidade de moldagem utilizando pelo menos duas cápsulas

As conclusões do estudo revelam a influência de diversas variáveis na mistura do solo-emulsão. Solos arenosos-siltosos e pedregulhosos apresentaram maior facilidade de mistura em comparação com solos argilosos, sendo que a emulsão RL-1C proporcionou melhor trabalhabilidade que a RM-1C. O teor de água de compactação próximo ao teor ótimo mostrou-

se adequado para homogeneização e moldagem dos corpos-de-prova, resultando em massas específicas inferiores às dos solos puros. O uso de solos destorroados e não destorroados influenciou nos resultados de módulo e absorção, com solos argilosos não destorroados mostrando melhores resultados, facilitando a construção de forma mais econômica. O tempo de cura afetou os resultados, sendo que solos arenosos-pedregulosos e silto-arenosos poderiam ser utilizados sem secagem por vários dias, enquanto solos argilosos requeriam tempo de cura para melhoria após a adição de emulsão.

Os ensaios de resistência à compressão simples e triaxial não mostraram a mesma tendência em relação ao teor ótimo de emulsão asfáltica, com o ensaio de resistência à compressão simples não sendo adequado para análise mecânica. Os ensaios de desgaste mostraram resultados divergentes, com o solo 2 apresentando bons resultados em ambos os ensaios. Comparado com estudos anteriores, a estabilização de solos com emulsão mostrou bom potencial de aplicação, variando de acordo com o tipo de solo e necessitando análise detalhada antes da definição do teor de projeto. A impermeabilização do solo não teve igual relevância em diferentes teores de emulsão residual, sugerindo que a definição do teor de projeto pode ser mais associada à melhoria buscada com a estabilização.

A pesquisadora Suarez (2008), em “Estudo do comportamento mecânico de dois solos lateríticos do Estado de São Paulo com adição de emulsão asfáltica”, teve como objetivo determinar, por meio de ensaios de laboratório, o comportamento mecânico de misturas constituídas com solos lateríticos arenoso e argiloso e emulsão asfáltica, visando a sua utilização na construção rodoviária. O estudo envolveu a análise das propriedades mecânicas dessas misturas, como resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral, módulo de resiliência, índice de suporte Califórnia, e variação volumétrica durante a cura e imersão dos corpos-de-prova

Um dos solos foi classificado como LA' (Laterítico arenoso) e o outro como LG' (Laterítico argiloso). Além disso, de acordo com a classificação HRB, um dos solos foi classificado como A-2-6 e o outro como A-7-5. Já de acordo com o sistema USCS, um dos solos foi classificado como SC e o outro como ML.

A energia de compactação utilizada nos ensaios foi a energia do Proctor normal. Os ensaios de compactação foram realizados seguindo os procedimentos da norma DNER-ME 162/94 para obtenção da umidade ótima e da massa específica seca máxima de cada uma das misturas estudadas. Essa energia de compactação foi empregada na moldagem dos corpos de

prova utilizados para a determinação do comportamento mecânico das misturas de solo-emulsão.

O procedimento experimental envolveu várias etapas, incluindo a determinação da emulsão a ser utilizada, a avaliação da melhor condição de cura para os corpos-de-prova e a análise dos efeitos do tempo de cura, imersão em água e selagem dos corpos-de-prova. Inicialmente, foram preparadas misturas de solo-emulsão com diferentes teores de emulsão. Em seguida, foram realizados ensaios de compressão simples e ensaios de compressão diametral para avaliar a resistência das misturas. Os corpos-de-prova foram submetidos a diferentes condições de cura, como exposição ao ar livre, selagem com papel filme e câmara úmida, e foram avaliados após imersão em água. Os resultados dos ensaios foram analisados para determinar o efeito da emulsão, do tempo de cura e das condições de ensaio nas propriedades mecânicas das misturas de solo-emulsão

Os ensaios realizados neste estudo incluíram ensaios de compactação, compressão simples, compressão diametral e ensaios triaxiais cíclicos (MR) e CBR. Esses ensaios foram conduzidos para avaliar a resistência e deformabilidade das misturas de solo-emulsão, considerando a influência do tempo de cura, condição de cura, teor de emulsão e tipo de solo incorporado na mistura.

O estudo constatou que as emulsões asfálticas de ruptura lenta demonstraram melhor desempenho em trabalhabilidade e dispersão quando misturadas aos solos analisados. Ao analisar os parâmetros de compactação, observou-se que a adição da emulsão asfáltica resultou na diminuição da massa específica seca máxima e da umidade ótima, com efeito mais pronunciado em misturas com solo argiloso do que em misturas com solo arenoso.

A cura pré-compactação das misturas não favoreceu o ganho de resistência para ambos os solos, enquanto a cura pós-compactação foi mais favorável quando os corpos-de-prova foram selados e curados ao ar. Os valores de resistência à compressão simples, resistência à compressão diametral e módulo de resiliência aumentaram com o aumento do teor de emulsão para amostras ensaiadas após imersão em água, sendo mais significativos para a resistência à compressão diametral e módulo de resiliência em condições sem imersão.

Os resultados indicam uma ação positiva da emulsão asfáltica em situações de imersão em água para ambos os solos, com um teor ótimo de emulsão de 8%. O efeito positivo da emulsão variou de acordo com o tipo de solo e o tipo de ensaio realizado, com diferenças observadas na resistência à compressão simples e resistência à compressão diametral.

O modelo composto apresentou o melhor desempenho na representação da variação do módulo de resiliência com o estado de tensão. Os ensaios complementares mostraram um aumento do CBR com a adição de emulsão para ambos os solos, destacando o melhor desempenho das misturas com solo argiloso.

Observou-se uma redução da expansão e contração dos corpos-de-prova moldados com misturas de solo argiloso devido ao incremento de emulsão, enquanto as misturas com solo arenoso não apresentaram variações significativas. Comparativamente, as resistências obtidas com emulsão dosada foram 30% maiores do que as obtidas com emulsão de uso convencional, e os valores de rigidez foram 45% maiores em condições de imersão.

Conclui-se que o efeito positivo da emulsão asfáltica pode contribuir para a melhoria do comportamento mecânico dos solos utilizados na construção de pavimentos. No entanto, são necessárias pesquisas adicionais, especialmente relacionadas às condições de cura e ensaios que reflitam as condições de campo.

A pesquisa de Sant'Ana (2009), intitulada “Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o estado do Maranhão”, se baseia na necessidade de desenvolver estudos e práticas relacionadas à utilização de misturas solo-emulsão como camada de revestimento em rodovias de baixo volume de tráfego, especialmente na ilha de São Luís. A relevância do estudo está associada à procura por soluções viáveis e economicamente sustentáveis para melhorar as condições de trafegabilidade em rodovias com baixo volume de tráfego, considerando as características locais e a disponibilidade de materiais.

Além disso, a pesquisa visa contribuir para o conhecimento e aprimoramento das técnicas de aplicação de misturas solo-emulsão, considerando a realidade das rodovias municipais e a necessidade de procedimentos eficazes e de baixo custo para manutenção e construção de vias com baixo volume de tráfego. A importância do estudo também se reflete na possibilidade de adaptação e aplicação dos resultados em outras regiões com características semelhantes, desde que sejam realizados estudos locais para verificar a viabilidade e eficácia das propostas apresentadas na pesquisa em tela.

O autor optou por utilizar a energia do Proctor intermediário para realizar os ensaios de compactação dos corpos-de-prova devido à necessidade de simular as condições de campo. Essa escolha foi feita para garantir que os resultados obtidos nos ensaios se aproximassem das condições reais encontradas em aplicações práticas, levando em consideração o tempo decorrido entre a mistura do solo e a compactação, o que pode impactar nas propriedades do solo.

Os tipos de solo utilizados no estudo foram classificados da seguinte forma: solo 424: Cascalho laterítico (A-1-a); solo 090: Solo fino, areno-siltoso; solo 092F: Solo fino, areno-argiloso; e solo 092: Solo fino, areno-argiloso.

Na tese, foi utilizada uma emulsão asfáltica catiônica de ruptura lenta, denominada RL-1C, para a estabilização do solo na mistura solo-emulsão. A escolha por essa emulsão específica foi baseada em diversos fatores, tais como:

- Disponibilidade no mercado: A emulsão RL-1C era facilmente encontrada no mercado, o que facilitou a realização dos ensaios e a execução do estudo.
- Adequabilidade a uma grande gama de solos: A emulsão RL-1C foi considerada adequada para a estabilização do solo utilizado no estudo, especialmente por sua compatibilidade com solos que possuem uma fração de finos, como os selecionados para a pesquisa.
- Trabalhabilidade: A emulsão de ruptura lenta RL-1C mostrou-se mais apropriada em termos de trabalhabilidade para a utilização com os solos estudados, o que contribuiu para a execução dos procedimentos de dosagem e mistura da mistura solo-emulsão.

O cálculo do teor de solo-emulsão foi realizado considerando a quantidade de solo e emulsão utilizados na mistura. A dosagem do solo-emulsão foi realizada com base nas orientações estabelecidas, considerando a granulometria do agregado, sua superfície específica e a espessura de CAP residual adotada para envolvê-lo (módulo de riqueza).

A conclusão do estudo envolveu a análise de 290 testes, destacando a eficiência do procedimento da "frente úmida" para reabsorção de água, que se mostrou mais próximo das condições de campo. No entanto, o ensaio de módulo de resiliência não foi considerado adequado para definir a melhor composição solo-água-emulsão, devido à complexidade e custos envolvidos. Ainda assim, a realização desses ensaios pode ser útil para refinar e compreender melhor a mistura solo-emulsão.

O procedimento da "frente úmida" mencionado na tese consiste em uma etapa de cura dos corpos de prova de solo-emulsão após a compactação, onde os corpos de prova são expostos a um ambiente úmido para simular condições mais próximas do que ocorre em campo. Esse procedimento é realizado da seguinte forma:

Após a compactação dos corpos de prova de solo-emulsão, eles são colocados em um ambiente úmido por um período determinado, geralmente após a cura inicial em condições controladas de laboratório.

A exposição à umidade durante a "frente úmida" permite que os corpos de prova readquiram umidade de forma mais natural, contribuindo para a evolução das propriedades da mistura ao longo do tempo.

Dois trechos experimentais foram conduzidos, fornecendo insights valiosos sobre a aplicação da mistura solo-emulsão como revestimento. Levantamentos defletoométricos antes e depois das obras auxiliaram no entendimento das deflexões recuperáveis das camadas de pavimento. Além disso, a avaliação da superfície de um dos trechos construídos concluiu pelo bom estado geral após quase dois anos em serviço.

Na tese desenvolvida pela pesquisadora Silveira (2020), intitulada “Contribuição para Utilização de Rejeito de Mineração de Ferro em Pavimentação Asfáltica com Foco em Técnicas de Baixo Custo”, a emulsão desempenha um papel fundamental neste estudo sobre a utilização do rejeito de mineração de ferro em pavimentação asfáltica. A emulsão é utilizada como agente aglutinante, conferindo coesão aos grãos do rejeito e possibilitando a formação de misturas estáveis para aplicação em pavimentos de baixo custo.

A escolha adequada do tipo de emulsão e do teor a ser aplicado foi resultado de ensaios exploratórios, garantindo que a emulsão atuasse de forma eficaz na estabilização do rejeito. Diferentes teores de emulsão foram testados com base em estudos anteriores, considerando não apenas a eficiência do processo, mas também a viabilidade econômica.

a preparação das misturas e confecção dos corpos de prova, seguiram os seguintes passos:

- Despeja-se o rejeito seco (seco em estufa a 60°C por 24 horas) sobre uma bandeja,
- Para a obtenção de uma mistura homogênea, anteriormente à adição da emulsão, aplica-se a água de dispersão ao rejeito, evitando uma ruptura prematura da emulsão ao entrar em contato com o rejeito completamente seco;
- Promove-se a mistura manual do rejeito e a água de dispersão;
- Adiciona-se a água de diluição à emulsão asfáltica, pois devido à sua viscosidade, a emulsão asfáltica pura encontra grande dificuldade em se dispersar no material a ser estabilizado. Neste trabalho foi utilizada a relação 1:1 de água de diluição e emulsão asfáltica;
- Aplica-se a emulsão diluída ao rejeito umedecido;
- Procede-se uma homogeneização manual inicial da mistura;
- Submete-se esse material à ação de um misturador mecânico, a fim de se obter uma mistura mais homogênea.

Além disso, a adição da emulsão às misturas de rejeito e solo local contribui para a criação de uma base de dados mais consistente, permitindo uma análise mais criteriosa dos materiais empregados no estudo.

Foram realizados ensaios de Módulo de Resiliência, utilizados para avaliar o comportamento resiliente das misturas de rejeito e emulsão, bem como para determinar o teor de emulsão "ótimo" nas misturas. Ensaios de estabilização granulométrica, resistência ao desgaste (LWT e WTAT) e Ensaios de MEV/EDS.

Portanto, a utilização da emulsão neste estudo possibilita a transformação do rejeito de mineração de ferro em um material adequado para pavimentação, agregando valor ao rejeito e contribuindo para a sustentabilidade ambiental e para o desenvolvimento de técnicas de pavimentação de baixo custo.

O estudo das misturas rejeito-emulsão envolveu a variação do teor de emulsão RL-1C e o tempo e modo de cura. Os resultados obtidos mostraram que com o aumento do teor de emulsão, houve melhoria na rigidez das misturas, atingindo o pico de 282 no ensaio de módulo de resiliência (MR) com 6% de emulsão, sem adição de solo. A mistura com 2% de emulsão e 10% de solo também apresentou altos valores no MR, devido à melhor distribuição granulométrica e à ação do solo nas misturas.

Quanto ao tempo e modo de cura, foram testadas a secagem em estufa por 48 horas a 40°C e ao ar livre por 7 dias e 28 dias. O modo de cura em estufa mostrou-se mais eficiente, pois simulou a ação do campo e os resultados encontrados nos corpos de prova curados em estufa foram superiores para os mesmos teores, quando comparados à cura ao ar livre, mesmo após 28 dias.

A diferença entre os valores encontrados nos ensaios de módulo de resiliência para cura ao ar livre e cura em estufa, pode ser atribuída aos danos causados aos corpos de prova durante sua movimentação no processo de secagem, além de terem ocorrido períodos chuvosos e de baixa temperatura que levaram a ruptura incompleta da emulsão no interior do corpo de prova.

Os ensaios de módulo de resiliência comprovaram que a adição de emulsão asfáltica ao rejeito não provoca melhorias de forma imediata. Com a cura, havendo iniciado o processo de ruptura da emulsão e devido aos efeitos da secagem, obtém-se melhorias consideráveis nos valores de módulo de resiliência.

Os ensaios de MEV realizados em pequenas amostras retiradas dos corpos de prova utilizados para o ensaio de MR, comprovaram que a adição e o incremento da emulsão ao rejeito levam a maior coesão dos grãos, conseqüentemente maior rigidez e elevados valores de módulo.

Em suma, o efeito positivo da emulsão variou de acordo com o tipo de solo e o tipo de ensaio realizado. A estabilização com emulsão asfáltica melhorou a capacidade de suporte e impermeabilidade dos solos, destacando-se sua eficácia na estabilização, levando em consideração os ensaios realizados. A cura úmida pode prejudicar o comportamento resiliente da mistura, sendo importante considerar outros métodos de cura que possam proporcionar melhores propriedades mecânicas e durabilidade à mistura. A impermeabilização do solo não teve igual relevância em diferentes teores de emulsão residual, sugerindo que a definição do teor de projeto pode ser mais associada à melhoria buscada com a estabilização. A estabilização de solos com emulsão mostrou bom potencial de aplicação, variando de acordo com o tipo de solo e necessitando análise detalhada antes da definição do teor de projeto.

## **2.6 Estudos internacionais sobre o uso de emulsão asfáltica**

De acordo com os resultados apresentados no estudo de Brito et al. (2022), em misturas solo-emulsão testadas em condições saturadas, não houve influência do tempo de cura nos resultados obtidos. No entanto, em misturas testadas em condições insaturadas, foi observado que um aumento no tempo de cura levou a um aumento significativo no intercepto coesivo das envoltórias de ruptura obtidas nos testes triaxiais não drenados a volume constante (CIU). Esse aumento no intercepto coesivo foi atribuído ao aumento da sucção matricial devido à evaporação da água de constituição da emulsão asfáltica durante a exposição dos espécimes ao ar ambiente a 25°C pelos períodos de cura adotados no estudo.

O estudo de Orosa et al. (2022) investigou as propriedades de cisalhamento e deformação permanente de misturas recicladas a frio no local (CIR) com emulsão asfáltica usando testes triaxiais. Os autores descobriram que o teor de ligante teve um impacto significativo nas propriedades de cisalhamento e deformação permanente das misturas CIR. Misturas com teores de ligante mais altos exibiram maior coesão, mas menor atrito interno. Os autores também encontraram que as misturas CIR exibiram razões de estresse crítico entre 20% e 30%. A mistura com teor de ligante de 2,50% apresentou a melhor resposta.

Quanto ao uso de emulsões, Andavam e Kumar (2020) concluíram em seu artigo de revisão que as emulsões asfálticas são um material eficaz para melhorar as propriedades de solos fracos, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. Os autores afirmaram que as emulsões asfálticas oferecem vantagens como facilidade de aplicação, baixo consumo de energia, impacto ambiental reduzido e maior durabilidade do pavimento. Eles também destacaram desafios e limitações no uso de emulsões asfálticas, como a necessidade de controle de qualidade, dosagem adequada e seleção do tipo de emulsão, influência das condições climáticas e a falta de normas e especificações padronizadas.

Kamran et al. (2020) avaliaram o uso potencial de asfaltenos como material de resíduos para melhorar as propriedades mecânicas de misturas de base estabilizadas com asfalto emulsionado. O estudo usou asfaltenos como material de resíduos derivado das areias asfálticas de Alberta. Eles adicionaram de 1% a 3% de asfaltenos em peso total a uma mistura de agregados estabilizada com asfalto emulsionado. Os resultados mostraram que as misturas modificadas com asfaltenos tiveram maior resistência à tração e resistência ao fluxo, enquanto sua suscetibilidade à umidade foi ligeiramente menor do que a da mistura de controle. O estudo utilizou diferentes percentagens de emulsão asfáltica para determinar o teor ótimo de emulsão em relação à estabilidade Marshall e ao fluxo.

O estudo de Oluyemi-Ayibiowu (2019) concluiu que a adição de emulsão asfáltica pode melhorar significativamente as propriedades mecânicas de solos lateríticos, como resistência à compressão não confinada (UCS) e Índice de Suporte Califórnia (CBR). A proporção ideal de emulsão asfáltica varia dependendo das propriedades do solo, mas geralmente fica entre 4% e 6%. No entanto, a estabilização com emulsão asfáltica pode não ser eficaz em solos com alto teor de argila.

Os estudos de Alizadeh A e Modarres A (2018) investigaram as propriedades mecânicas de solo argiloso estabilizado com emulsão de betume e calcário, usando testes de compressão não confinada, testes de tração indireta, testes de módulo resiliente e testes de deformação permanente. Os autores chegaram a um teor ótimo de emulsão de 6% e um teor ótimo de calcário de 10% para alcançar máxima resistência e rigidez do solo. Observou-se que o solo estabilizado apresentava menor plasticidade, maior durabilidade e melhor resistência a danos relacionados à umidade em comparação com o solo não tratado. Eles concluíram que o solo argiloso estabilizado com emulsão e calcário poderia ser usado como material adequado para camadas de subleito ou base de pavimentos.

Com base no estudo de Bunga, E (2018), a taxa de erosão de argila arenosa estabilizada com emulsão asfáltica está sujeita a diferentes influências, como observado nos parâmetros testados. A análise dos resultados indicou que a taxa de erosão aumentou exponencialmente com o aumento da intensidade da chuva e linearmente com o aumento da inclinação. No entanto, a taxa de erosão diminuiu exponencialmente com o aumento do volume de emulsão asfáltica. Portanto, a aplicação de emulsão asfáltica pode ter um efeito estabilizador significativo na erosão do solo, especialmente quando confrontada com fatores como intensidade da chuva e inclinação. Essa conclusão poderia ter implicações práticas para o gerenciamento e controle da erosão em áreas onde a estabilização do solo é uma preocupação, como falhas de drenagem.

O estudo de Baghini, Ismail e Karim (2015) avaliou os fatores que afetam o desempenho de curto e longo prazo de uma base tratada com cimento e emulsão de betume por meio de testes laboratoriais para determinar sua resistência à compressão não confinada (UCS), resistência à flexão (FS) e Índice de Suporte Califórnia (CBR). O estudo também investigou a durabilidade da base tratada com cimento e emulsão de betume submetida a ciclos de umedecimento e secagem (WD) e desenvolveu modelos significativos para demonstrar a relação entre as características da mistura. Em relação aos resultados dos testes de deformação permanente, a adição de uma mistura de 4% de cimento Portland e 3% de emulsão de betume reduziu a deformação permanente em 23,5% em comparação com o uso apenas de cimento e em 1682% em comparação com o uso apenas de emulsão de betume. Além disso, os resultados mostraram que a mistura de cimento Portland e emulsão de betume melhorou significativamente a resistência à deformação permanente da mistura em diferentes temperaturas ambientais.

Como a emulsão é um material de fácil manuseio e oferece inúmeras vantagens em sua aplicação, os pesquisadores buscam aperfeiçoar a técnica para usar emulsão asfáltica na estabilização do solo, o que é uma contribuição importante deste estudo, como mencionado na introdução. No entanto, como visto, ainda há muito a ser feito na busca pela padronização do método de dosagem, testes e normas a serem seguidas.

Em geral, esses estudos mostram que a estabilização do solo com emulsão asfáltica pode melhorar diversas propriedades mecânicas do solo e suas misturas, contribuindo para a durabilidade e desempenho dos pavimentos. No entanto, ainda há desafios a serem enfrentados, como a padronização de métodos de dosagem, testes e normas a serem seguidas.

## 2.7 Módulo resiliente

A solicitação dinâmica dos pavimentos e do subleito sujeitos a cargas de diferentes intensidades e frequências variáveis ao longo do dia e do ano é de simulação difícil. Pois ensaios de carga repetida em que a força aplicada atua sempre no mesmo sentido de compressão de 0 ao máximo e depois diminui até anular-se ou atingir um patamar inferior. Para atuar novamente após pequeno intervalo de repouso, procura reproduzir as condições de campo. A amplitude, o tempo de pulso depende da velocidade do veículo e da profundidade em que se calcula as tensões, deformações produzidas. Embora os termos ensaio de carga repetida e ensaio dinâmico não sejam conceitualmente idênticos, por força da prática se confundem. Os ensaios de compressão triaxial a cargas repetidas de solos e britas são de aceitação geral (Medina e Motta, 2015).

Ainda segundo autores, o estado de tensões no elemento do subleito ou de camada do pavimento varia com a posição da carga P móvel. Quando a carga está verticalmente acima do elemento, tem-se as tensões normais principais, horizontais,  $\sigma_3$  igual a  $\sigma_h$  e vertical  $\sigma_1$  igual a  $\sigma_v$ . O ensaio triaxial é feito, usualmente, com a tensão confinante  $\sigma_3$  constante e  $\sigma_1$  variável. Tem-se então a expressão da equação 1:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_d. \quad \text{Eq. 1}$$

Onde,  $\sigma_d$  é a tensão desvio variável.

O ensaio triaxial de cargas repetidas foi introduzida nos estudos de pavimentação pelo professor H Bolton Seed, na década de 1950, na universidade da Califórnia, Berkeley, quando da investigação da deformabilidade do solo do subleito da pista experimental da AASHO.

A Figura 1:detalha a variação de tensões cisalhantes que se anulam quando a carga está verticalmente acima do ponto vertical considerado. É possível ver, também, a rotação dos planos principais com a posição da carga P. Em planos inclinados, em relação ao plano principal horizontal, tem-se tensões solicitantes, cujos valores podem ser determinados pelo círculo de Mohr.

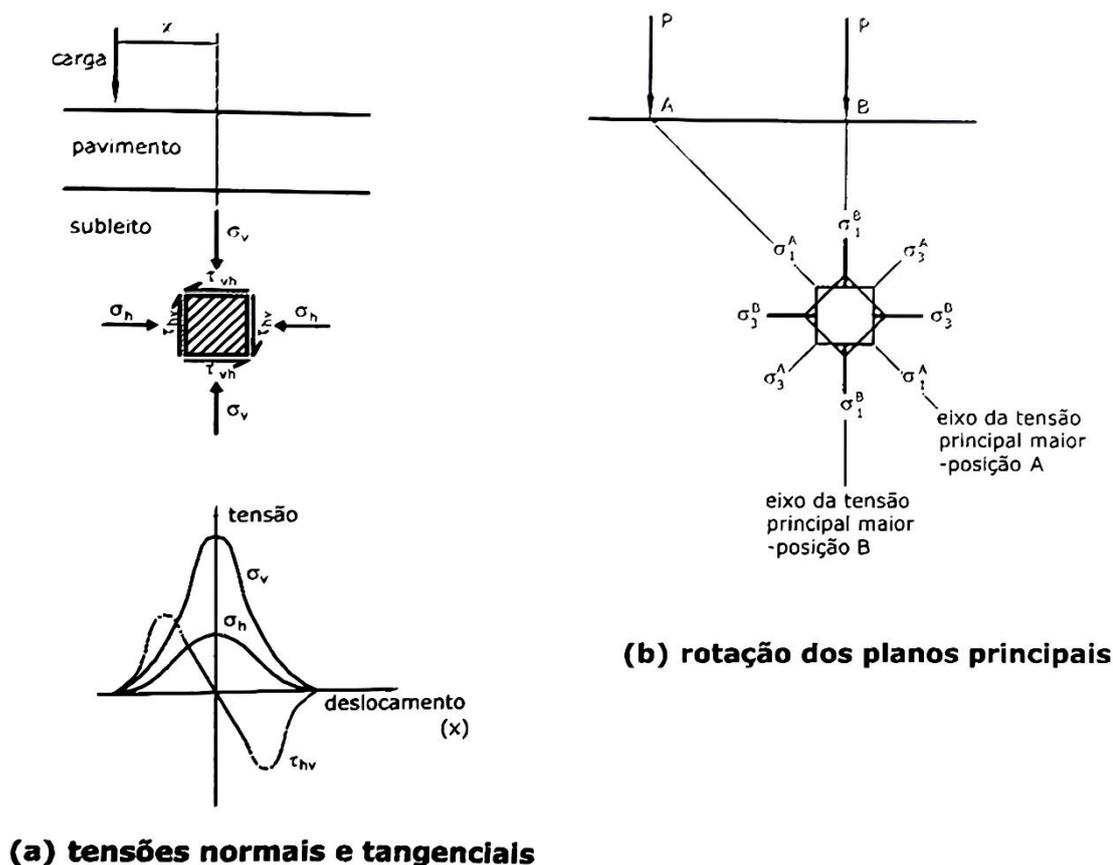


Figura 1: Variação das tensões cisalhantes sobre ponto e rotação dos planos principais

Fonte: Medina e Motta (2015, pág. 181)

Um ensaio triaxial de cargas repetidas do solo é um procedimento de laboratório usado para estudar o comportamento mecânico de solos sob condições de carregamento cíclico ou repetido. Este ensaio é frequentemente realizado para avaliar a estabilidade de estruturas construídas sobre solos ou para entender melhor como os solos e outros materiais reagem a carregamentos dinâmicos, como os causados por terremotos ou tráfego de veículos.

O ensaio triaxial de cargas repetidas é uma extensão do ensaio triaxial estático, sendo uma amostra de solo é submetida a uma série de ciclos de carga e descarga. Durante o ensaio, a amostra de solo é confinada lateralmente e aplicam-se cargas axiais em padrões repetidos. Isso pode simular condições dinâmicas reais às quais o solo pode ser submetido ao longo do tempo.

Hoje, ensaios drenados são comumente usados por simularem as condições de campo que devem ocorrer num pavimento bem construído. No entanto, como os materiais costumam ser ensaiados parcialmente saturados, por ser a condição de umidade de equilíbrio mais frequente utilizado no Brasil, especialmente em rodovias de alto volume de tráfego, é difícil

medir a pressão negativa da água (poropressão) nos poros, no atual estágio dos laboratórios que permitiria trabalhar com tensões efetivas corrigidas. Assim, na prática comum dos laboratórios os resultados do ensaio triaxial de módulo de resiliência são expressos em termos de tensões totais.

Tratando especificamente da resposta resiliente do ensaio triaxial, define-se como módulo resiliente (MR) a seguinte relação:

$$MR = \frac{\sigma_d}{\varepsilon_1} \quad \text{Eq. 2}$$

Sendo  $\sigma_d$  é a tensão desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) e  $\varepsilon_1$  ou  $\varepsilon_r$  é a deformação resiliente axial, sendo:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta_h}{h_0} \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo,  $\Delta_h$  é o deslocamento vertical resiliente máximo e  $h_0$  a altura inicial de referência descontado o deslocamento plástico.

Sendo  $\varepsilon_t = \varepsilon_r + \varepsilon_p$

Sendo,  $\varepsilon_t$  é a deformação total e  $\varepsilon_p$  a deformação plástica não recuperável.

Diversos modelos foram desenvolvidos para prever o módulo resiliente de solos grossos, baseados nos estados de tensões e nas propriedades físicas e mecânicas do solo (ZHANG; PENG; ZENG; LI; LI, 2021; ZHANG; PENG; LIU; LU, 2021; HANANDEH; ARDAH; ABU-FARSAKH, 2020). Neste estudo, os autores utilizaram quatro modelos principais baseados no estado de tensão do solo. Um dos modelos mais conhecidos é o desenvolvido por Hicks e Monismith (1970) apud Tamošiūnas; Skuodis, (2023), também conhecido como modelo K- $\theta$ , apresentado a seguir

$$MR = K1 * (\theta)^{K2} \quad \text{Eq. 4}$$

Sendo K1 e K2 são parâmetros de ajuste ou coeficientes de regressão, e  $\theta$  é a soma das tensões principais, em que:

$$\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3 \quad \text{Eq. 5}$$

Outro modelo amplamente utilizado é o desenvolvido por Rahim e George (2005), que incorpora tensão axial ou principal ( $\sigma_1$ ) e pressão atmosférica ( $P_a$ ) na equação:

$$Mr = K_1 P_a \left( \frac{\theta}{(\sigma_d + 1)} + 1 \right)^{k_2} \quad \text{Eq. 6}$$

Uzan (1985) apud Tamošiūnas; Skuodis, (2023), e Ni et al. (2020) propôs um modelo que incorpora tensões de cisalhamento octaédricas. Vale ressaltar que este modelo é utilizado no *software* MEPDG.

$$Mr = K_1 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} \right)^{k_3} \quad \text{Eq. 7}$$

A tensão de cisalhamento octaédrica ( $\tau_{oct}$ ) igual a  $\sqrt{(2/3)(\sigma_1 - \sigma_3)}$  e  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  parâmetros de ajuste ou coeficientes de regressão. Semelhante ao modelo de Uzan é o modelo Universal Witzcak.

$$Mr = K_1 P_a \left( \frac{\theta}{P_a} \right)^{k_2} \left( \frac{\tau_{oct}}{P_a} + 1 \right)^{k_3} \quad \text{Eq. 8}$$

Macedo (1996) mostrou que, do ponto de vista estatístico, é mais aceitável o modelo conhecido como composto.

$$Mr = K_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \quad \text{Eq. 9}$$

A equação de Lee et al. (1997) relaciona o módulo resiliente (MR) com a resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ) do solo, sugerindo que o MR pode ser modelado como uma função da  $S_u$  ao nível de 1%, representando uma abordagem específica para solos coesivos.

$$Mr = a S_{u1\%} \quad \text{Eq. 10}$$

Parreira et al. (1998) equações (12) e (13) oferecem diferentes formas de modelar o MR com base em variáveis como o módulo inicial ( $E_0$ ), a tensão desvio ( $\sigma_d$ ), e a pressão média ( $\theta$ ). A primeira formulação (equação 12) descreve uma relação complexa em que o MR é influenciado por potências específicas dessas variáveis. A segunda formulação (equação 13)

refina o modelo ao incluir termos adicionais para capturar a influência da pressão média e do módulo inicial, adaptando-se a diferentes condições de material.

$$Mr = 4,5231 E_0^{-0,3436} \sigma_d^{k_3} \theta^{0,4393} \quad \text{Eq. 11}$$

$$Mr = 0,8481 E_0^{0,4559} \sigma_d^{k_3} 1,1472 \theta^{0,8630} \quad \text{Eq. 12}$$

A equação desenvolvida por Franco (2007) utiliza uma abordagem em que o MR é modelado como uma função das tensões confinantes ( $\sigma_3$ ), tensão desvio ( $\sigma_d$ ), e pressão média ( $\theta$ ). Os coeficientes específicos ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ , e  $k_4$ ) permitem ajustar o modelo à resposta observada em diferentes tipos de solos, especialmente aqueles classificados como arenosos.

$$Mr = K_1 \sigma_3^{k_2} \sigma_d^{k_3} \theta^{k_4} \quad \text{Eq. 13}$$

O módulo de resiliência vem sendo utilizado nas análises mecânicas, pois representa melhor o comportamento da estrutura dos pavimentos, sendo este associado as rachaduras ocasionadas no pavimento. Portanto, para realização de análises estruturais de pavimentos mais precisas, a partir do  $M_R$ , é necessário verificar quais os modelos mais apropriados para representar o comportamento resiliente.

## 2.8 Deformação Permanente em múltiplos estágios

O artigo de Medeiros, Cardoso e Silva (2024) avaliou a resposta mecânica do solo estabilizado com cimento asfáltico de petróleo utilizando emulsão asfáltica sob carga de múltiplos estágios. O objetivo principal era investigar como a estabilização do solo com emulsão asfáltica influencia as propriedades mecânicas, incluindo as respostas resilientes e plásticas do solo. Além disso, o estudo buscou avaliar a influência do filme asfáltico na estabilização do solo e padronizar a dosagem de emulsão asfáltica para otimizar o processo de estabilização. A metodologia incluiu o uso de carregamento multiestágio com diferentes pares de tensão para caracterizar o comportamento do solo sob condições variáveis de carga.

A contribuição do carregamento multiestágio neste estudo é essencial para avaliar a resposta mecânica do solo estabilizado com emulsão asfáltica sob diferentes níveis de estresse. O carregamento multiestágio permite a avaliação do comportamento do solo em diferentes níveis de tensão, o que é crucial para compreender como o material se comporta sob condições

variáveis de carga, como as encontradas em pavimentos. Os pares de tensão utilizados no estudo foram:  $\sigma_c = 40 \text{ kPa}$  e  $\sigma_d = 140 \text{ kPa}$ ;  $\sigma_c = 40 \text{ kPa}$  e  $\sigma_d = 220 \text{ kPa}$ ;  $\sigma_c = 40 \text{ kPa}$  e  $\sigma_d = 300 \text{ kPa}$ ;  $\sigma_c = 40 \text{ kPa}$  e  $\sigma_d = 380 \text{ kPa}$ ; e  $\sigma_c = 40 \text{ kPa}$  e  $\sigma_d = 460 \text{ kPa}$ .

Esses pares de tensão foram aplicados em cada estágio do teste de carregamento multiestágio, envolvendo 10.000 repetições. Essa abordagem permitiu avaliar o comportamento do solo estabilizado com emulsão asfáltica em diferentes níveis de tensão, contribuindo para uma melhor compreensão de como o material responde a condições variáveis de carga.

Os resultados do estudo mostraram que a estabilização do solo com emulsão asfáltica resultou em um aumento nas deformações plásticas em comparação com o solo natural. Conforme a tensão cisalhante foi aumentado em cada ciclo de carregamento, as amostras estabilizadas apresentaram um aumento nas deformações plásticas em relação ao solo natural. Houve também um aumento proporcional na região resiliente, indicando que a adição de asfalto tornou o solo menos rígido, mas proporcionou coesão que estava ausente antes da estabilização. O carregamento multiestágio permitiu uma análise detalhada das regiões elásticas e plásticas do solo e do solo estabilizado em um único teste, fornecendo uma interpretação mais precisa do comportamento do material sob diferentes níveis de tensão.

A pesquisa de Yaghoubi et al. (2023) teve como objetivo avaliar a resposta de deformação permanente de agregados reciclados de concreto (RCA) e de resíduos de construção e demolição (CB) estabilizados com uma emulsão betuminosa aniônica sob diferentes faixas de carregamento cíclico. Foram realizados uma série de testes triaxiais de carga repetida em vários estágios (RLT) em cinco combinações distintas de estresse de confinamento e estresse desviador nas misturas para avaliar a deformação permanente das amostras, considerando sua utilização como camadas de base de pavimentos, conforme pode ser visualizado Figura 2. Esse regime de carregamento foi escolhido para aumentar a probabilidade de extrair todas as três faixas de classificação de *shakedown*. Ao analisar os resultados, as misturas puderam ser classificadas com base na teoria de *shakedown* para permitir a adoção de emulsão betuminosa para a estabilização de resíduos de construção e demolição. Este estudo adota uma abordagem inovadora de estabilização de agregados de resíduos de construção e demolição como um passo em direção à sustentabilidade no projeto e construção de infraestruturas de transporte. Isso é alcançado pela melhoria das propriedades dos agregados reciclados para torná-los uma alternativa adequada aos preciosos agregados virgens usados nas camadas estruturais de pavimentos.

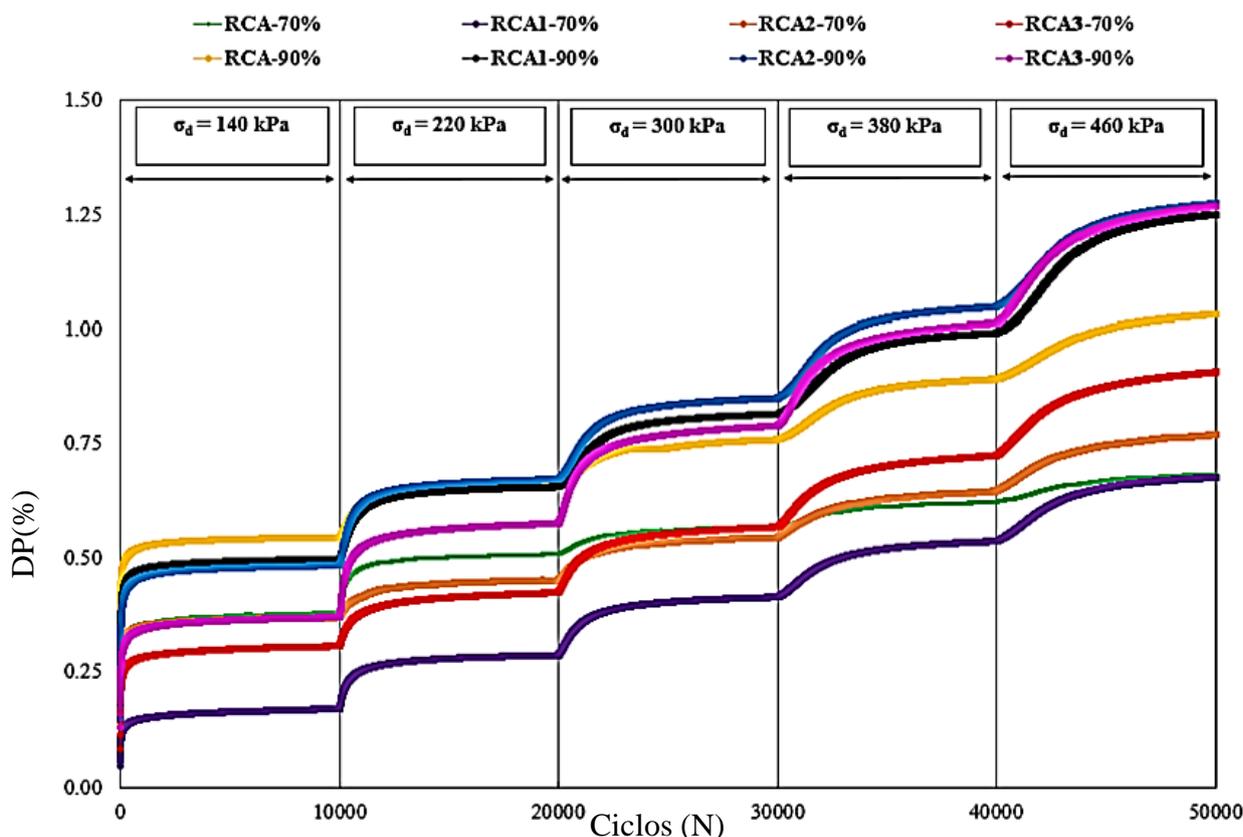


Figura 2: Respostas de deformação permanente (%) de misturas de CB em função do número de ciclos de carga

Fonte: Adaptado de (YAGHOUBI et al; 2023)

Observa-se que no primeiro estágio de carregamento ( $\sigma_d = 140$  kPa), as curvas de deformação não seguem um padrão bem definido. Isso pode indicar que os materiais ainda estão se ajustando ao processo de compactação, o que pode incluir redistribuição interna das partículas, realocação de vazios e outras mudanças estruturais que ocorrem antes que o comportamento mecânico estável seja estabelecido.

Para os materiais com 70% da umidade ótima (linhas com cores mais claras), a deformação tende a ser menor em comparação com os materiais com 90% da umidade ótima (linhas com cores mais escuras) em quase todos os níveis de tensão desvio. Isso sugere que, a umidade mais alta pode estar contribuindo para uma maior susceptibilidade à deformação, possivelmente devido à redução da resistência interna e à maior lubrificação entre as partículas, bem como o prejuízo à cura da emulsão.

Notavelmente, as curvas dos materiais com 90% de umidade apresentam uma maior taxa de deformação ao longo do tempo, especialmente em níveis de tensão desvio mais altos

( $\sigma_d = 380$  kPa e  $\sigma_d = 460$  kPa). Isso indica que a condição de umidade mais alta pode levar a um comportamento mais plástico e menos resistente ao carregamento.

As curvas do controle (sem emulsão) para ambas as umidades (70% e 90%) mostram uma deformação acumulada relativamente menor em comparação com as misturas com emulsão (RCA1, RCA2, RCA3). Isso indica que a adição de emulsão aumentou a deformação dos materiais sob as condições testadas.

À medida que o teor de emulsão aumenta, as deformações acumuladas tendem a ser maiores do que as observadas para o controle, especialmente em altas tensões desvios. Este comportamento sugere que a emulsão, em vez de aumentar a resistência, pode estar contribuindo para um aumento na deformação dos corpos de prova.

Após o primeiro estágio de carregamento, as curvas começam a se estabilizar em termos de tendência, indicando que o material alcançou uma condição mais uniforme de deformação plástica, a resposta é mais previsível e menos influenciada por efeitos iniciais de compactação. Além disso, a combinação entre alto percentual de umidade e alto percentual de emulsão prejudicaram o desempenho dos materiais ensaiado.

Neste estudo, foram utilizados cinco pares distintos de tensões de confinamento e tensões desviadoras para realizar os testes triaxiais de carga repetida em vários estágios (RLT), considerando que os materiais seriam utilizados na camada de base de um pavimento rodoviário. Os pares de tensões utilizados podem ser conferidos:

Tabela 1: Relação entre as tensões solicitantes de (YAGHOUBI et al; 2023)

Estágio	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_d$	$\sigma_d / \sigma_3$
1	180	40	140	3,5
2	260	40	220	5,5
3	340	40	300	7,5
4	420	40	380	9,5
5	500	40	460	11,5

Além disso, de acordo com a pesquisa realizada pelos autores mencionados anteriormente, amostras de agregados foram misturadas com uma emulsão de betume catiônico de ruptura lenta em diferentes percentagens de 0, 1, 2 e 3% do peso seco dos agregados. O estudo concluiu que a estabilização com emulsão betuminosa não teve efeito perceptível na melhoria das respostas de deformação permanente de concreto reciclado e misturas de agregados de tijolo triturado. Finalmente, a contribuição do carregamento em estágios múltiplos foi a capacidade de classificar as misturas e avaliar sua deformação permanente em diferentes níveis de estresse.

Maghool et al. (2023) usaram diferentes pares de tensões no estudo, que foram aplicados em combinações de tensão de confinamento ( $\sigma_c$ ) e tensão desviadora ( $\sigma_d$ ). Os pares de tensões usados foram:  $\sigma_c = 40$  kPa e  $\sigma_d = 140$  kPa,  $\sigma_c = 40$  kPa e  $\sigma_d = 220$  kPa,  $\sigma_c = 40$  kPa e  $\sigma_d = 300$  kPa,  $\sigma_c = 40$  kPa e  $\sigma_d = 380$  kPa e  $\sigma_c = 40$  kPa e  $\sigma_d = 460$  kPa. Esses pares de tensões foram aplicados em cada estágio do teste em estágios múltiplos, envolvendo 10.000 repetições. A contribuição do carregamento em estágios múltiplos é permitir a avaliação do comportamento da mistura sob diferentes níveis de estresse, o que ajuda a entender melhor como as misturas se comportam sob condições de carga variável. Isso é importante para avaliar a adequação das misturas para uso em pavimentos, em que as condições de carga podem variar ao longo do tempo.

O objetivo deste estudo, conduzido por Barbieri et al. (2023), foi investigar e comparar o potencial de estabilização de ligantes tradicionais e não tradicionais usados na engenharia de pavimentos rodoviários. O carregamento em estágios múltiplos foi empregado em um dos testes laboratoriais conduzidos neste estudo para avaliar a resistência de agregados rochosos estabilizados com diferentes tipos de ligantes a cargas repetidas. Este teste foi conduzido tanto antes quanto após 10 ciclos de ação de congelamento e descongelamento. A contribuição do carregamento em estágios múltiplos foi avaliar a resistência de agregados estabilizados a cargas repetidas, o que é crucial para avaliar a durabilidade e a vida útil dos pavimentos rodoviários. O carregamento em estágios múltiplos foi realizado seguindo o procedimento de Baixo Nível de Estresse em Estágios Múltiplos (MS LSL), consistindo em trinta sequências de carregamento conforme definido em (EN 13286-7, 2004).

Ghorbani et al. (2023) estudaram o uso potencial de energia geotérmica para aquecimento e resfriamento de pavimentos para reduzir o consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa. Este teste foi empregado para avaliar a capacidade de suporte de carga de materiais granulares não ligados, que são frequentemente utilizados como camadas de base em pavimentos. O teste de carregamento em estágios múltiplos permitiu a avaliação da deformação e recuperação de materiais granulares sob diferentes níveis de carga, essencial para o projeto de pavimentos duráveis e seguros. O procedimento de carregamento em estágios múltiplos utilizou uma tensão de confinamento constante de 50 kPa e tensões desviadoras iguais a 250 kPa, 350 kPa e 450 kPa, aplicadas às amostras de acordo com o método de teste triaxial de carga repetida da Austroads AG:PT/T053.

Os autores Wang et al. (2023) investigaram o comportamento de deformação permanente e resiliente de três tipos de agregados de concreto reciclado (RCR) de diferentes

fontes: edifícios demolidos (RCRB1 e RCRB2) e pavimento de concreto (RCRP). A contribuição do teste em estágios múltiplos foi avaliar o comportamento do material sob diferentes níveis de estresse e ciclos de carga, permitindo a análise da deformação permanente e resiliente sob várias condições de carga. Isso proporcionou uma melhor compreensão do desempenho do material sob condições reais de tráfego e ajudou a avaliar sua adequação para uso em base e sub-base de estradas. Testes Triaxiais de Carga Repetida (RLTT) representam um método significativo para investigar o comportamento de deformação permanente e resiliente de Materiais Granulares Não Ligados (MGNL) sob cargas de tráfego. Neste estudo, RLTTs foram conduzidos seguindo o procedimento delineado na Norma Europeia (EN 13286-7, 2004).

A técnica de carregamento em estágios múltiplos foi empregada no estudo de Medeiros et al. (2023) para examinar como a umidade afeta a deformação permanente em solos tropicais, usando quatro ciclos de carregamento diferentes. Os resultados revelaram que a deformação permanente aumenta à medida que a umidade aumenta, sendo este efeito mais pronunciado em solos arenosos e argilosos em comparação com o solo laterítico. Além de fornecer insights específicos para esta pesquisa, o método em estágios múltiplos surge como uma ferramenta eficaz para explorar o comportamento de materiais sujeitos a várias condições de carga. Ele pode ser aplicado para investigar a influência de fatores como umidade, temperatura, confinamento e história de carregamento, contribuindo assim para avanços na compreensão da resposta mecânica de diferentes materiais.

Arulrajah et al. (2022) aplicaram a técnica de carregamento em estágios múltiplos para estudar pavimentos geotérmicos em sua pesquisa. Um pavimento geotérmico é um tipo de pavimento que utiliza a energia térmica do solo para aquecer ou resfriar edifícios. Esse tipo de pavimento consiste em uma camada de base, que é instalada abaixo da superfície do pavimento, e uma série de tubos enterrados nesta camada. Água ou outro fluido circula pelos tubos, absorvendo calor do solo durante o inverno e transferindo-o para o prédio para aquecimento. A contribuição do carregamento em estágios múltiplos foi fornecer uma compreensão abrangente do comportamento mecânico de diferentes materiais sob vários níveis de estresse. Essa compreensão é considerada essencial para projetar sistemas de pavimentação mais sustentáveis. Tensões na proporção ( $\sigma_d/\sigma_c$ ) de 2, 4, 6 e 8 foram aplicadas para caracterizar o comportamento de deformação de tijolo triturado (CB) e agregado de concreto reciclado (RCA) no teste em estágios múltiplos.

O objetivo do estudo de Ghorbani et al. (2021) foi investigar as propriedades de deformação de misturas de RCA misturadas com vidro reciclado (RG) para aplicações de base de pavimento. O estudo empregou análise experimental e modelagem por rede neural artificial para a caracterização dinâmica de misturas de RCA/RG. Um teste de carregamento em estágios múltiplos foi usado para avaliar o comportamento de deformação permanente de misturas de RCA/RG. A contribuição do teste em estágios múltiplos foi permitir a avaliação do comportamento da mistura em diferentes níveis de tensão desviadora, o que foi crucial para entender o desempenho da mistura sob condições reais de tráfego.

O estudo de Lin et al. (2017) utilizou tensões de confinamento e desvios ou solicitantes com base em condições de campo típicas para solos de subleito. A tensão de confinamento foi escolhida para representar a pressão vertical exercida pelo peso da camada de solo acima do subleito, enquanto a tensão desviadora ou solicitante foi escolhida para representar a carga aplicada pelos pneus dos veículos na superfície do pavimento. Essas tensões foram escolhidas para simular as condições de carga realistas que os solos de subleito experimentam no campo e, portanto, fornecer informações mais relevantes sobre o comportamento de deformação plástica acumulada sob condições de campo.

O estudo empregou diferentes amplitudes de estresse dinâmico para carregamento cíclico, variando de 25 kPa a 114 kPa, dependendo do grupo de amostras testadas. Além disso, diferentes níveis de pressão de confinamento foram aplicados, variando de 60 kPa a 150 kPa, dependendo do grupo de amostras testadas. O estudo empregou o carregamento em estágios múltiplos para caracterizar o comportamento da deformação plástica acumulada em diferentes fases de carregamento.

O objetivo geral do estudo de Salour e Erlingsson (2017) foi investigar a aplicabilidade do uso de testes RLT em estágios múltiplos para modelar a deformação permanente de solos de subleito de grãos finos. Segundo os autores, a contribuição do teste em estágios múltiplos é permitir uma simulação mais realista das condições de carga de tráfego no campo, que geralmente envolvem pulsos de carga com magnitudes variadas. Além disso, o teste em estágios múltiplos pode fornecer uma compreensão mais abrangente do comportamento do pavimento sem a necessidade de preparar e testar múltiplas amostras, o que pode ser tedioso e custoso. O procedimento do teste de carregamento em estágios múltiplos envolveu a condução de três sequências de carregamento, cada uma contendo três ciclos de estresse com uma pressão de confinamento constante e diferentes tensões desviadoras (totalizando 9 caminhos de estresse). Em cada caminho de estresse, foram aplicados 10.000 ciclos de carga, seguidos pelo

subsequente caminho de estresse (totalizando 90.000 aplicações de carga). Cada pulso de carga consistiu em uma carga de 0,2 segundos seguida por um período de descanso de 0,4 segundos. Uma pressão de contato constante de 5,5 kPa foi sempre usada entre os pulsos de carga.

Vários valores de tensão desvio ( $\Delta q$ ) e tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ) foram aplicados para avaliar a resposta do material sob diferentes condições de carga. As sequências de carregamento foram estruturadas com diferentes combinações dessas tensões. A tensão de confinamento, representando a pressão aplicada à amostra, variou entre 27,6 kPa e 55,2 kPa. Ao mesmo tempo, a tensão desviadora cíclica, indicativa dos níveis de estresse flutuantes durante os ciclos de carregamento, variou de 13,8 kPa a 124,2 kPa.

Em resumo, o carregamento em estágios múltiplos permite uma avaliação abrangente do comportamento do material sob várias condições de carga, o que é crucial para o projeto, segurança e durabilidade de estruturas, pavimentos e solos de subleito em cenários do mundo real. Cada estudo destacou a importância dessa abordagem para entender o comportamento de diferentes tipos de materiais sob variações de carga.

## 2.9 *Shakedown*

A teoria do *shakedown* tem sido empregada por pesquisadores para avaliar a resposta de deformação permanente de materiais de pavimentação sob cargas dinâmicas de tráfego. O limite de *shakedown* é definido como a fronteira onde a acumulação de deformação permanente sob as cargas aplicadas atinge o equilíbrio e o comportamento do material se torna resiliente. O limite de *shakedown* depende das características e magnitude da carga dinâmica aplicada, bem como das propriedades do material. Com base nos critérios de Werkmeister (2004), o comportamento do material sob a carga aplicada pode ser categorizado em três faixas:

i. Domínio A: *Shakedown* plástico: durante a etapa primária (pós-compactação), a deformação permanente se acumula por um número finito de ciclos devido ao rearranjo das partículas e densificação do espécime, após o qual o comportamento do material se torna quase resiliente e a acumulação de deformação permanente quase cessa na etapa secundária.

ii. Domínio B: Fluência ou escoamento plástico: grande acumulação de deformação permanente com a aplicação de ciclos de carga na etapa primária, seguida por uma redução na taxa de

deformação permanente na etapa secundária. A aplicação dum grande número de ciclos de carga pode resultar na falha do espécime.

iii. Domínio C: Colapso incremental: A taxa de deformação permanente aumenta rapidamente com os ciclos de carga, mantendo-se após a etapa primária até a falha do espécime.

A teoria do *shakedown* pode ser utilizada como uma abordagem útil para identificar a resposta de deformação permanente dos materiais de pavimentação sob cargas dinâmicas de tráfego. Existem vários modelos de previsão para a caracterização da deformação permanente e do módulo resiliente dos materiais de pavimentação. Isso se deve à natureza complexa das propriedades de deformação e a um grande número de fatores que afetam o comportamento do sistema. A maioria dos modelos de previsão disponíveis para modelar as propriedades de deformação de materiais granulares não ligados utiliza uma estrutura pré-definida, em que análises de regressão são realizadas para determinar os coeficientes do modelo. Esses modelos são tipicamente limitados pelo grau de não linearidade e o procedimento para encontrar o modelo ideal se torna demorado e complexo quando o número de variáveis independentes aumenta.

Werkmeister (2004) concluiu que se as camadas se comportarem de acordo com a Faixa A, a DP irá se estabilizar. Após a deformação pós-compactação, nenhuma deformação permanente adicional se desenvolve e o material subsequentemente responde elasticamente. Assim, a Faixa A é permitida na pavimentação, desde que a deformação acumulada antes do desenvolvimento de um comportamento totalmente resiliente seja suficientemente pequena. O material na Faixa B não se estabiliza; em vez disso, ocorrerá falha após um número muito alto de repetições de carga. É importante conhecer o número máximo de ciclos de carga permitidos que evitarão a ocorrência de danos na pavimentação. Testes adicionais com aplicações de carga de até 2.000.000 de ciclos de carga podem ser necessários para encontrar o ponto de falha. Para muitas pavimentações de estradas de baixo volume de tráfego, o número total de veículos transportados é pequeno e a manutenção do pavimento será eventualmente necessária para corrigir deficiências pelo afundamento de trilha de rodas, então o comportamento da Faixa B provavelmente será aceitável. O comportamento da Faixa C não deve ser permitido na pavimentação.

A avaliação do comportamento de *shakedown* em materiais de pavimentação é de suma importância para o desenvolvimento de infraestruturas viárias duráveis e economicamente viáveis. O *shakedown* refere-se à capacidade de um material de estabilizar sua deformação

permanente após um determinado número de ciclos de carga. Este conceito é crucial, especialmente para pavimentos, que estão sujeitos a cargas repetitivas ao longo de sua vida útil (Rahman et al., 2016).

A avaliação do *shakedown* permite prever o ponto em que um material deixará de acumular deformações significativas sob carregamento cíclico (Nguyen & Ahn, 2019). Isso é essencial para estimar a vida útil dos pavimentos e determinar a frequência necessária de intervenções de manutenção. Materiais que demonstram bom comportamento de *shakedown* são capazes de resistir melhor às deformações causadas pelo tráfego, resultando em pavimentos mais duráveis e menos propensos a falhas prematuras (Maghool et al., 2018).

O conceito de *shakedown* é particularmente relevante no desenvolvimento e avaliação de novas misturas de pavimentação, incluindo materiais reciclados e estabilizados (Yaghoubi et al., 2020). Testes de *shakedown* fornecem uma medida direta da capacidade de uma mistura de manter sua integridade estrutural sob condições de carga repetida (Arulrajah et al., 2020). Isso é especialmente importante na era atual, pois a sustentabilidade e a utilização de materiais reciclados são prioridades. Avaliar o *shakedown* de tais materiais garante que, além de serem ecologicamente corretos, são eficazes e duráveis (Cabral et al., 2020).

A teoria do *shakedown* também é fundamental no desenvolvimento de modelos preditivos para o comportamento de pavimentos (Jing & Nowamooz, 2019). Esses modelos são utilizados para projetar pavimentos que possam resistir às cargas previstas ao longo de sua vida útil, minimizando as deformações permanentes e, conseqüentemente, as falhas estruturais (Fouad et al., 2021). A aplicação da teoria do *shakedown* nos modelos permite uma previsão mais precisa do desempenho do pavimento, resultando em projetos mais seguros e econômicos (Lin et al., 2020).

Em regiões onde os pavimentos estão sujeitos a condições extremas, como ciclos de congelamento e descongelamento ou variações significativas de temperatura e umidade, o *shakedown* torna-se ainda mais crítico (Lin et al., 2020). Materiais que demonstram comportamento favorável de *shakedown* em tais condições são essenciais para garantir a estabilidade e a longevidade dos pavimentos nessas áreas (Yaghoubi et al., 2020).

A avaliação do *shakedown* é uma ferramenta indispensável na engenharia de pavimentação. Não só ajuda a garantir que os materiais utilizados em pavimentos sejam capazes de suportar as condições de carga repetida ao longo do tempo, mas também contribui para o desenvolvimento de infraestruturas viárias mais sustentáveis, duráveis e economicamente eficientes (Rahman et al., 2016; Maghool et al., 2018). Incorporar o conceito de *shakedown* no

processo de design e análise de pavimentos é, portanto, essencial para a criação de sistemas viários que atendam às demandas das sociedades modernas (Nguyen & Ahn, 2019).

O estudo conduzido por Alnedawi et al. (2019), teve como o objetivo caracterizar o comportamento de materiais granulares não ligados sob diferentes condições de carga. Os autores observaram que as fronteiras de *shakedown* propostas por estudos anteriores, como as de Werkmeister et al. (2001), não eram totalmente aplicáveis aos materiais locais de subbase e base utilizados na Austrália, especialmente quando submetidos a carregamentos multiestágio. Para lidar com essas limitações, Alnedawi et al. propuseram novos critérios de *shakedown* baseados no comportamento de deformação permanente dos materiais ao longo dos ciclos de carga. Esses novos critérios permitem uma melhor previsão do desempenho a longo prazo dos materiais granulares em pavimentos, especialmente em situações em que múltiplos níveis de tensão são aplicados sucessivamente, como ocorre em condições reais de tráfego.

No estudo de Fouad et al. (2021), o conceito de *shakedown* foi aplicado em ensaios triaxiais de carregamento multiestágio para avaliar a deformação permanente e o módulo de resiliência de misturas de base granular não ligadas, modificadas com diferentes teores de de argila refinada (CP). Esses ensaios permitiram observar como as misturas se comportavam sob diversas condições de carga, simulando as situações reais que ocorrem nos pavimentos. Os resultados indicaram que a adição de 1% de CP proporcionou a melhor resistência à deformação permanente, demonstrando que o estado de *shakedown* foi alcançado, o que implica em uma resposta resiliente da mistura sob cargas cíclicas subsequentes.

Em Ghorbani et al. (2021), o *shakedown* foi determinado em ensaios triaxiais de carregamento multiestágio para avaliar o comportamento de misturas de resíduos de demolição (RCA e CB) combinados com diferentes porcentagens de resíduos plásticos de PET. Os ensaios permitiram investigar a resposta dessas misturas sob várias condições de tensão, que simulam as diferentes cargas que ocorrem em um pavimento ao longo do tempo. Os resultados indicaram que a mistura de RCA com até 3% de PET alcançou o estado de *shakedown*, o que significa que as deformações permanentes estabilizaram após um número determinado de ciclos de carga. No entanto, as misturas com CB apresentaram um comportamento menos estável, com maiores níveis de deformação permanente, especialmente em maiores teores de PET e níveis de estresse mais elevados. Esse comportamento foi classificado como colapso incremental, ressaltando a importância de limitar a adição de PET a no máximo 1% para garantir a estabilidade.

Maghool et al. (2022) atribuem grande importância ao estudo do *shakedown* ao investigar o comportamento de resíduos de demolição, vidro e plásticos estabilizados com betume espumado em camadas de base de pavimentos. Os autores utilizam ensaios triaxiais cíclicos para avaliar a deformação permanente dos materiais sob condições de carga repetida, determinando os limites de *shakedown* com base na taxa de deformação plástica acumulada. Esta abordagem permite prever a estabilidade dos materiais em cenários reais de tráfego, assegurando que os pavimentos possam resistir a cargas sem sofrer deformações plásticas excessivas, garantindo assim a sustentabilidade do uso de materiais reciclados em infraestrutura rodoviária.

No estudo de Ullah et al. (2022), a importância do *shakedown* é destacada ao avaliar a viabilidade do RAP como material de base não ligado. Os autores aplicam testes triaxiais multistágio para identificar os limites de *shakedown*, utilizando a análise da taxa de deformação plástica sob diferentes estados de tensão. A técnica adotada permite a identificação de condições específicas em que o RAP pode ser utilizado de forma segura, sem comprometer a integridade estrutural do pavimento, oferecendo assim uma solução eficiente e ambientalmente sustentável para o reaproveitamento de materiais em obras rodoviárias (ULLAH et al., 2022a).

Pérez-González et al. (2024) também enfatizam a relevância do *shakedown* ao propor uma metodologia otimizada para testes de deformação permanente em materiais granulares. A pesquisa foca em reduzir o número de ciclos necessários para identificar o comportamento de *shakedown*, utilizando a taxa de deformação plástica como principal indicador. Esta abordagem não apenas melhora a eficiência dos ensaios, mas também oferece uma ferramenta robusta para prever o comportamento de longo prazo de materiais granulares sob condições de carregamento variáveis, o que é essencial para a durabilidade de pavimentos (PÉREZ-GONZÁLEZ et al., 2024).

A equação 2 do artigo Pérez-González et al. (2024) é uma equação que estabelece uma correlação entre a taxa de deformação plástica durante a fase de pós-compactação e a taxa de deformação plástica na fase de *shakedown* para materiais granulares.

$$\varepsilon_p^{SS} = 0,175 \cdot \varepsilon_p^{PC} \quad \text{Eq. 14}$$

Em que:

- $\epsilon_p^{ss}$ : Representa a taxa de deformação plástica no estado de *shakedown*, que ocorre após muitos ciclos de carregamento, quando o material atinge um comportamento mais estável e previsível.
- $\epsilon_p^{pc}$ : Representa a taxa de deformação plástica na fase de pós-compactação, que ocorre nos primeiros ciclos de carregamento, e a estrutura granular do material ainda está se ajustando e compactando.

A equação sugere que a taxa de deformação plástica na fase de *shakedown* pode ser estimada como uma fração (neste caso, 17,5%) da taxa de deformação plástica observada na fase de pós-compactação. Isso implica que, após a fase inicial de ajustes estruturais do material (pós-compactação), o comportamento de longo prazo (*shakedown*) pode ser previsto com base nos dados obtidos durante os primeiros ciclos de carga.

Embora o artigo não forneça um número exato de ciclos que seja aplicável a todos os tipos de materiais granulares, é mencionado que os ciclos iniciais necessários para caracterizar adequadamente a fase de pós-compactação podem variar, mas geralmente se situam na faixa de 100 a 1000 ciclos.

Essa relação é aplicável apenas para materiais que, após a fase de pós-compactação, conseguem estabilizar suas deformações plásticas e atingir um estado de *shakedown*. No estado de *shakedown*, o material experimenta uma acumulação de deformação plástica a uma taxa constante ou muito baixa, indicando que o material pode suportar cargas repetidas sem falha progressiva significativa.

Se o material não atingir o *shakedown* e, em vez disso, continuar a acumular deformações plásticas de forma crescente (indicando instabilidade ou colapso), a relação não será válida. Em outras palavras, a Equação 2 presume que o material possui a capacidade de estabilizar suas deformações plásticas após um certo número de ciclos de carga, o que caracteriza o estado de *shakedown*. Se essa condição não for atendida, a correlação proposta na equação não poderá ser utilizada para prever o comportamento do material.

Finalmente, Xiao et al. (2024) abordam o *shakedown* no contexto de materiais reciclados de resíduos de construção e demolição (RAW) utilizados em enchimentos de subleito de pavimentos. Os autores conduzem testes triaxiais estáticos e dinâmicos para investigar a resistência ao cisalhamento e a acumulação de deformação plástica dos materiais sob diferentes taxas de substituição de agregados e condições de estresse. A importância do *shakedown* é central no desenvolvimento de um novo critério de determinação de comportamento de

*shakedown*, que se mostrou altamente preciso e pode servir como base teórica para a avaliação da performance de longo (XIAO et al., 2024).

O artigo de Xiao et al. (2024), faz referência a pontos que caracterizam as transições cruciais nas curvas de deformação plástica acumulada quando o material é submetido a carregamentos cíclicos. Esses pontos são fundamentais para determinar os diferentes estágios de comportamento do material e, conseqüentemente, para definir o domínio de *shakedown*. Especificamente, esses pontos marcam as transições entre os três estágios principais:

No estágio de pós-compactação, o material experimenta uma rápida acumulação de deformação plástica à medida que as partículas se rearranjam e se acomodam sob o carregamento inicial. O ponto de transição é identificado como o ponto em que a taxa de deformação plástica começa a diminuir, sinalizando que o material está entrando em um estado mais estável, e a deformação ocorre a uma taxa mais constante e mais lenta. Este ponto é crucial porque indica que o material passou de um comportamento altamente instável para um comportamento que é mais previsível e controlável.

O segundo ponto de transição ocorre quando a taxa de acumulação de deformação plástica começa a aumentar novamente, marcando o início do estágio de instabilidade. Neste estágio, o material não consegue mais dissipar a energia de deformação de maneira eficaz, resultando em um rápido aumento na deformação plástica. Este ponto é vital para determinar o limite de *shakedown* do material, pois indica a proximidade de falhas estruturais significativas. Se o material operar além desse ponto, este entra em um regime de falha progressiva, e a deformação plástica pode se acumular a uma taxa que leva à falha catastrófica.

Embora não seja um ponto de transição entre estágios, este ponto marca o fim do ensaio, seja porque o material atingiu uma deformação plástica acumulada que foi considerada como critério de falha (como 15% de deformação plástica) ou porque o material falhou estruturalmente. Esse ponto final é utilizado para validar o comportamento predito pelo modelo de *shakedown* proposto e para comparar a performance dos materiais sob diferentes condições de carga.

Os artigos analisados na Tabela 2 cobrem uma variedade de metodologias e materiais, incluindo agregados reciclados, solos estabilizados, e misturas asfálticas, sendo conduzidos sob diferentes normas internacionais de ensaio, como a EN 13286-7, ASTM D1557, e JTG E40-2007, filtrados da análise bibliométrica que constam no Anexo A. As informações de cada estudo, incluindo os autores, as normas balizadoras dos ensaios, a energia de compactação aplicada, as tensões solicitantes durante os ensaios, os materiais utilizados, a avaliação do

domínio do *shakedown*, e se os autores propuseram novos modelos teóricos para prever o comportamento dos materiais estudados.

Tabela 2: Análise Comparativa de Estudos sobre Deformação Permanente e Comportamento de *Shakedown* em Materiais de Pavimentação

Autores	Ano	Norma Balizadora do Ensaio Multiestágio	Compactação	Tensões Solicitantes para os Ensaios	Material Utilizado na Pesquisa	Avaliou o Domínio do <i>Shakedown</i>	Propôs Modelo
Pérez-González, E.; Bilodeau, J.-P.	2024	EN 13286-7	Compactação em seis camadas com martelo vibratório	Confinamento de 20 a 140 kPa e tensões de desvio de 20 a 510 kPa	Materiais granulares (areia e cascalho)	Sim	Sim
Xiao Yuanjie, et al.	2024	JTG/T F20—2015, JTG 3430—2020, JTG E42—2005	Compactação a 95%	50-150 kPa, RSS 0.3-0.9, $\sigma_d$ até 1332.9 kPa	Mistura de agregado reciclado de construção e demolição (RAW) e agregado natural (NA)	Sim	Sim
Ehsan Y. et al.	2023	ASTM D6913/D6913M; VicRoads Section 820	Compactação modificada (AS 1289.5.2.1)	Confinamento: 40 kPa, Desvio: 140-460 kPa	Resíduos de demolição reciclados (RCA, CB) estabilizados com emulsão betuminosa	Sim	Sim
Mohammad S. R.; Sigurdur E.; Abubeker A.	2022	EN 13286-7	Método de vibro compressão (EN 13286-52)	Confinamento: 20-150 kPa, Desvio: 0-600 kPa	Materiais granulares não ligados (rochas britadas, cascalho)	Sim	Não
Ullah, Burak F. Tanyu, Andrew Dawson	2022	Não especificado para ensaio multiestágio específico	Compactação a 100% de compactação relativa e OMC	Confinamento de 5, 10 e 20 psi (~35, 70 e 140 kPa) e $\sigma_1/\sigma_3$ variando entre 2 e 20	Mistura de RAP e agregado virgem (VA)	Sim	Sim
Farshid M.; Arul A.; Behnam G.; Suksun H.	2022	ASTM D1557; ASTM D6913/D6913M	Método de compactação modificado (ASTM D1557)	Confinamento: 40 kPa, Desvio: 140-460 kPa	Resíduos de demolição reciclados estabilizados com betume espumado	Sim	Sim
Farshid Maghool, Arul Arulrajah, Behnam Ghorbani, Suksun Horpibulsuk	2022	ASTM D6913/D6913M e ASTM D1557	Compactação modificado (ASTM D1557)	40 kPa de confinamento e desvio variando de 140 a 460 kPa	Resíduos de demolição estabilizados com betume espumado (RCA, RAP, RG, RP)	Sim	Sim
Ali Fouad, Rayya Hassan, Abdulrahman Mahmood	2021	Austroroads (AG /T053), AS 1289.3.9.1	Compactação modificada (AS 1289.5.2.1)	50 kPa de confinamento e desvio de 350 a 550 kPa	Rochas trituradas (Hornfels e Basalto) com argila refinada como plastificante (Claypro, CP)	Sim	sim
Behnam Ghorbani, Arul Arulrajah, Guillermo Narsilio, Suksun Horpibulsuk, Myint Win Bo	2021	ASTM D6913/D6913M, ASTM D1557	Compactação modificada (ASTM D1557)	Confinamento de 20 a 80 kPa e desvio de 60 a 360 kPa	Resíduos de demolição (RCA, CB) misturados com diferentes percentuais de PET	Sim	Sim

Wendel S. C.; Suelly H. d. A. B.; Samuel d. A. T. e. S.	2021	EN 13286-7	Compactação com energia intermediária (NBR 7182)	Confinamento: 40-120 kPa, Desvio: 40-480 kPa	Cambissolo Háplico, Latossolo Amarelo Distrófico, mistura solo+brita	Sim	Sim
<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Norma Balizadora do Ensaio Multiestágio</b>	<b>Compactação</b>	<b>Tensões Solicitantes para os Ensaios</b>	<b>Material Utilizado na Pesquisa</b>	<b>Avaliou o Domínio do <i>Shakedown</i></b>	<b>Propôs Modelo</b>
Ali F.; Rayya H.; Abdulrahman M.	2021	ASTM D1557; AG: PT/T053	Compactação modificada (ASTM D1557)	Confinamento: 50 kPa, Desvio: 350-550 kPa	Hornfels e Basalt com plastificante de argila refinada (Claypro)	Sim	Sim
Tan H. N.; Jaehun A.	2019	BS EN 13286-7	Vibração (NCHRP 1- 28A)	Confinamento: 20-120 kPa, Desvio: 60-300 kPa	Materiais agregados de gradiente aberto (OG13, OG25, OG40)	Sim	Sim
Ali Alnedawi, Kali Prasad Nepal, Riyadh Al-Ameri	2019	AG-PT/T053	Compactação modificada (AST1289.5.2.1)	Confinamento de 50 kPa e desvio de 350, 450 e 550 kPa	Materiais granulares não ligados locais da Austrália (basalto e granito)	Sim	Sim
Bo L. et al.	2017	JTG E40-2007	Martelo vibratório, cinco camadas (1,74 g/cm <sup>3</sup> )	Confinamento: 60-150 kPa, Desvio: 25-114 kPa	Argila saturada descongelada de regiões sazonalmente congeladas	Sim	Sim
Farhad Salour, Sigurdur Erlingsson	2015	Não especificado	Compactação padrão Proctor (ASTM D698)	Confinamento de 27,6 a 55,2 kPa e desvio de 13,8 a 129,7 kPa	Subleitos de areia siltosa (SM) da Suécia, com diferentes teores de umidade	Sim	Sim
Sigurdur Erlingsson, Mohammad Shafiqur Rahman	2013	EN 13286-7	Compactação Proctor e Proctor Modificado	Confinamento de 10 a 40 kPa e desvio até 1200 kPa	Materiais granulares não ligados (Skårlunda, Hallinden, SG1)	Sim	Sim

A presença constante do conceito de *shakedown* nos estudos revisados demonstra sua importância para a área de pavimentação. O *shakedown* não só ajuda a prever e melhorar o desempenho dos materiais, como também guia o desenvolvimento de novos modelos teóricos e a utilização de materiais mais sustentáveis. Portanto, o *shakedown* é, de fato, uma contribuição fundamental desses trabalhos.

## 2.10 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, foi realizada uma revisão abrangente da literatura existente sobre o uso de emulsões asfálticas na estabilização de solos e fresado asfáltico. A análise destacou que,

embora existam diversos estudos sobre a estabilização de solos para pavimentos utilizando emulsão asfáltica, a maioria deles emprega metodologias adaptadas de outros métodos, indicando a necessidade de desenvolvimento de uma metodologia própria para solos tropicais, conforme apontado por Ferreira (1980). Este desenvolvimento é crucial para encontrar a forma mais racional e coerente de utilização das emulsões em campo e em testes de laboratório.

A revisão também enfatizou a importância de ensaios laboratoriais específicos para estudar o comportamento mecânico de solos estabilizados com emulsão asfáltica. Ensaio como tração diametral, módulo resiliente, deformação permanente e resistência à umidade são essenciais para avaliar a viabilidade e a eficácia da estabilização de solos e fresado asfáltico com emulsão.

A estabilização de solo-emulsão é destacada como uma alternativa viável e de baixo custo, especialmente relevante em um país de dimensões continentais como o Brasil, onde nem sempre é possível contar com jazidas de solos que atendam às especificações técnicas do projeto. A utilização de materiais locais, como enfatizado por Suárez (2008), é uma estratégia importante para a sustentabilidade e economia dos projetos rodoviários.

No que diz respeito à reciclagem a frio, a pesquisa destacou a distinção entre reciclagem parcial e completa. A reciclagem parcial envolve a trituração de parte da camada asfáltica existente, com a adição de emulsão de betume e aditivos hidráulicos, como cimento, cal ou pozolanas, e posterior compactação na estrada. A reciclagem completa, ou full-depth reclamation (FDR), utiliza toda a profundidade da camada asfáltica, e às vezes parte da camada subjacente, sendo especialmente útil quando todas as camadas do pavimento apresentam problemas.

Os ensaios de deformação permanente em múltiplos estágios são cruciais para avaliar a resposta mecânica de solos estabilizados com emulsão asfáltica sob diferentes níveis de estresse. Este método permite uma análise detalhada das regiões elásticas e plásticas do solo, proporcionando uma interpretação precisa do comportamento do material sob condições variáveis de carga. A pesquisa de Yaghoubi et al. (2023) utilizou ensaios triaxiais de carga repetida em vários estágios (RLT) para avaliar a deformação permanente de agregados reciclados de concreto e resíduos de construção estabilizados com emulsão betuminosa, destacando a contribuição do carregamento multiestágio para a classificação das misturas e avaliação de sua deformação permanente.

A aplicação da teoria do *shakedown* permite prever o comportamento de materiais de pavimentação sob cargas repetidas e identificar os limites operacionais para garantir a

durabilidade e resistência dos pavimentos. Estudos como o de Werkmeister (2004) demonstraram que materiais que operam no Domínio A são preferíveis para pavimentação, pois a deformação se estabiliza e o material responde elasticamente após a fase inicial de compactação.

A revisão da literatura reforça a importância de aprimorar as metodologias de estabilização de solos com emulsão asfáltica e de continuar a pesquisa sobre as técnicas de reciclagem a frio, tanto parcial quanto completa, para garantir a durabilidade e eficiência dos pavimentos rodoviários.

### **3 MÉTODO CIENTÍFICO**

Segundo Lakatos e Marconi (2001, pág. 83), o método científico é um conjunto de normas e procedimentos que visam garantir a produção de conhecimento de forma sistemática, controlada e crítica. O método envolve a formulação de hipóteses, a realização de experimentos controlados, a coleta e análise de dados, e a interpretação dos resultados. Este processo permite que as conclusões obtidas sejam testáveis e reproduzíveis, assegurando assim a validade do conhecimento gerado.

O principal objetivo deste método é desenvolver uma metodologia científica que permita a estabilização de solos com emulsão asfáltica, de maneira a maximizar suas propriedades mecânicas, como resistência e durabilidade. Além disso, visa determinar a dosagem ideal dos componentes para melhorar a eficiência e reduzir os custos associados à construção e manutenção de pavimentos rodoviários. O método busca, de forma sistemática, correlacionar a composição do solo e emulsão com a resposta mecânica desejada em pavimentos, ajudando na tomada de decisão sobre a aplicabilidade de misturas específicas para condições reais de tráfego.

Portanto, o objetivo do método proposto seria o de investigar e compreender o processo de estabilização de materiais utilizando emulsão asfáltica. Isso inclui a seleção adequada das amostras, a caracterização dos materiais, a escolha do tipo de emulsão mais adequado, a determinação da dosagem ideal e a avaliação dos efeitos da variação do teor de emulsão na estabilidade e nas propriedades mecânicas do composto final. O estudo visa melhorar a compreensão dos processos envolvidos na estabilização de materiais asfálticos. Dessa forma, o método científico do organograma da Figura 3 foi proposto:

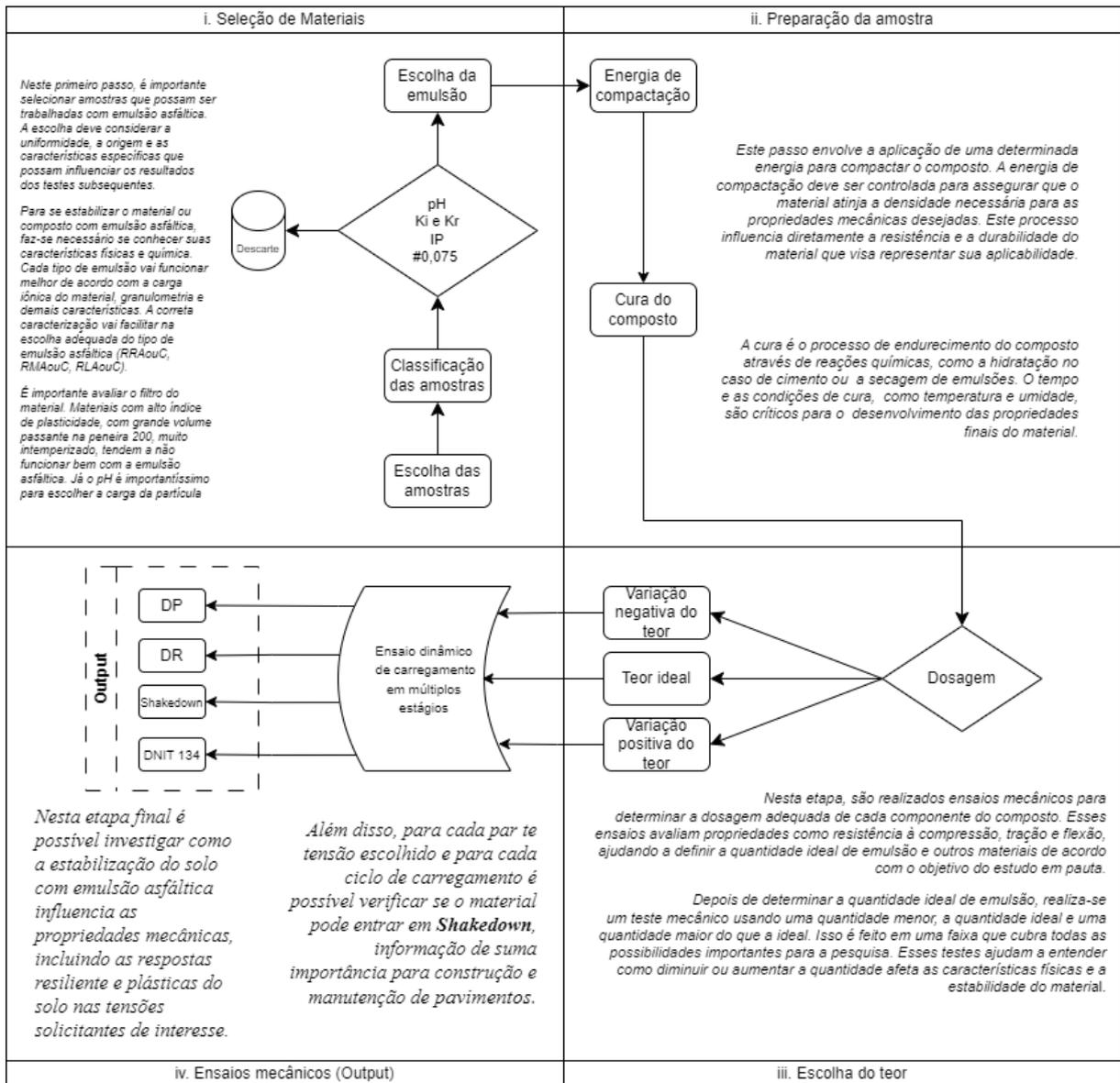


Figura 3: Método científico da pesquisa

### i. Escolha das amostras

Neste primeiro passo, é importante selecionar amostras representativas do material que será estudado. A escolha deve considerar a uniformidade, a origem e as características específicas que possam influenciar os resultados dos testes subsequentes.

### ii. Caracterização das amostras

Para se estabilizar o material ou composto com emulsão asfáltica, faz-se necessário se conhecer suas características físicas e química. Cada tipo de emulsão vai funcionar melhor de acordo com a carga iônica do material, granulometria e demais características. A correta caracterização vai facilitar na escolha adequada do tipo de emulsão asfáltica.

Avalia-se o pH, a quantidade de partículas finas ( $K_i$  e  $K_r$ ) e o índice de plasticidade (IP). Materiais com alto índice de plasticidade e grande volume passante na peneira 200 são descartados.

### **iii. Escolha do tipo de emulsão**

Aqui, define-se qual emulsão será utilizada no experimento. Existem diferentes tipos de emulsão asfálticas com distintas aplicações. A emulsão é uma mistura de dois líquidos imiscíveis, em que um é disperso em pequenas gotas no outro. A escolha correta do tipo de emulsão é crucial para a eficácia do processo e depende das propriedades da amostra e das condições desejadas no composto final.

Segundo manual básico de emulsões asfálticas ABEDA (2010), a Emulsão de ruptura rápida (RR) é comumente usada para tratamentos superficiais como selagem de pavimentos e revestimentos superficiais. É ideal para aplicações que necessitam de uma cura rápida para reabrir o tráfego rapidamente.

A Emulsão de ruptura média (RM) é adequada para pré-misturas a frio, reciclagem de pavimentos e aplicações em que a cura média é desejada. Podem ser empregadas em britas, materiais pedregulhosos ou de granulometria mais grossa. Permite um tempo de trabalho mais longo para mistura do que a emulsão de RR.

A Emulsão de ruptura lenta (RL) é utilizada principalmente para misturas a frio e estabilização de solos. Oferece um longo tempo de cura, permitindo uma mistura completa e uniforme.

As emulsões asfálticas podem ser classificadas conforme a carga da partícula: catiônica (RRC, RMC, RLC) ou aniônica (RRA, RMA, RLA). Emulsões catiônicas possuem cargas positivas, enquanto as aniônicas têm carga negativa. A escolha entre elas depende do tipo de material que está sendo estabilizado ou da presença de algum tipo de aditivo ativo na mistura com a emulsão.

### **iv. Energia de Compactação**

Este passo envolve a aplicação de uma determinada energia para compactar o composto. A energia de compactação deve ser controlada para assegurar que o material atinja a densidade necessária para as propriedades mecânicas desejadas. Este processo influencia diretamente a resistência e a durabilidade do material que visa representar sua aplicabilidade.

### **v. Cura do composto**

A cura é o processo de endurecimento do composto por meio das reações químicas, como a hidratação no caso de cimento ou a secagem de emulsões. O tempo e as condições de cura, como temperatura e umidade, são críticos para o desenvolvimento das propriedades finais do material.

#### **vi. Dosagem**

Nesta etapa, são realizados ensaios mecânicos para determinar a dosagem adequada de cada componente do composto. Esses ensaios avaliam propriedades como resistência à compressão, tração e flexão, ajudando a definir a quantidade ideal de emulsão e outros materiais de acordo com o objetivo do estudo em pauta.

#### **vii. Variação do teor**

Depois de determinar a quantidade ideal de emulsão, realiza-se um teste mecânico usando uma quantidade menor, a quantidade ideal e uma quantidade maior do que a ideal. Isso é feito em uma faixa que cubra todas as possibilidades importantes para a pesquisa. Esses testes ajudam a entender como diminuir ou aumentar a quantidade afeta as características físicas e a estabilidade do material.

#### **viii. Ensaio mecânico para avaliar a estabilização**

Nesta etapa, investiga-se como a estabilização do solo com emulsão asfáltica influencia as propriedades mecânicas.

Realizam-se ensaios dinâmicos para verificar a resiliência e a plasticidade do solo sob diferentes condições de carregamento.

Ensaio mecânicos são repetidos para cada teor escolhido e cada ciclo de carregamento para confirmar a performance do material.

#### **ix. Outputs**

**Deformação Permanente (DP):** Mede a deformação acumulada irreversível após a aplicação de cargas cíclicas. Esse output é essencial para avaliar a resistência do solo estabilizado em termos de deformação ao longo do tempo. É especialmente importante em pavimentos, onde a deformação permanente pode indicar problemas de estabilidade estrutural.

**Deformação Resiliente (DR):** Refere-se à parte recuperável da deformação elástica após a remoção da carga. A DR é usada para avaliar a capacidade do solo em retornar à sua forma original após ser submetido a uma carga repetida, refletindo o comportamento resiliente do material. A medição da DR é crucial para entender a resistência do solo em cargas cíclicas e determinar sua durabilidade.

Shakedown: Representa a resposta do material ao carregamento cíclico. Indica se o material está estável após vários ciclos de carga, se acumula deformações progressivas ou se falha. Esse output é essencial para a construção e manutenção de pavimentos, já que ajuda a prever a resposta do solo em situações reais de tráfego.

Módulo Resiliente (DNIT 134): Esse output refere-se ao módulo resiliente, uma propriedade mecânica importante que indica a rigidez do material sob carregamento repetido. O ensaio é utilizado para descrever a capacidade do material de resistir a deformações durante a aplicação de cargas dinâmicas, como as encontradas em rodovias. Esse dado é fundamental para o dimensionamento de pavimentos.

### **3.1 Aplicabilidade do método**

A metodologia apresentada no diagrama é uma abordagem sistemática para a estabilização de materiais asfálticos e pode ser aplicada em diversas áreas da engenharia.

Na Engenharia Civil, a metodologia é crucial para estudar a estabilização de solos e agregados em projetos de pavimentação, garantindo a durabilidade e a resistência das rodovias. Por exemplo, estradas podem sucumbir por falta de coesão do subleito e uma possível falha na drenagem, muitas dessas estradas podem ter mais resistência se forem estabilizadas com emulsão asfáltica. Esta técnica melhora a ligação entre as partículas do solo e o asfalto, aumentando a durabilidade e a capacidade dessas estradas. Um exemplo de aplicação bem-sucedida dessa técnica pode ser encontrado no estudo de Medeiros, Cardoso e Silva (2024), que analisou a melhoria na durabilidade e resistência de pavimentos estabilizados com emulsão asfáltica.

Além disso, esta metodologia pode ser utilizada na geotecnia para a estabilização de encostas, aterros e barragens, melhorando a coesão e a resistência ao cisalhamento dos solos. A estabilização com emulsão asfáltica pode ser crucial para evitar deslizamentos e garantir a estabilidade de estruturas de terra, conforme demonstrado no estudo de Jacintho (2010), que investigou a eficácia da estabilização asfáltica em solos de barragens.

Na Engenharia de Materiais, a metodologia possibilita a criação de compósitos asfálticos com propriedades melhoradas, como resistência à deformação e durabilidade. Além disso, permite a incorporação de materiais reciclados em misturas asfálticas, promovendo a sustentabilidade. Por exemplo, a utilização de resíduos de demolição estabilizados com emulsão

asfáltica demonstrou melhorar a resistência dos materiais, o que é crucial para a construção de pavimentos sustentáveis (YAGHOUBI et al., 2023).

Na Engenharia Ambiental, a utilização de emulsões para estabilizar solos contaminados ajuda a prevenir a migração de poluentes, enquanto o desenvolvimento de técnicas para reduzir a pegada de carbono na produção de materiais de pavimentação contribui para a sustentabilidade. Este aspecto é bem exemplificado no estudo de Marina, Medeiros e Silva (2023), que discutiu a eficácia de emulsões asfálticas na minimização do impacto ambiental durante a construção de pavimentos.

Ao verificar artigos acadêmicos sobre estabilização asfáltica, é possível entender como cada etapa do método proposto se alinha com as práticas estabelecidas na pesquisa.

Este método é amplamente aplicável em projetos de pavimentação e outras áreas da engenharia que requerem a estabilização de solos e materiais de construção, sendo suportado por extensa pesquisa acadêmica e prática de campo.

Nesta pesquisa, conforme detalhado no capítulo 4, o método foi aplicado para analisar a estabilização asfáltica de solos utilizando o carregamento multiestágio, visando a sua utilização em pavimentação. Além disso, foram implementados outros procedimentos complementares para avaliar a eficácia e durabilidade da estabilização. Este estudo abrangeu diversas etapas, incluindo a escolha e caracterização das amostras química e fisicamente, a seleção do tipo de emulsão asfáltica, a determinação da energia de compactação, o processo de cura do composto e a dosagem adequada da emulsão utilizando a tração por compressão diametral.

## 4 MATERIAIS E APLICAÇÃO DO MÉTODO

### 4.1 Considerações iniciais

Neste capítulo, serão descritas as etapas específicas conduzidas durante a execução do experimento científico, concentrando-se na avaliação da influência da estabilização asfáltica na resposta mecânica do solo e do composto utilizando o carregamento multiestágio. O processo abrange todas as ações, passos e condições controladas necessárias para realizar o experimento de acordo com o método estabelecido com a finalidade de atender os objetivos da pesquisa e validar as hipóteses elencadas. A aplicação do procedimento metodológico, representado no organograma da Figura 4, engloba o passo a passo desta pesquisa."

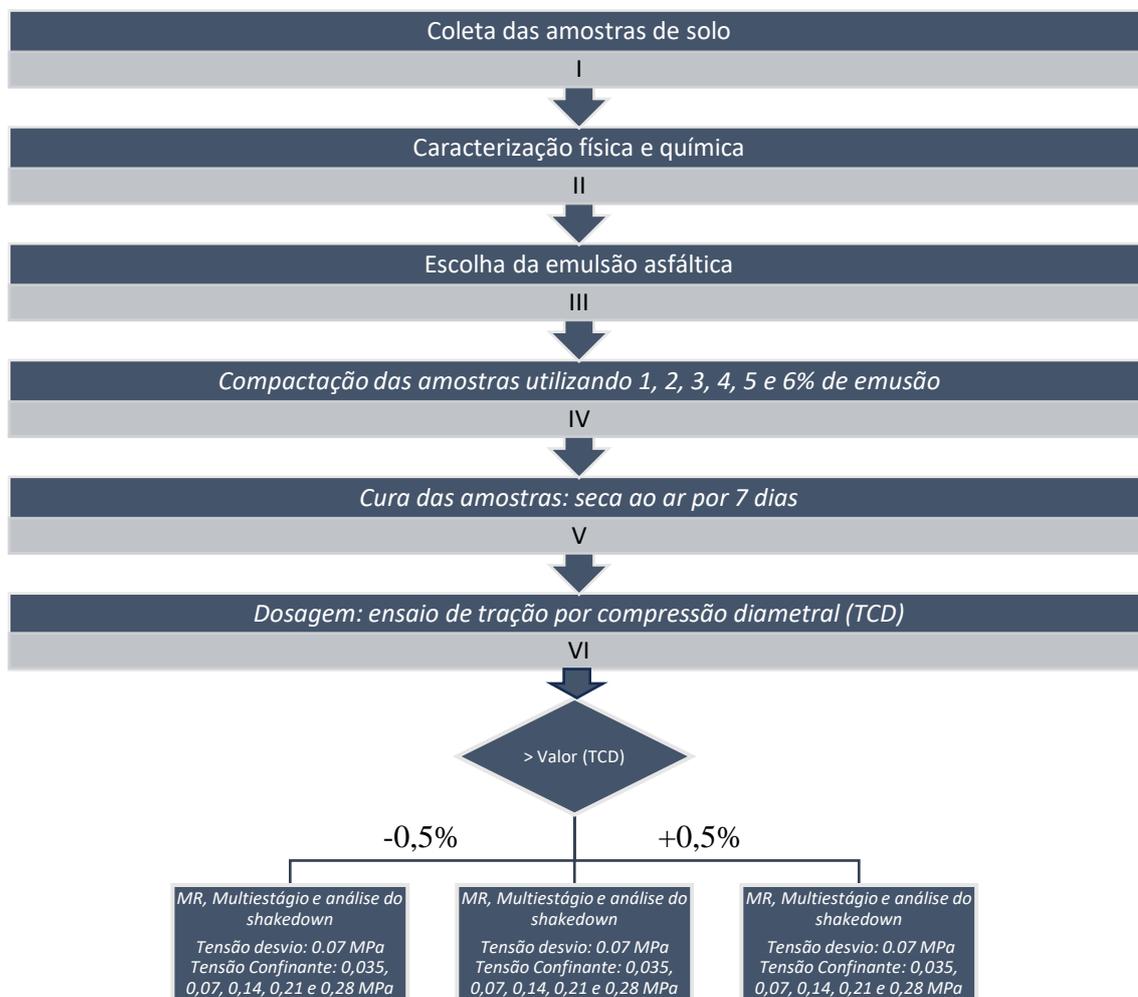


Figura 4: Aplicação do método científico da pesquisa

Adicionalmente, foram investigados os efeitos da adição de fresado de asfalto em duas proporções (30% e 50%) e da emulsão asfáltica (dosagem ótima obtida na estabilização do solo) na estabilização do solo, conforme ilustrado no organograma da Figura 5.

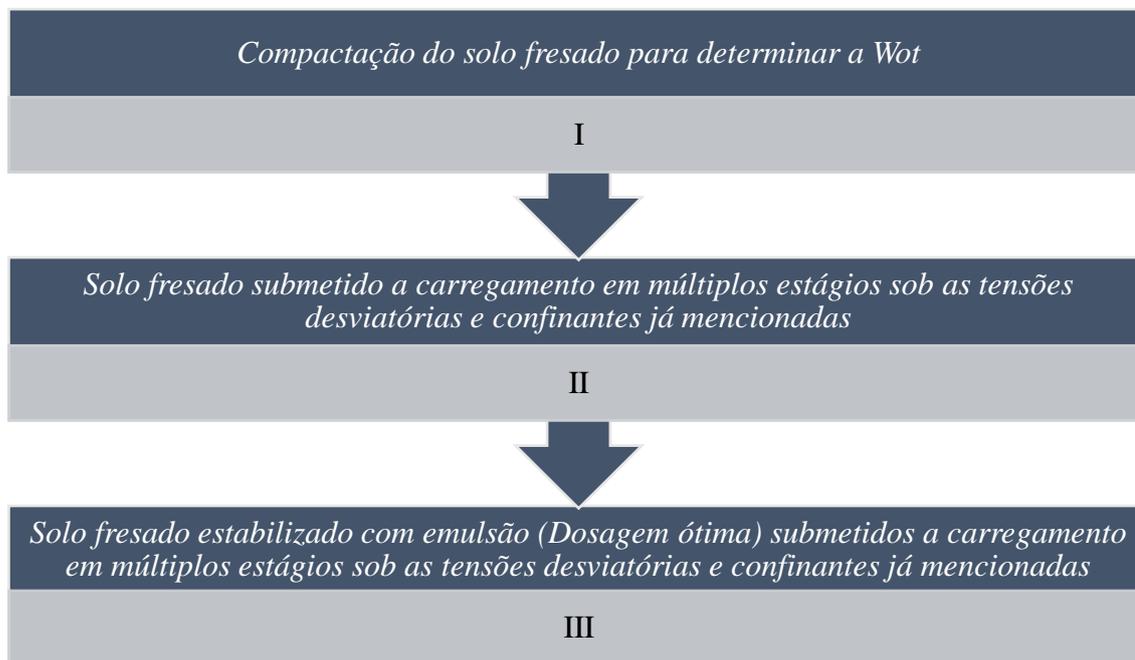


Figura 5: Segunda parte do método científico

Portanto, este estudo consiste em uma pesquisa experimental composta por uma fase de campo para a coleta de materiais, seguida por uma fase de laboratório na qual as amostras foram testadas sob condições específicas, incluindo os ensaios mecânicos. Por fim, houve uma fase que consistiu na análise de dados, na qual os resultados foram examinados para avaliar o impacto da inserção de emulsão tanto no solo quanto no composto solo fresado.

#### 4.2 Plano experimental

Neste estudo, são apresentados quatro experimentos distintos, todos desenhados para atender os objetivos centrais da pesquisa e responder às hipóteses previamente estabelecidas. O foco principal é explorar a influência de diferentes fatores no comportamento mecânico de solos estabilizados. Por meio desses experimentos, busca-se fornecer uma compreensão de como a variação no tipo de solo, na quantidade de ligante (emulsão) e no percentual de material fresado (reclaimed asphalt) afeta o desempenho mecânico dessas misturas sob condições de carregamento cíclico.

O objetivo deste primeiro experimento é analisar como a variação no tipo de solo e no percentual de ligante (emulsão) influencia a deformação permanente (DP), a deformação resiliente (DR), e o módulo resiliente (MR) ao longo de diferentes ciclos de carga do ensaio de carregamento multiestágio.

Este experimento busca entender como diferentes tipos de solo (um solo mais granular e um solo mais fino), combinados com diversas proporções de ligante (emulsão), afetam a resposta mecânica do material ao longo de vários ciclos de carga. Os fatores e seus níveis deste experimento podem ser consultados na Tabela 3.

Tabela 3: Experimento 1: Influência da Emulsão

Fatores	Níveis
Fator 1: Solo	Solo 1
	Solo 2
Fator 2: Percentual de Ligante	0% TE
	TE-ξ%
	TE
	TE+ξ%
Fator 3: Ciclos	Ciclo 1
	Ciclo 2
	Ciclo 3
	Ciclo 4
	Ciclo 5

O objetivo deste experimento é examinar como a adição de fresado e a interação com emulsões modificam as propriedades mecânicas dos solos, particularmente em termos de deformação permanente, deformação resiliente e módulo resiliente. Os resultados ajudarão a determinar se o uso de fresado, combinado ou não com emulsão, é uma solução viável ou não.

Este segundo experimento investiga como a incorporação de diferentes porcentagens de fresado asfáltico (reclaimed asphalt) e a combinação com emulsão afetam o comportamento mecânico de dois tipos de solo sob ciclos de carga. Os fatores e seus níveis deste experimento são apresentados Tabela 4.

Tabela 4: Experimento 2: Influência do Fresado e do Fresado-Emulsão

Fator 1: Solo	Solo 1
	Solo 2
Fator 2: Percentual de Fresado	Solo + 0% fresado
	Solo + χ% Fresado
	Solo + γ% Fresado

Fatores	Níveis
Fator 3: Percentual de Ligante	0% TE TE
Fator 4: Ciclos	Ciclo 1 Ciclo 2 Ciclo 3 Ciclo 4 Ciclo 5

A interação entre os fatores será avaliada em relação às variáveis dependentes, discriminadas Tabela 5. No contexto desses experimentos, as interações dos fatores (como tipo de solo, percentual de ligante ou fresado, e ciclos de carga) são cruciais para entender como esses fatores combinados afetam as variáveis dependentes.

Tabela 5: Variáveis Dependentes para Ambos os Experimentos

Variáveis Dependentes
DP (mm)
DR (mm)
MR

O objetivo principal deste terceiro experimento é determinar como a variação no tipo de solo e no percentual de emulsão, combinada com diferentes níveis de tensões confinantes e desviadoras, afeta o módulo resiliente do solo.

Cada ciclo de carga é dividido em 6 níveis, valores correspondentes de tensão confinante mais três subníveis correspondentes às tensões desvios aplicados, totalizando 18 diferentes combinações de tensões, conforme as condições de carregamento de um ensaio de MR, descrito na Tabela 6.

Tabela 6: Experimento 3: Influência da Emulsão

Fatores	Níveis
Fator 1: Solo	Solo 1 Solo 2
Fator 2: Percentual de Ligante	0% TE TE- $\xi$ % TE TE+ $\xi$ %
Fator 3: Ciclos	Ciclo 1 Ciclo 2 Ciclo 3 Ciclo 4 Ciclo 5 Ciclo 6

O Experimento 4 tem como foco investigar como a incorporação de fresado asfáltico (material fresado) e a combinação desse material com emulsão afetam o comportamento mecânico de dois tipos de solo, com ênfase no módulo resiliente (MR) como variável dependente, conforme descrito Tabela 7. O principal objetivo deste experimento é avaliar como diferentes combinações de solo, fresado asfáltico e emulsão influenciam o módulo resiliente do material ao longo de vários ciclos de carga.

Tabela 7: Experimento 4: Influência do Fresado e do Fresado-Emulsão

Fatores	Níveis
Fator 1: Solo	Solo 1
	Solo 2
Fator 2: Percentual de Fresado	Solo + 0% fresado
	Solo + $\chi$ % Fresado
	Solo + $\Upsilon$ % Fresado
Fator 3: Percentual de Ligante	0% TE
	TE
Fator 4: Ciclos	Ciclo 1
	Ciclo 2
	Ciclo 3
	Ciclo 4
	Ciclo 5
	Ciclo 6

O ensaio de módulo resiliente é um teste de laboratório no qual uma amostra de solo ou de composto é submetida a tensões cíclicas que simulam as cargas de tráfego. Durante o teste, uma carga axial repetida é aplicada à amostra, e a deformação resultante é medida. O MR é calculado a partir da relação entre a tensão aplicada e a deformação recuperável (ou elástica) da amostra. Para os experimentos 3 e 4 a variável dependente é o MR obtido através do ensaio padronizado pela norma DNIT 134/2018, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8: Variável dependente para ambos os experimentos

Variáveis Dependentes
MR

### 4.3 Caracterização dos materiais

#### 4.3.1 *Caracterização das regiões onde foram coletadas as amostras*

##### 4.3.1.1 Município de Pinheiral

Conforme informações da prefeitura de Pinheiral (2024), o município está inserido na Região do Médio Paraíba, engloba municípios como Barra do Piraí, Barra Mansa, Itatiaia, Piraí, Porto Real, Quatis, Resende, Rio Claro, Rio das Flores, Valença e Volta Redonda. Compreendendo apenas um distrito-sede, Pinheiral abrange uma área total de 76,5 quilômetros quadrados, representando 1,2% da extensão territorial da Região do Médio Paraíba. Seus limites municipais são demarcados por Barra do Piraí, Piraí e Volta Redonda, seguindo uma direção horária.

A malha viária de Pinheiral é constituída pela rodovia BR-116 (Via Dutra), pelas rodovias estaduais RJ-141 e RJ-145, além de um ramal ferroviário da antiga estrada de ferro Central do Brasil.

No site do INMET (2024), a estação meteorológica mais próxima do local de extração do solo disponível para consulta é a do município de Resende. Conforme dados do instituto, a precipitação anual em nesta localidade é de aproximadamente 1.400 mm, sendo que em 2023 a precipitação anual chegou a 1477 mm, com chuvas mais intensas no verão e outono. Os meses mais chuvosos em 2023 foram: janeiro, março e outubro, enquanto os mais secos foram maio, junho e julho. A umidade relativa do ar registrada é alta, em torno de 75% ao longo do ano. Estas informações podem ser visualizadas nos gráficos da Figura 6.

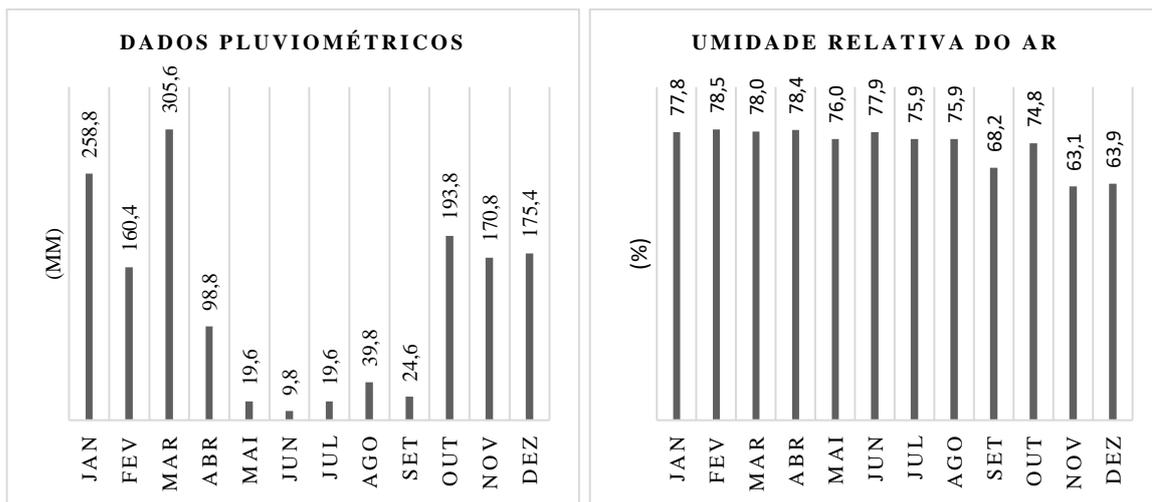


Figura 6: Dados Pluviométricos e de umidade relativa da estação meteorológica de Resende (INMET).

A radiação solar é considerada alta quando está acima de 1000 kJ/m<sup>2</sup>. Essa intensidade ocorre geralmente em dias ensolarados, sem nuvens, e pode causar queimaduras solares em poucos minutos. Já as temperaturas são mais amenas e com uma baixa amplitude térmica. As temperaturas, em 2023, variaram entre 17 e 23°C. Estas informações podem ser conferidas na Figura 7.

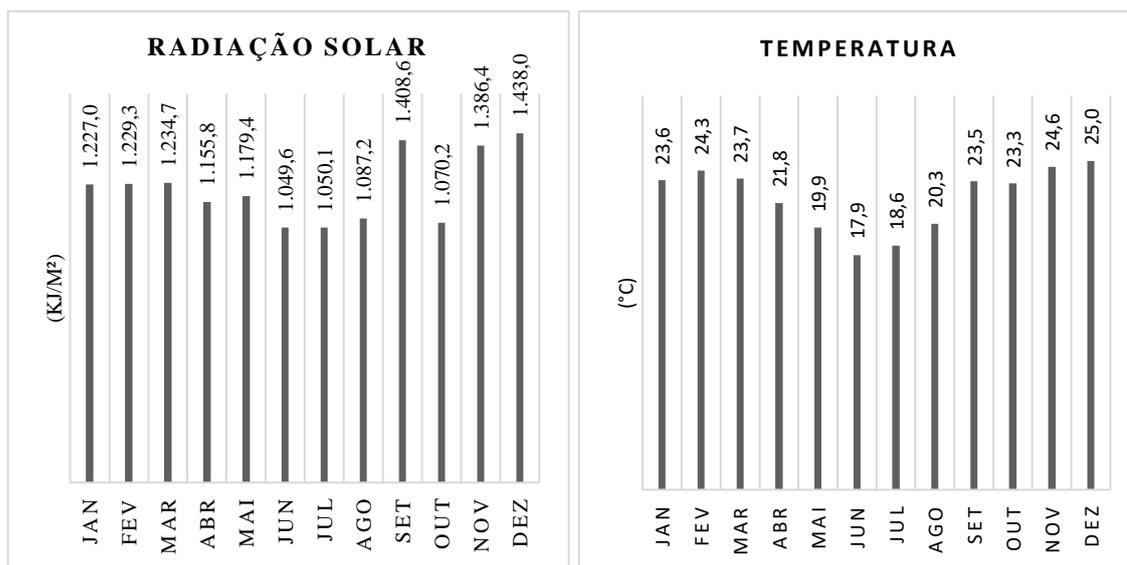


Figura 7: Dados de radiação e amplitude térmica da estação meteorológica de Resende (INMET)

Villibor e Alves (2019) explicam que todas essas variáveis: radiação solar, temperatura, permeabilidade do solo, umidade, precipitação, entre outras: influem diretamente no intemperismo e na erosão do solo, ou seja, na decomposição e alteração química e física dos minerais que o compõem. Isso também impacta nos processos de evapotranspiração e erosão

do solo. A decomposição da rocha mãe e, conseqüentemente, a constituição mineralógica do solo são influenciadas por esses fatores ambientais. Essa composição mineral pode tornar o solo mais ou menos adequado para a pavimentação de vias e estradas.

Portanto, o entendimento dessas variáveis climáticas e seus efeitos sobre as propriedades do solo é essencial para a correta avaliação da aptidão do terreno para obras de pavimentação.

Sem dúvidas, o melhor período para se fazer obras preventivas ou preditivas para manutenção do pavimento rodoviário nesta região, seria entre os meses de maio e setembro, no período de menores precipitações.

A jazida onde o material foi coletado, como mostrado na Figura 8, está localizado na latitude 22° 34' 18.52"S e longitude 44° 1' 4.76" O, no município de Pinheiral, situado aproximadamente a 2 km de uma importante rodovia no estado do Rio de Janeiro, Brasil, conhecida como BR-116 (Rodovia Presidente Dutra), que liga duas importantes megacidades: Rio de Janeiro e São Paulo.

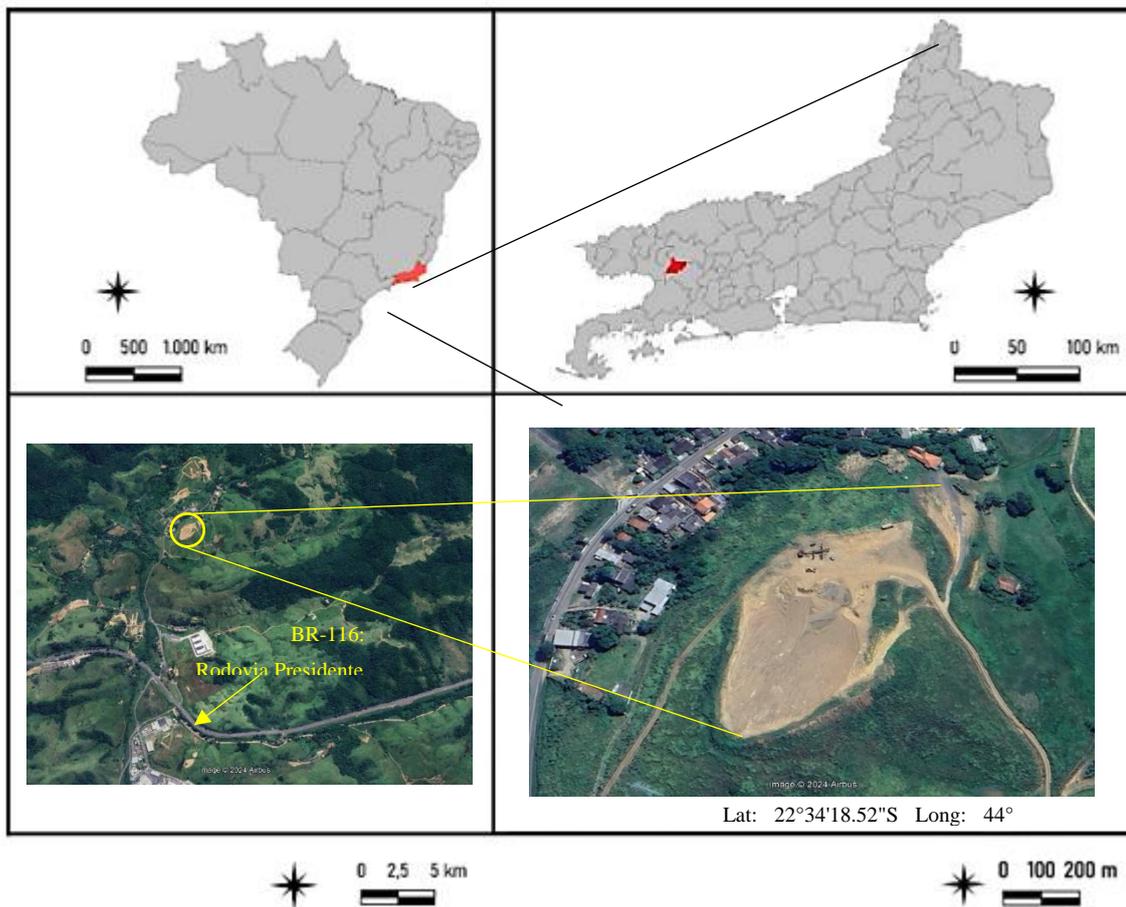


Figura 8: Localização da jazida onde foi extraído o primeiro solo

Conforme Embrapa (2021), os Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos (PVAd39) são verdadeiros protagonistas nos solos brasileiros, estendendo-se por todo o país, desde as terras do Amapá até os campos do Rio Grande do Sul. Junto aos Latossolos, formam uma das classes de solo mais amplas em nosso território.

Esses solos, Figura 9, têm preferência por áreas de relevo mais acidentado e desgastado, contrastando com as áreas planas onde os latossolos são mais comuns. Os Argissolos Vermelho-Amarelos podem se apresentar desde solos muito arenosos até aqueles com altos teores de argila dispersa, cada um com suas características únicas e específicas para trabalhar com eles.

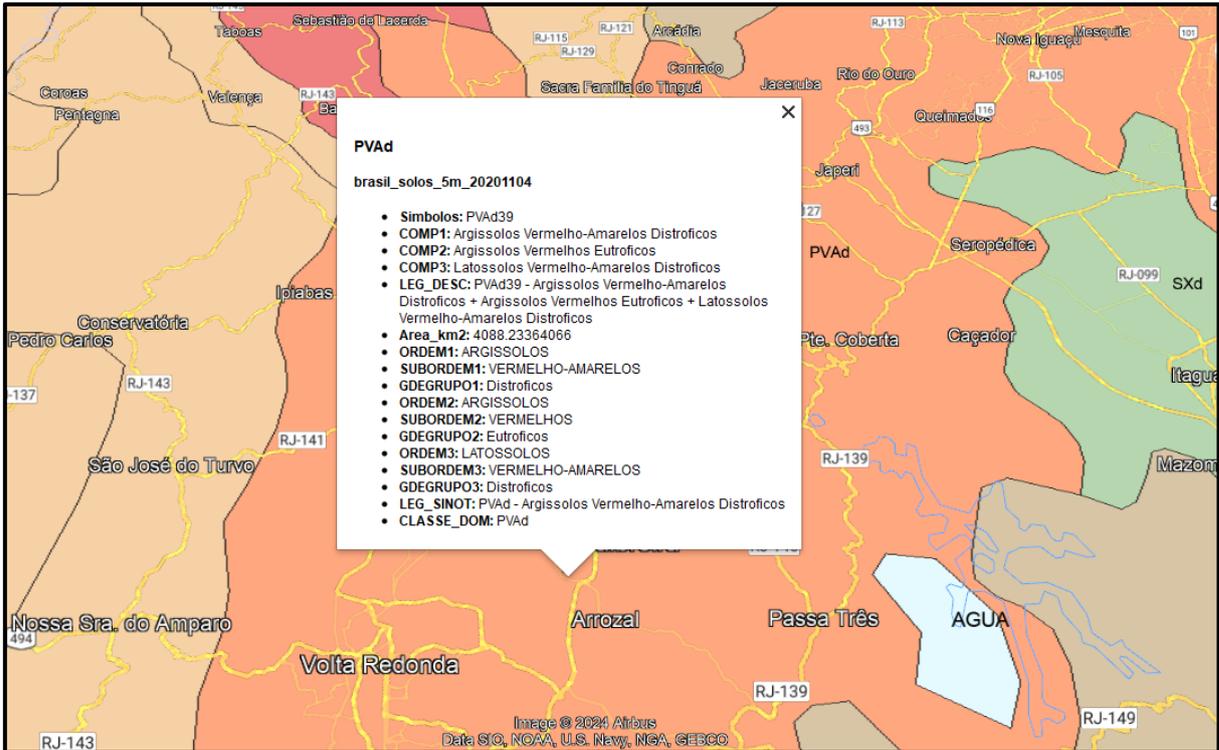


Figura 9: Mapa de solos da Embrapa da região de Pinheiral

O depósito onde o solo foi extraído apresenta coloração acastanhada com baixa cobertura do solo. Ressalta-se, ainda, que a presença de cascalho pode ser observada em substrato arenoso, facilmente identificado de forma visual e tátil, conforme ilustrado na Figura 10.



Figura 10: Vista da jazida onde foi extraído o primeiro solo

De acordo com estudos conduzidos por Zaroni e Santos (2021), regiões tropicais apresentam um processo pedogenético acelerado influenciado por um clima quente e úmido, assim como uma intensa ação da água e a presença de organismos. Quanto maior a disponibilidade de água, mais intensas são as reações de intemperismo químico, resultando em solos com uma proporção maior de minerais secundários, refletindo a alteração do material original.

Os autores concluem que, em condições tropicais, predominam solos caulínicos, lateríticos e ricos em óxidos de ferro, alumínio e titânio, caracterizados por serem altamente

intemperizados e geralmente com baixa a muito baixa fertilidade. Essas informações são cruciais para engenheiros que precisam projetar em áreas sem acesso a laboratórios, pois indicam a presença de solos com um número significativo de óxidos que podem ser efetivamente estabilizados usando emulsões do tipo catiônico.

#### 4.3.1.2 Município de Três Rios

Três Rios é um município brasileiro do estado do Rio de Janeiro. O município está localizado na Região Geográfica intermediária de Petrópolis e na Região Geográfica contígua de Três Rios-Paraíba do Sul. A cidade fica cerca de 125 km ao norte da capital do estado. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população estimada para 1º de julho de 2021 era de 82.468 habitantes, ocupando uma área de 322.843 km<sup>2</sup>.

Conforme dados da prefeitura de Três Rios (2024), o município é composto pela cidade de Três Rios, além do distrito de Bemposta. Sua área de influência estende-se por toda a região Centro-sul Fluminense, parte da região Serrana Fluminense e uma pequena parte da Zona da Mata Mineira. Três Rios é cortada por duas grandes rodovias federais (BR-040 e BR-393) e por uma grande ferrovia (Estrada de Ferro Central do Brasil), tornando-se o maior entroncamento rodoferroviário do país.

Está disponível no site do INMET (2024), dados climáticos da estação meteorológica de Três Rios. De acordo com dados do instituto, a precipitação anual em Três Rios é de aproximadamente 1.217 mm. As chuvas mais intensas ocorrem em janeiro e fevereiro. Os meses mais secos são junho e julho. A umidade relativa do ar registrada é alta, em torno de 80% ao longo do ano. Estas informações podem ser consultadas nos gráficos da Figura 11.

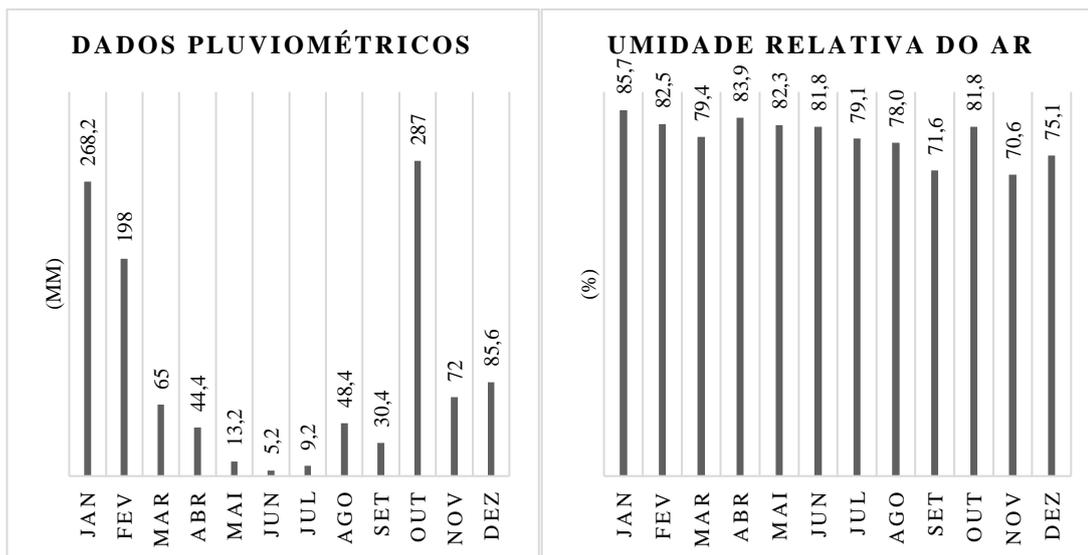


Figura 11: Dados pluviométricos e umidade relativa da estação meteorológica de Três Rios (INMET)

A radiação solar também é alta, com picos de 4000 KJ/m<sup>2</sup> no verão. As temperaturas são amenas, com estas variando entre 18 e 27°C, apresentando uma maior amplitude térmica do que a registrada em Resende, conforme gráficos da Figura 12.

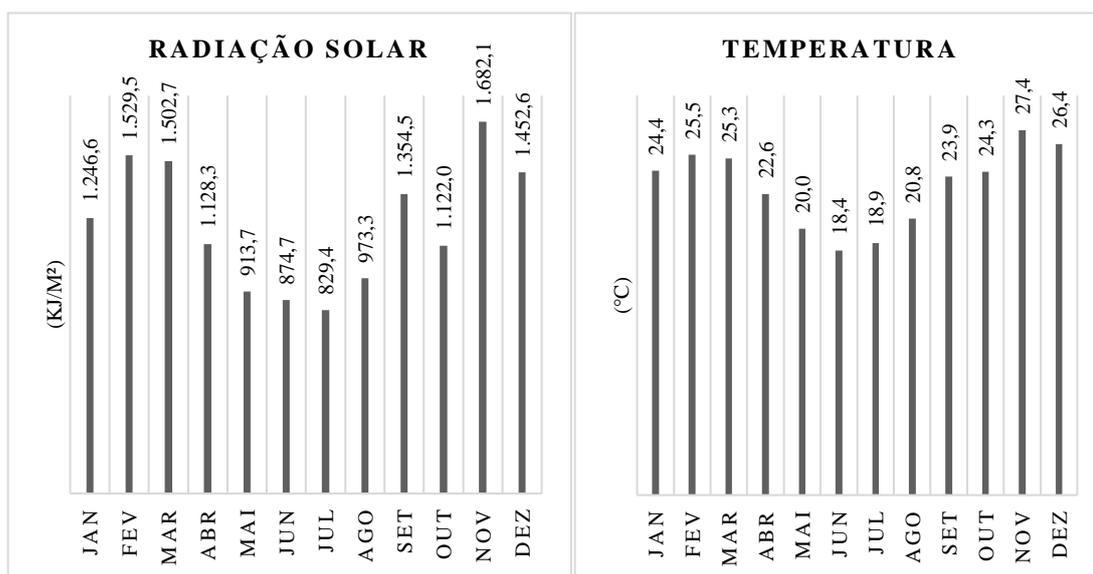


Figura 12: Dados de radiação e amplitude térmica da estação meteorológica de Três Rios (INMET)

O material foi coletado na faixa de domínio da Rodovia BR-040 (Rodovia Juscelino Kubitschek), como mostrado na Figura 13. Esta área está localizada na latitude 22° 9'28.42"S e longitude 43° 9'26.12"O, no município de Três Rios. Antes da coleta, foi escavado um fosso de 50 cm às margens da rodovia.

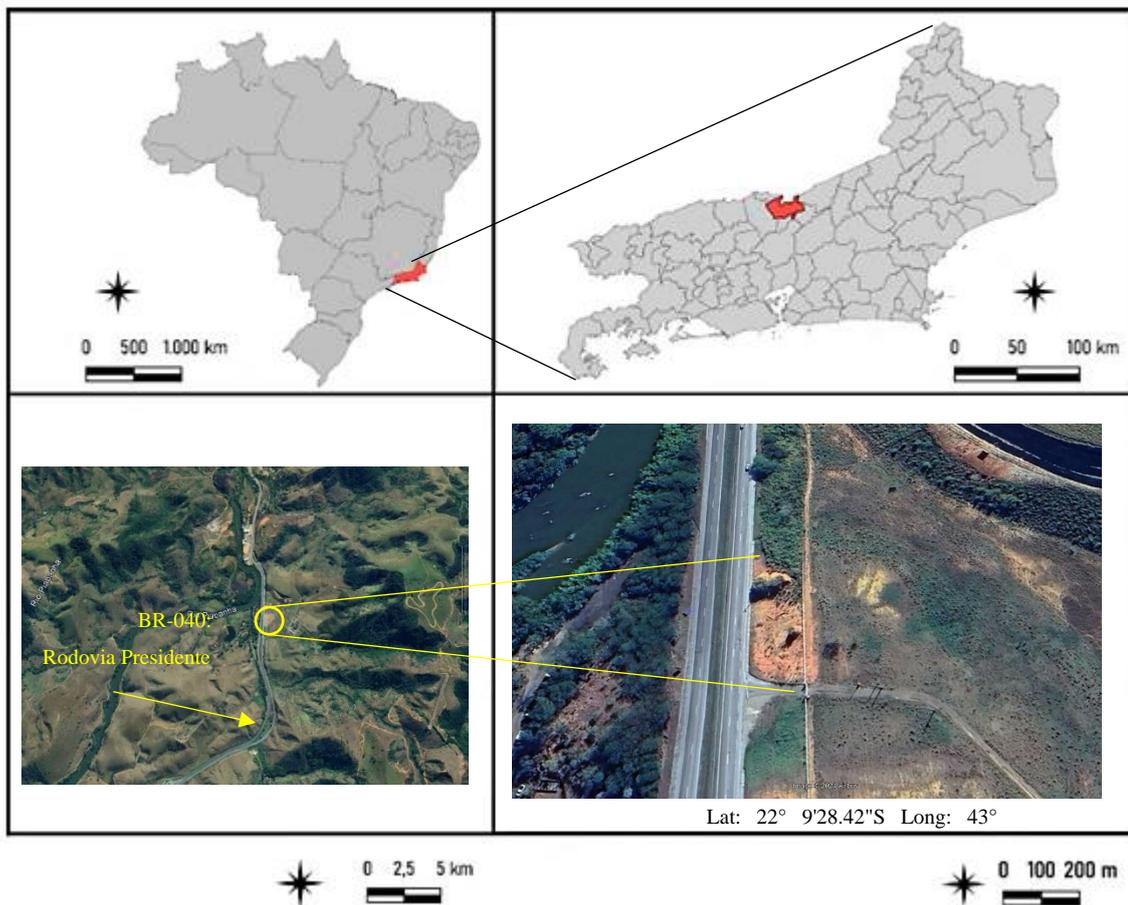


Figura 13: Localização donde foi extraído o segundo solo

No mapa de solos da Embrapa, Figura 14, o solo é classificado como PVD1 e pode apresentar diversas características, conforme descrito na tabela. Os argissolos vermelhos distróficos são solos que variam em textura e comportamento, refletindo suas propriedades desde a superfície até as camadas mais profundas.

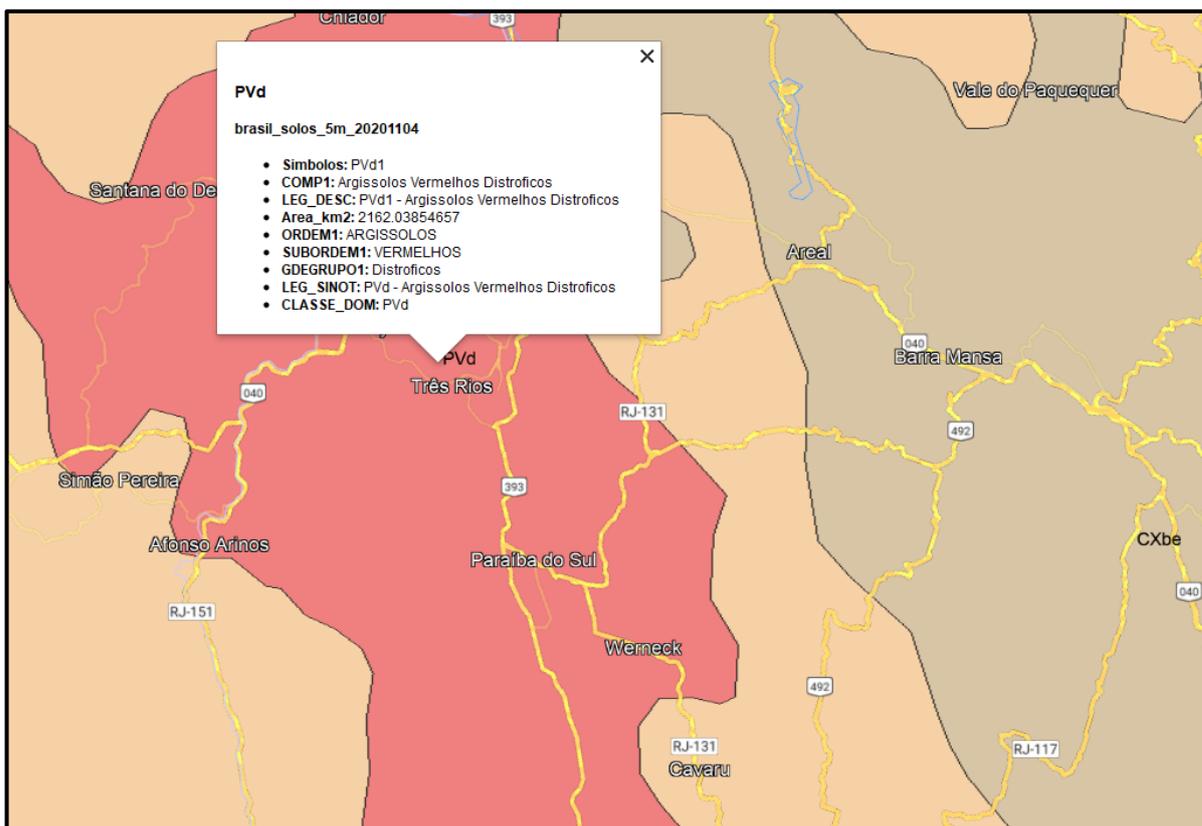


Figura 14: Mapa de solos da Embrapa da região de Três Rios

Os solos arênicos são arenosos até 50-100 cm, sujeitos à erosão pela permeabilidade. Planossólicos têm alta argila dispersa, podendo formar lençol de água temporário. Solos abruptos plânticos e abruptos têm infiltração de água dificultada, suscetíveis à erosão, com plintita indicando drenagem limitada. Nitossólicos e latossólicos têm horizontes específicos, refletindo processos de formação distintos. Os úmbricos têm boa estrutura superficial e carbono, mas baixa fertilidade. Solos típicos não têm características restritivas, mostrando variedade dentro da classificação.

Em toda a região de onde o solo foi extraído, os afloramentos apresentam uma coloração avermelhada. Visualmente não há cascalhos nem pedregulhos, e, ao tocar, é possível se verificar que se trata de um solo fino e com a presença de areia fina em sua composição. Ao raspar o solo com a pá, o solo fica esbranquiçado. Estas características podem ser visualizadas na Figura 15.



Figura 15: Vista da faixa de domínio da BR-040 donde foi extraído o segundo solo

#### 4.2.1.3 Coleta do fresado (CBUQ)

O fresado foi coletado na rodovia BR-116 utilizando a fresadora PM20, rodovia Presidente Dutra, durante obra de manutenção no revestimento asfáltico do pavimento rodoviário, próximo a subida da serra das Araras, sentido Rio de Janeiro x São Paulo.

As fresadoras de pavimento desempenham um papel crucial na indústria da construção, permitindo a remoção eficiente e controlada de pavimentos asfálticos e de concreto.

De acordo com o fabricante, a fresadora PM620, Figura 16, é uma fresadora de meia pista projetada para realizar a remoção controlada em profundidade de pavimentos asfálticos e de concreto em uma única passagem. Sua capacidade de alta produção e manobrabilidade a tornam uma escolha preferencial em diversas obras de infraestrutura.



Figura 16: Fresadora PM620 em operação na BR-116

O sistema de corte da PM620 é projetado para proporcionar eficiência e precisão durante o processo de fresagem. Suas especificações incluem:

- a) Largura de Fresagem: Com uma largura de fresagem de 79,1 polegadas (200,914 cm), a PM620 pode cobrir uma área significativa em cada passagem.

b) Número de Bits: Equipada com 178 bits, a fresadora garante uma cobertura completa e uniforme da superfície a ser fresada: Figura 17.



Figura 17: Bits da fresadora PM620

c) Velocidades do Rotor: Com opções de 100, 109 e 118 rpm, o rotor pode ser ajustado para atender às necessidades específicas de fresagem.

d) Profundidade Máxima de Fresagem: Com capacidade para fresar até 13 polegadas de profundidade (33,02 cm), a PM620 é capaz de lidar com uma variedade de espessuras de pavimento. Na Figura 18 é possível verificar a precisão da fresagem bem como a sua profundidade de cerca de 5 cm.



Figura 18: Profundidade da fresagem realizada na BR-116

e) Potência Nominal: Equipada com um motor Cat C18 de 630 HP, a fresadora oferece a potência necessária para operações de fresagem de alta intensidade.

f) Velocidade Máxima de Fresagem: Com uma velocidade de fresagem de 328 pés por minuto (6 km/h), a PM620 é capaz de realizar o trabalho de forma rápida e eficiente.

g) Velocidade Máxima de Viagem: Opera com uma velocidade máxima de viagem de 3,7 milhas por hora (6 km/h).

h) **Peso Operacional:** Com um peso operacional de 73.260 libras (33,24 ton), a fresadora oferece estabilidade durante a operação.

O transporte deste equipamento, Figura 19, para o local da obra requer uma cuidadosa análise, dado seu considerável peso e a baixa velocidade operacional. Embora houvesse sinalização adequada ao longo da via, indicando a presença de obras, foi preocupante observar que os veículos continuavam transitando em alta velocidade, muitas vezes em proximidade com os equipamentos e trabalhadores, com alto potencial de riscos de acidentes. Esta situação evidencia a necessidade de adotar medidas adicionais para prevenir acidentes durante a execução do projeto ao longo da via.



Figura 19: Comboio que acompanha a fresadora durante a operação

#### ***4.3.2 Caracterização física e química das amostras***

Com a finalidade de caracterizar o solo quanto aos seus parâmetros físicos e químicos, estes foram trazidos ao laboratório do Lesfer/Coppe/UFRJ para realização dos ensaios. O material foi quarteado e acondicionado em bombonas para prévia utilização.

Conforme a necessidade de cada ensaio, o material era seco em estufa por 24h, peneirado e utilizado de acordo com as exigências da norma balizadora. A caracterização física e química seguiu o roteiro conforme organograma da Figura 20.

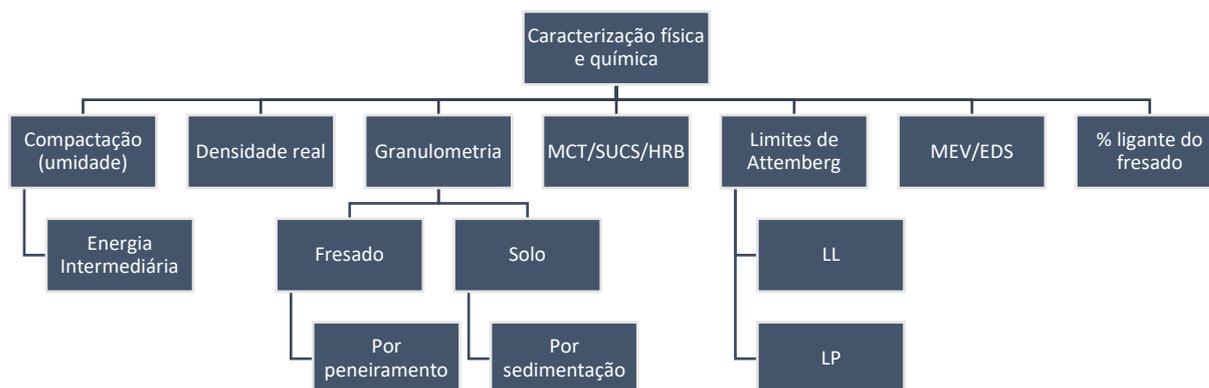


Figura 20: Organograma da caracterização física e química do solo

#### 4.2.2.1 Caracterização física das amostras

A caracterização física do material utilizado neste estudo foi balizada conforme padronização dos ensaios descritos nas normas elencadas na Tabela 9.

Tabela 9: Ensaios e normas

Ensaio	Título da norma	Número da norma
Granulometria	Análise granulométrica por peneiramento	DNER-ME 080/94
Sedimentação	Análise granulométrica	DNER-ME 051/94
LL	Determinação do Limite de Liquidez	DNER-ME 122/94
LP	Determinação do Limite de Plasticidade	DNER-ME 082/94
Compactação	Compactação utilizando amostras não trabalhadas	DNIT 164/2013: ME
Umidade	Solos: Determinação do teor de umidade	DNER-ME 213/94
Densidade Real	Solos: Determinação da densidade real	DNER-ME 093/94
% de betume	Misturas betuminosas: percentagem de betume	DNER-ME 053/94
MCT	Solos: Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura: Classificação	DNIT 259/2023: CLA
SUCS, HRB	Associação Americana de Autoridades Estaduais de Rodovias e Transportes	AASHTO, 2003

#### a) **Granulometria: Análise granulométrica por peneiramento (DNER-ME 080/94):**

Este ensaio determina a distribuição granulométrica do material, ou seja, a quantidade de partículas com diferentes tamanhos presentes em uma amostra de solo. É realizado por meio do peneiramento da amostra em uma série de peneiras com aberturas específicas. O peneiramento foi realizado com agitador de peneiras da soloteste, conforme pode ser visualizado na Figura 21.



Figura 21: Peneirador elétrico da Soloteste

**b) Sedimentação: Análise granulométrica (DNER-ME 051/94):**

Este ensaio também determina a distribuição granulométrica do material em sua parte mais fina, mas utiliza o princípio de sedimentação para a análise utilizando a Lei de Stokes, que é um princípio fundamental na física que descreve o comportamento do movimento de partículas em um fluido viscoso, como ocorre na sedimentação. Esta lei, estabelece a relação entre a força de arrasto exercida sobre uma partícula imersa em um fluido e a sua velocidade de sedimentação. A amostra é dispersa em água e a velocidade de sedimentação das partículas é medida, permitindo calcular a distribuição do tamanho das partículas, conforme Figura 22.

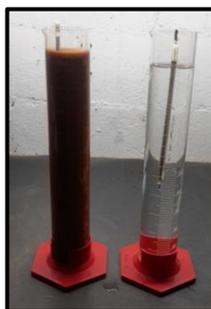


Figura 22: Sedimentação

De acordo com as informações fornecidas por Massad (2020, pág. 64), os grãos esféricos com uma densidade de  $27 \text{ KN/m}^3$  e um diâmetro de  $0,074 \text{ mm}$  (correspondente à peneira 200), dispersos em água a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , apresentam uma taxa de sedimentação de  $0,5 \text{ cm/s}$ . Esse dado é crucial para compreender o comportamento desses grãos em suspensão e o funcionamento do ensaio

**c) LL: Determinação do Limite de Liquidez (DNER-ME 122/94):**

O Limite de Liquidez é o teor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico. Este ensaio determina esse valor através da utilização de um equipamento chamado Concha de Casagrande, Figura 23. A umidade do solo é ajustada até que a ranhura se

feche em uma distância de 12 mm a 15 mm em 25 golpes padronizados. A umidade correspondente a esse ponto é denominada limite de liquidez.



Figura 23: Concha de Casagrande

De acordo com Massad (2020, pág. 109), o limite de liquidez é definido como a medida do espaçamento entre as partículas de solo, no qual as forças atrativas são reduzidas a um ponto em que a resistência ao cisalhamento é aproximadamente de 2,5 KPa. Seguindo a análise da pasta do solo na concha do aparelho de Casagrande, com um ângulo de atrito de  $30^\circ$  e uma pressão neutra de 0,4 KPa, conforme discutido por Croney e Coleman (1954), obtemos a seguinte relação:  $S = C' + 0,4 \times \tan(30^\circ) = C' + 0,23$  KPa. Dessa forma, a coesão efetiva do solo no limite de liquidez é de 2,5 KPa.

**d) LP: Determinação do Limite de Plasticidade (DNER-ME 082/94):**

O Limite de Plasticidade é o teor de umidade no qual o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido, é o estado limite em que o solo perde sua plasticidade. Este ensaio determina esse valor através da formação de cilindros de solo. O ensaio consiste em moldar um corpo cilíndrico sobre placa de vidro esmerilhada similar utilizando o molde de 3 mm sem se fragmentar, Figura 24.



Figura 24: Placa de vidro esmerilhada e molde

**e) Compactação: Compactação utilizando amostras não trabalhadas (DNIT 164/2013):**

Este ensaio determina a relação entre o teor de umidade e o grau de compactação de uma amostra de solo. É realizado por meio da compactação da amostra em um molde com energia de compactação controlada. Para esta pesquisa, utilizou-se o compactador elétrico da Soloteste.

As amostras foram compactadas em cilindro tripartido, de 10 x 20 cm, compactando a amostra por amassamento, em 10 camadas de 2 cm e na energia intermediária, conforme pode ser visualizado na Figura 25.



Figura 25: Compactador de solos

**f) Umidade: Solos: Determinação do teor de umidade (DNER-ME 213/94):**

Este ensaio tem como objetivo determinar o teor de umidade presente em uma amostra de solo, ou seja, a quantidade de água contida no solo. Para isso, utiliza-se uma estufa aquecida a 100°C e cápsulas de alumínio, conforme Figura 26.



Figura 26: Cápsulas de alumínio e bandeja com solo para secagem em estufa a 100°C

**g) Densidade Real: Solos: Determinação da densidade real (DNER-ME 093/94):**

A densidade real dos solos é uma medida que expressa a quantidade de sólidos presentes em uma amostra de solo, excluindo os vazios entre as partículas. É calculada dividindo-se a massa dos sólidos pelo volume total da amostra, excluindo os vazios preenchidos com água e ar. Esta medida é importante na caracterização dos solos, pois fornece informações sobre sua compactação, porosidade e capacidade de suporte de carga. A densidade real dos solos varia de acordo com sua composição e história geológica, e pode influenciar diversos aspectos, como a drenagem, a permeabilidade e a fertilidade do solo. Para se alcançar esse objetivo é necessário

aquecer o picnômetro até a fervura para que todo ar seja expulso e se tenha apenas água e grão de solo no recipiente, conforme pode ser visto na Figura 27.



Figura 27: Densidade real dos grãos do solo

**h) % de betume: Misturas betuminosas: percentagem de betume (DNER-ME 053/94):**

O ensaio de retirada de ligante utilizando rotarex, Figura 28, e percloroetileno é um método comumente empregado na determinação do teor de asfalto em misturas asfálticas. Nesse processo, uma amostra da mistura é dissolvida em percloroetileno no equipamento rotarex, que agita a amostra em alta velocidade. O percloroetileno dissolve os constituintes asfálticos, deixando apenas o material sem ligante. Após a agitação, a solução é filtrada e o material sem ligante é pesado. A diferença entre o peso inicial da amostra e o peso do material sem o ligante fornece o teor de asfalto na mistura, permitindo a avaliação da qualidade e composição da mesma. Este ensaio é crucial na indústria de pavimentação para garantir que as misturas asfálticas atendam às especificações de projeto e padrões de qualidade.



Figura 28: Rotarex e fresado asfáltico

**i) MCT (Miniatura, Compactado, Tropical): Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura: Classificação**

O ensaio e classificação dos solos finos tropicais para finalidades rodoviárias, conforme a norma citada, são realizados com base na metodologia MCT (Miniatura, Compactado, Tropical).

O ensaio Mini-MCV (Miniatura, Compactado, Tropical) é executado para determinar os coeficientes  $c'$ ,  $d'$  e  $Pi'$ , a partir dos quais é calculado o índice  $e'$ . Com base nos valores de  $c'$  e  $e'$ , é possível classificar a amostra de solo de acordo com sua localização em um gráfico específico. A classificação considera critérios como a inclinação da curva  $Pi$  versus Mini-MCV e a concavidade da curva Mini-MCV versus  $hc$  (altura de compactação).

Coeficiente de argilosidade ( $c'$ ): É um parâmetro que indica a presença de argila no solo e está relacionado com a coesão do material.

Coeficiente  $d'$  ( $d'$ ): É um coeficiente que, juntamente com o índice de laterização ( $e'$ ), indica se o solo possui comportamento laterítico ou não laterítico. O valor de  $d'$  é obtido a partir da curva de compactação para um determinado número de golpes.

Perda de massa por imersão ( $Pi$ ): É um parâmetro que representa a perda de massa de um solo quando submetido à imersão em água.

Índice de laterização ( $e'$ ): É um índice que, em conjunto com o coeficiente  $d'$ , indica se o solo possui características lateríticas. O valor de  $e'$  é calculado a partir da Equação  $e' = \sqrt{(Pi'/100 + 20d'/S)}$ , sendo  $S$  o número de golpes.

Os subgrupos dos solos lateríticos e não lateríticos são classificados de acordo com suas características específicas.

**j) Solos Lateríticos:**

i) Grupo LA (Laterítico Arenoso): São solos pouco coesivos, com alto módulo de resiliência, compostos principalmente por areias com poucos finos. Apresentam-se em formato de grumos subarredondados e tendem a ter colorações avermelhadas devido à oxidação do ferro.

ii) Grupo LA': São solos adequados para a construção de base e sub-base de pavimentos. Possuem razoável coesão e alto módulo de resiliência, sendo compostos por areias argilosas e finos lateríticos.

iii) Grupo LG': São solos que podem apresentar elevada contração em camadas compactadas, menor capacidade de suporte e módulo de resiliência. Compostos por argilas, argilas siltosas, argilas arenosas e siltes argilosos.

**k) Solos Não Lateríticos:**

i) Grupo NA (Não Laterítico): São solos pouco expansivos, com baixo coeficiente de argilosidade. Os melhores solos deste grupo são aqueles próximos ao grupo LA, compostos por quartzos e/ou micas nas frações de areias, siltes e suas misturas.

ii) Grupo NA': Podem apresentar coeficiente de argilosidade médio. Solos com alta porcentagem de finos podem ter elevada expansão, sendo os piores. Os melhores são próximos aos grupos LA e LA', com módulo de resiliência satisfatório.

iii) Grupo NS': São solos muito resilientes, não recomendados como camada final de terraplenagem ou para constituir misturas de solo-agregado. Compreendem siltes e siltes arenosos, com coeficiente de argilosidade baixo a médio.

iv) Grupo NG': Apresentam alto coeficiente de argilosidade, elevada expansão, plasticidade, compressão e contração. Compostos por argilas, argila siltosa, argila arenosa e silte argiloso, não sendo indicados para camadas nobres.

Referências normativas como a DNER: CLA 259/94 e estudos como o de Nogami e Villibor (1981) são fundamentais para embasar a classificação e o entendimento dos solos tropicais para fins rodoviários.

Na Figura 29, é possível se verificar o ensaio de perda de massa por imersão de solo não coesivo.



Figura 29: Ensaio de perda de massa por imersão

#### **I) (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e HRB (Highway Research Board):**

A classificação de solos é fundamental para diversas aplicações de engenharia, como construção de estradas, fundações, barragens, entre outras. Os principais sistemas de classificação utilizados são o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos) e o HRB (Highway Research Board). As tabelas para o enquadramento e classificação do solo nestes sistemas, encontram-se no Anexo 3.

#### 4.2.2.2 Caracterização química das amostras

##### 4.2.2.2.1 MEV/EDS

O MEV/EDS é um sistema de microscopia eletrônica que combina a técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com a espectroscopia de energia dispersiva de raios X (EDS). Esse sistema é utilizado para analisar a composição elementar e a estrutura de materiais em escalas micro e nano.

O MEV funciona através do bombardeamento do material com um feixe de elétrons de alta energia. Esse feixe interage com a superfície do material e produz elétrons secundários que são detectados e transformados em uma imagem de alta resolução. A imagem gerada permite uma visualização detalhada da superfície e topografia do material.

Já a técnica de EDS é utilizada para identificar os elementos químicos presentes no material. Quando o feixe de elétrons do MEV interage com o material, ele também produz raios X característicos dos elementos presentes na amostra. Esses raios X são detectados pelo detector de EDS e transformados em um espectro de energia, que permite identificar os elementos presentes na amostra e sua concentração. A preparação da amostra e equipamento utilizado pode ser visualizado Figura 30.



Figura 30:Preparação da amostra de solo para análise no MEV/EDS

A caracterização química foi realizada no laboratório do Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável Numats/POLI/COPPE/UFRJ.

##### 4.2.2.2.2 pH e Intemperismo

Os ensaios foram realizados no laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, Figura 31.



Figura 31: Solos sendo preparados e bancada de ensaios da Geotecnia/COPPE/UFRJ

Baseados no Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (2023), o programa de ensaios para análise de solos é detalhado em várias etapas cruciais:

a) Medição do pH: O pH do solo é medido eletronicamente utilizando o aparelho Hanna Mod.: Edge e um eletrodo combinado (Hanna: mod: HI11310) imerso em uma suspensão solo: líquido ( $H_2O$  e  $KCl$  1N) na proporção 1:2,5. Esta medição é crucial, pois a diferença entre os valores de pH em  $H_2O$  e em  $KCl$  pode indicar a predominância de cargas no solo: um pH maior em  $H_2O$  sugere predominância de cargas negativas, enquanto um pH menor em  $H_2O$  indica predominância de cargas positivas.

b) Ataque Sulfúrico: A amostra de solo, previamente calcinada para determinar a perda ao fogo (obtida pela diferença de peso entre o solo calcinado a  $550^{\circ}C$  e o solo seco a  $105^{\circ}C$ ), é tratada com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  1:1). O extrato resultante é analisado para determinar os teores de Ferro ( $Fe_2O_3$ ) e Alumínio ( $Al_2O_3$ ). O resíduo da reação é tratado com hidróxido de sódio ( $NaOH$  0,5N), e a sílica ( $SiO_2$ ) é quantificada no extrato. O resíduo final é calcinado a  $1000^{\circ}C$  para calcular a porcentagem de material primário não atacado pelo tratamento (% Res.).

c) Determinação de  $Fe_2O_3$  (%): Este ensaio é realizado por complexometria utilizando ácido etilenodiaminotetracético (EDTA), com ácido salicílico como indicador, permitindo a quantificação precisa do teor de óxido de ferro no solo.

d) Determinação de  $Al_2O_3$  (%): A quantificação de óxido de alumínio é também feita por complexometria com EDTA. O ferro é previamente removido por precipitação, e o Xylenol Orange é usado como indicador para garantir a precisão da análise.

e) Determinação de  $SiO_2$  (%): A sílica no solo é determinada por colorimetria utilizando molibdato de amônio, que desenvolve um composto amarelo que absorve luz no comprimento de onda de 410 nm. A leitura é realizada no Espectrofotômetro Shimadzu UV-mini 1240, proporcionando uma análise precisa da concentração de sílica.

f) Índices de Intemperismo ( $K_i$  e  $K_r$ ): Esses índices são calculados pelas relações moleculares de sílica/alumina ( $K_i$ ) e sílica/sesquióxidos ( $K_r$ ). O  $K_i$  é obtido a partir dos valores de % de  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$ , divididos pelos respectivos pesos moleculares. O  $K_r$  é calculado a partir

dos valores de % de  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , também divididos pelos seus respectivos pesos moleculares. Estes índices são fundamentais para entender o grau de intemperismo e as transformações mineralógicas do solo.

Os ensaios descritos são fundamentais para determinar a carga líquida do solo, que é crucial para a correta escolha da carga iônica da emulsão asfáltica utilizada na estabilização de solos.

A medição do pH do solo é essencial porque a diferença entre os valores de pH em  $\text{H}_2\text{O}$  e em KCl indica a natureza das cargas no solo. Se o pH em  $\text{H}_2\text{O}$  for maior do que em KCl, o solo tem predominância de cargas negativas; se for menor, tem predominância de cargas positivas. Essa informação é vital para selecionar a emulsão asfáltica com a carga iônica adequada (aniônica ou catiônica) para garantir uma boa interação e estabilização do solo.

O ataque sulfúrico e a subsequente análise de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$  ajudam a entender a composição mineralógica do solo. Solos ricos em óxidos de ferro e alumínio tendem a ter cargas positivas em condições ácidas, enquanto a sílica contribui para cargas negativas em condições neutras a alcalinas. Conhecer a composição mineralógica auxilia na previsão de como o solo irá interagir com diferentes tipos de emulsões asfálticas.

A quantificação da sílica é importante porque a sílica geralmente contribui para cargas negativas no solo. Solos com alto teor de sílica pode ser mais adequados para emulsões aniônicas, que possuem carga negativa e são mais compatíveis com solos de carga negativa.

Os índices de intemperismo ajudam a entender o grau de intemperismo e a estabilidade mineral do solo. Solos mais intemperizados tendem a ter maior presença de argilas, que possuem cargas superficiais que interagem de forma significativa com as emulsões asfálticas. Conhecer esses índices permite ajustar a formulação da emulsão asfáltica para otimizar a estabilização do solo.

O  $K_i$  e  $K_r$  são calculados em função dos teores molares de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , pelas seguintes expressões:  $K_i = (\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) \cdot 1,7$  e  $K_r = (\text{SiO}_2/0,6)/(\text{Al}_2\text{O}_3/1,02 + \text{Fe}_2\text{O}_3/1,60)$

Quando os índices de intemperismo  $K_i$  ou  $K_r$  são menores que 2, isso indica que o solo sofreu um grande intemperismo químico. Esse fenômeno reflete a extensão da decomposição mineral que o solo passou. O resíduo que não é decomposto pela análise química geralmente corresponde à quantidade de quartzo presente na amostra.

Durante o intemperismo, os feldspatos e outros minerais primários se decompõem, resultando na formação de argilas e outros minerais secundários. Essa decomposição química

libera componentes como alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), e sílica ( $\text{SiO}_2$ ). A proporção desses componentes é o que determina os coeficientes  $K_i$  e  $K_r$ . O  $K_i$  (relação sílica/alumina) e o  $K_r$  (relação sílica/sesquióxidos) são usados para avaliar o grau de intemperismo e a estabilidade mineral do solo. Valores baixos de  $K_i$  e  $K_r$  indicam solos fortemente intemperizados, em que a maior parte dos minerais primários foram decompostos, deixando um resíduo composto principalmente de minerais secundários como quartzo.

Esses ensaios fornecem uma compreensão detalhada da química e da mineralogia do solo, o que é essencial para a seleção adequada da emulsão asfáltica. A escolha correta da emulsão, baseada na carga líquida do solo, é crucial para garantir uma boa adesão, estabilidade e durabilidade do pavimento. Por exemplo, emulsões catiônicas são geralmente usadas em solos com cargas negativas predominantes, enquanto emulsões aniônicas são mais adequadas para solos com cargas positivas. Essa seleção ajuda a melhorar a interação entre o solo e a emulsão, resultando em pavimentos mais resistentes e duráveis.

#### **4.3.3 Escolha da Emulsão**

Compreender a estrutura mineralógica e as cargas iônicas do solo é essencial para selecionar a emulsão mais adequada para a sua estabilização.

Além disso, neste trabalho, foi estabelecida uma limitação para a dosagem da emulsão com base no princípio da economicidade. A dosagem de emulsão para a estabilização do solo varia entre 1% e 6%, equilibrando a eficiência técnica e os custos envolvidos. Esta abordagem assegura que a estabilização seja realizada de forma econômica, sem comprometer a qualidade técnica do solo estabilizado.

A emulsão foi fornecida pela empresa BETUNEL em galões de 5l. Estas foram alocadas em garrafas PET de dois litros para facilitar a utilização, Figura 32. Além disso, é necessário manter uma rotina de recirculação da emulsão a cada 5 dias para que não ocorra seu rompimento e, conseqüentemente, o CAP vá se acumulando no fundo do recipiente, alterando as características da emulsão e dos ensaios.



Figura 32: Garrafas para armazenagem de emulsão asfáltica

#### 4.3.4 *Preparação das amostras*

A compactação do solo foi realizada em molde tripartido (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura), Figura 33, na energia proctor intermediária. A energia de compactação foi distribuída em 10 camadas, aplicando-se 27 golpes por camada. A compactação foi realizada no mesmo molde utilizado para confeccionar os corpos de prova do ensaio triaxial.



Figura 33: molde tripartido

A energia intermediária foi escolhida para realizar os ensaios no estudo devido à hipótese de que o solo estabilizado com emulsão asfáltica poderia ser utilizado na sub-base de um pavimento rodoviário de baixo tráfego ou como subleito estabilizado. Nesse contexto, a energia de compactação intermediária foi considerada representativa das condições de compactação que o solo estabilizado poderia encontrar nessas aplicações específicas.

Foi analisada a melhor forma de misturar a emulsão ao solo: Na primeira forma, metade da água foi utilizada para homogeneizar o solo e a outra metade utilizada para diluir a emulsão, e, em seguida, para ser misturada ao solo homogeneizado. No segundo procedimento, toda a água foi incorporada à emulsão, o que resultou em uma mistura menos viscosa. Em seguida, o solo foi homogeneizado. A segunda forma de homogeneizar o solo demonstrou ser mais eficaz, pois como pode ser visto na Figura 34, pois mais grãos foram envolvidos pelo CAP da emulsão asfáltica.



Figura 34: I (solo), II (solo + água+ emulsão + água de diluição) e III (solo+ emulsão diluída)

Para verificar a eficiência do método, um CP sem emulsão e outro com emulsão foram imersos em água por 24h, conforme imagens da Figura 35.



Figura 35: Solo imerso em água por 24h (1h de ensaio)

Como é possível verificar na Figura 36, o CP moldado com a técnica escolhida permitiu que o composto solo emulsão ficasse protegido da desagregação, demonstrando que a emulsão foi espargida de forma homogênea por todo solo.



Figura 36: Solo e solo emulsão após 24h de imersão

Calculou-se a quantidade de água a ser acrescentada à mistura (solo + emulsão), cujo resultado total de água no solo estabilizado fosse igual a umidade ótima do solo. Para entender melhor o procedimento, segue o exemplo para estabilização do solo com 2% de emulsão:

- i. O solo foi retirado da estufa (100°C) e colocado para resfriar em ambiente refrigerado por 1h.
- ii. Após secagem, o solo foi destorroado e em seguida peneirado na peneira com abertura 25 mm, exigência normativa para os ensaios de MR e DP, que limitam

o diâmetro máximo do grão do solo em  $\frac{1}{4}$  do diâmetro do molde tripartido. Uma amostra de 4 Kg foi, então, separada.

- iii. Sabendo que na emulsão RL há 62% de CAP e que a umidade do solo é de 9,44%, então o percentual de água a ser acrescentada está descrita nas equações 1, 2 e 3.

$$W_{ot} = \frac{9,44}{100} \times 4000g = 377,6 \text{ ml}$$

$$W_{emulsão} = \frac{62}{100} \times \frac{2}{100} \times 4000g = 49,6 \text{ ml}$$

$$\text{Sendo 1 e 2: } 377,6 - 49,6 = 328 \text{ ml}$$

Desta forma 80 g de emulsão foi adicionada a 328ml de água

- iv. A mistura de água + emulsão foi espargida sobre o solo, Figura 37. Por fim, duas cápsulas foram colhidas para checar a umidade.



Figura 37: Homogeneização do solo com emulsão asfáltica

A seguir, será descrito como os corpos de prova de solo e fresado foram moldados. O plano experimental para a preparação e moldagem das amostras seguiu o seguinte procedimento:

**a) CP1: 50% fresado + 50% de saibro**

A moldagem dos corpos de prova foi realizada da seguinte maneira:

- O solo seco foi peneirado na abertura de 1 polegada até atingir 2 kg de solo peneirado.
- Os 2 kg de fresado quarteados foram peneirados e separados utilizando a mesma abertura de peneira.

- Foi reservado 8,22% de água (328,8 ml): Wot(composto).
- Os 2 kg de saibro foram destorroados no almofariz.
- O molde tripartido foi montado no compactador elétrico, acoplado com um soquete de 2,5 kg, programado para 27 golpes por camada.
- O solo e o fresado foram misturados em uma bandeja limpa e, em seguida, a água foi adicionada gradualmente até obter uma mistura homogênea. Cerca de 100g de material homogeneizado foram separados em 2 cápsulas de alumínio para conferir a umidade e colocados na estufa.
- Usando um copo de PVC, aproximadamente 300g da mistura foram colocados no molde tripartido e nivelados até atingir uma altura de 3 cm, e então compactados.
- Após cada compactação, a altura do solo compactado foi medida até o topo do cilindro, que deveria ter aproximadamente 18 cm. Caso a altura não fosse adequada, ajustes seriam feitos na próxima camada. Esse processo foi repetido até completar 10 camadas. Ao final de cada compactação, a superfície do solo compactado foi sulcada com uma espátula para garantir uma melhor aderência entre as camadas.
- Após o ensaio, o corpo de prova foi pesado com o molde, e as cápsulas foram pesadas antes de serem colocadas na estufa.
- O corpo de prova foi desmoldado e deixado sobre a mesa por 7 dias com identificação do dia da moldagem, peso e peso das cápsulas, e dia do ensaio na prensa triaxial.

**b) CP2: 50% fresado + 50% de solo siltoso + 1% de emulsão asfáltica**

- As etapas de preparação seguiram um processo similar ao do CP1, com ajustes específicos para a adição de emulsão asfáltica.
- O solo seco foi peneirado até obter 2 kg de solo peneirado com abertura de 1 polegada.
- Os 2 kg de fresado foram quarteados e separados usando a mesma abertura de peneira.
- Foi reservada uma quantidade de água correspondente a (11,08%:  $38\%*1\%$ ), totalizando 428 ml.
- A emulsão asfáltica do tipo RL foi recirculada por 5 minutos e 40 g foram reservadas.
- A mistura de água e emulsão asfáltica foi reservada em um Becker limpo.
- Os 2 kg de solo siltoso foram destorroados no almofariz.
- O molde tripartido foi montado no compactador elétrico com um soquete de 2,5 kg, programado para realizar 27 golpes por camada.

- A mistura de solo e fresado foi feita em uma bandeja limpa, e aos poucos, a mistura de água e emulsão foi adicionada até que tudo ficasse homogêneo. Cerca de 100g dessa mistura foram separados em 2 cápsulas de alumínio para análise de umidade e colocados na estufa.

- Utilizando um copo de PVC, aproximadamente 300 g da mistura foram colocados no molde tripartido e nivelados até atingir uma altura de 3 cm, seguido pela compactação da primeira camada. Ao final da compactação, a camada deveria ter 2 cm de altura. Esse processo foi repetido até completar 10 camadas, ajustando a altura conforme necessário. Ao final de cada compactação, a espátula foi passada no solo compactado para criar sulcos e permitir uma melhor aderência entre as camadas.

- Após o ensaio, o CP foi pesado com o molde, assim como as cápsulas, antes de serem colocados na estufa.

O CP foi então desmoldado e deixado sobre a mesa por 7 dias, com identificação do dia da moldagem, peso e peso das cápsulas, e dia do ensaio na prensa triaxial

Para os próximos corpos de prova, CP3 (50% saibro + 50% de fresado + 2% emulsão), CP4 (50% de fresado + 50% solo siltoso), CP5 (30% de fresado + 70% de saibro) e CP6 (30% de fresado + 70% de solo siltoso + 1% de emulsão), CP7 (30% de fresado + 70% de saibro + 2% de emulsão) e CP8 (30% de fresado + 70% de solo siltoso) o processo de moldagem foi realizado nos dias subsequentes, seguindo um roteiro semelhante, com ajustes de materiais e proporções conforme especificados para cada amostra.

#### **4.3.5 Compactação das amostras e secagem**

Após a preparação das amostras, conforme visto no item 4.2.4, 6 corpos de prova foram moldados na energia intermediária de compactação no molde tripartido.

Os solos um e dois foram compactados utilizando-se 6 diferentes percentuais de emulsão asfáltica.

Cada percentual de emulsão asfáltica corresponde a diferentes porcentagens de estabilização com CAP. Para facilitar o entendimento do cálculo e sabendo que a emulsão possui 62% de CAP, para se determinar o quantitativo de CAP na amostra, basta multiplicar o peso da amostra pelo percentual de emulsão e pelo percentual de CAP, exemplo:

$$X \text{ g de solo estabilizado vai possuir } X \cdot \frac{K_1}{100} \cdot \frac{62}{100} \text{ g de CAP}$$

Assim sendo, foram moldados 6 corpos de prova para cada tipo de solo, variando o percentual de emulsão de um a seis por cento do peso seco do solo em molde tripartido, Figura 38.



Figura 38: CPs estabilizados com emulsão asfáltica

A quantidade de água deveria ser a mesma em todos os CPs, pois o objetivo era analisar apenas a influência do CAP no composto.

Em seguida eles foram dispostos na mesma posição que foram moldados para secarem ao ar por 7 dias.

Além dos seis solos estabilizados com diferentes percentuais de emulsão, um solo controle (sem emulsão, mas com mesmo percentual de umidade) foi moldado e passou pelo mesmo processo em todas as etapas. A secagem dos CPs pode ser conferida na imagem da Figura 39.

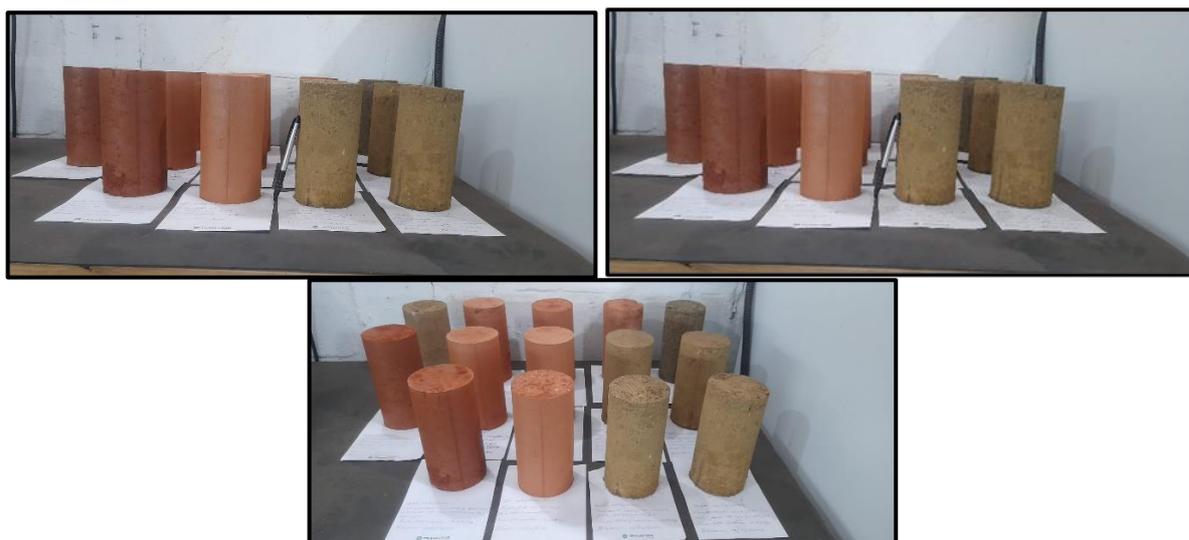


Figura 39: Secagem dos corpos de prova no laboratório

#### 4.4 Ensaio de tração por compressão diametral utilizando pórtico Lottman

O ensaio de compressão diametral, foi criado pelo Prof. Fernando Luiz Lobo Carneiro, durante a abertura da Avenida Presidente Vargas, no Rio de Janeiro, em 1943. Para deslocar a

igreja de São Pedro, que estava no caminho da avenida, foram usados rolos de concreto. O professor propôs um novo método para determinar a resistência à tração dos concretos, utilizando cilindros deitados na máquina de ensaio. Esse método se mostrou eficaz e é amplamente utilizado na engenharia civil.

A ABNT NBR 7222/94 estabelece o método para determinar a resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos de concreto, argamassa e outros materiais. O ensaio consiste em aplicar uma carga de compressão ao longo do diâmetro do corpo de prova até a sua ruptura. A resistência à tração é calculada a partir da carga de ruptura e das dimensões do corpo de prova.

O ensaio de tração por compressão diametral (TCD) foi utilizado para determinar a dosagem da estabilização asfáltica. Neste processo, o solo é submetido a diferentes percentuais de emulsão asfáltica, variando de 1% a 6%. Todos os solos passaram pelo processo de ruptura e foram testados utilizando uma multiprensa. Foi considerada apenas a parte superior do corpo de prova, já que a parte inferior tende a ficar mais compacta devido à influência do fundo rijo durante o amassamento.

Para realização do ensaio de tração por compressão diametral, foi utilizada uma multiprensa com apoio de um pórtico Lottman, conforme pode ser visto Figura 40.



Figura 40: Multiprensa e pórtico Lottman

Os ensaios foram feitos com a metade do CP moldado no molde tripartido. O CP foi cuidadosamente dividido ao meio com o auxílio de uma serra elétrica, garantindo uma separação precisa e uniforme da parte superior e inferior, conforme pode ser visualizado Figura 41.



Figura 41: Serra elétrica cortando o CP

Como os corpos de prova foram moldados por amassamento, foi considerado os resultados apenas da metade superior do corpo de prova, estes então foram levados à multiprensa para ensaio, conforme Figura 42.



Figura 42: CPs cortados na multiprensa

Para realização do ensaio, a carga axial foi aplicada continuamente, com crescimento constante da tensão de tração a uma velocidade de  $(0,05 \pm 0,02)$  MPa/s, até a ruptura do corpo de prova.

A resistência à tração por compressão diametral é calculada pela fórmula da equação 15.

$$\sigma = (2 \cdot F) / (\pi \cdot d \cdot L) \quad \text{Eq. 15}$$

Sendo:

$\sigma$  = resistência à tração por compressão diametral (MPa)

F = carga máxima obtida no ensaio (kN)

d = diâmetro do corpo de prova (mm)

L = altura do corpo de prova (mm)

O maior valor obtido no ensaio de tração por compressão diametral foi selecionado para as etapas seguintes.

#### 4.5 Deformação permanente e resiliente em múltiplos estágios

Para método deste estudo, utilizou-se o a técnica de solicitações em multiestágio com 10.000 ciclos de carregamento por par de tensão. Os ensaios foram realizados na umidade ótima do solo *in natura*, sendo este do tipo drenado, totalizando 50 mil ciclos de aplicação de carga e uma frequência de 2 Hz (com 0,1 s de aplicação de carga e 0,4 s de repouso). Utilizando-se moldes cilíndricos de 100 x 200 mm com amostras passantes na peneira 25,4 mm (1 pol).

Os testes de carregamento em multiestágio foram realizados seguindo a norma europeia EN-13286-7 (CEN, 2004a). Essa norma apresenta dois conjuntos de níveis de tensão, designados como "nível de estresse alto" e "nível de estresse baixo". Cada conjunto é dividido em cinco sequências. Cada uma dessas sequências contém vários pares de tensões solicitantes, com uma tensão de confinamento constante e 10.000 ciclos de carregamento. Para os testes realizados aqui, as sequências foram aplicadas utilizando o "nível de estresse baixo", condizente com as tensões a que o material estaria submetido em campo. Na Tabela 10 estão relacionadas as tensões utilizadas neste trabalho conforme explicitado.

Tabela 10: Relação entre as tensões solicitantes

Estágio	$\sigma_1$	$\sigma_3$	$\sigma_d$	$\sigma_d / \sigma_3$
1	105	70	35	1/2
2	140	70	70	1
3	210	70	140	2
4	280	70	210	3
5	350	70	280	4

Os valores de carga selecionados levaram em consideração a proporcionalidade das cargas típicas devido à especificidade do procedimento, considerando avaliações adicionais com base no conhecimento atual da literatura. A escolha dessas combinações de tensões considerou a profundidade e as cargas típicas encontradas em sub-bases e subleitos de pavimentos rodoviários, em conformidade com o procedimento experimental da norma europeia mencionada e revisão da literatura. Algumas dessas cargas foram medidas utilizando o software de modelagem MEDINA, considerando aumentos relevantes de interesse. O Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas é uma ferramenta que pode ser usada para calcular tensões e deformações em estruturas de pavimentos com até oito camadas.

Foi utilizado a energia intermediária de compactação, considerando a hipótese de que o solo aprimorado pudesse ser empregado na sub-base de um pavimento rodoviário. No topo da sub-base, a tensão confinante é de aproximadamente 0,07 MPa. Portanto, a intenção foi

investigar o comportamento desse solo estabilizado na energia de compactação mencionada nessas condições de contorno.

Segundo Salomão Pinto e Simões Preussler (2010), o reforço do subleito é uma camada integrante do pavimento, caracterizada por uma espessura que se mantém constante transversalmente, mas que pode variar longitudinalmente, conforme o projeto de dimensionamento. Esta camada é executada sobre um subleito previamente regularizado, sendo composta geralmente por um solo argiloso selecionado, que apresenta características físicas de alta resistência. A principal função do reforço do subleito é proporcionar melhores condições de suporte em comparação ao subleito original, além de ser capaz de absorver e distribuir as cargas transmitidas pelas camadas superiores do pavimento.

Ainda conforme explicado pelos autores, a utilização do reforço do subleito é típico em pavimentos de elevada espessura, o que pode ser indicativo de um subleito de baixa qualidade ou que apresenta irregularidades, muitas vezes associado a condições de tráfego intenso e pesado. A subbase, por sua vez, é uma camada intermediária situada entre o subleito reforçado e a base do pavimento. Em rodovias de grande importância, que suportam tráfego pesado, a inclusão da subbase na estrutura do pavimento é comum, a menos que o solo do subleito possua qualidade excepcional.

A subbase pode ser composta por uma ou mais camadas de materiais adequadamente compactados, sendo que a disponibilidade de materiais de boa qualidade em jazidas de empréstimo geralmente determina a escolha desses materiais. É fundamental que a subbase apresente estabilidade, alta capacidade de suporte e uma boa capacidade de drenagem, reduzindo a suscetibilidade a variações volumétricas. O uso de materiais granulares ou estabilizados na subbase é frequente, e essa camada se diferencia da base por exigir menos resistência, plasticidade e graduação dos materiais que a constituem. Ainda assim, o material utilizado na subbase deve ser de melhor qualidade que o do subleito ou do reforço do subleito.

Quando os solos do subleito são de baixa qualidade, diferentes projetos alternativos devem ser considerados, definindo seções transversais com ou sem subbase. A escolha da alternativa mais adequada deve considerar a disponibilidade e o custo relativo dos materiais. As tensões de compressão geradas pelas cargas no pavimento diminuem com a profundidade, mas o material diretamente acima do subleito ainda é submetido a tensões ligeiramente superiores àquelas que atuam sobre o subleito. Diversos materiais alternativos têm sido

empregados com sucesso, e a experiência local pode ser um indicativo na escolha desses materiais, com especial atenção à determinação da espessura mínima da base e do revestimento, dependendo da constituição da subbase.

Além de sua função estrutural principal, a subbase desempenha funções secundárias importantes, como prevenir a intrusão ou o bombeamento do solo do subleito na base, o que, caso ocorra de forma contínua, pode levar à deterioração do pavimento. O bombeamento está associado a três condições fundamentais: a frequência de cargas pesadas, a presença de solos de granulometria fina que possam ser transportados pela água, e a presença de água livre no pavimento, geralmente resultante de infiltrações pelas laterais ou trincas. Para evitar o acúmulo de água livre, o material da subbase deve possuir boas características de drenagem, ou devem ser instalados dispositivos de drenagem, como colchões drenantes e drenos, entre outros. Além disso, a subbase proporciona uma plataforma de trabalho para os equipamentos pesados utilizados durante a construção do pavimento, concluem os autores.

Para estudar o comportamento da curva elástica e plástica, no intervalo definido de 10000 ciclos de carregamento, utilizou-se uma função exponencial, equações 16 e 17:

$$\varepsilon_p(N) = a \cdot N^b \quad \text{Eq. 16}$$

$$\varepsilon_r(N) = a \cdot N^b \quad \text{Eq. 17}$$

Sendo:

$\varepsilon_p(N)$  é a função que correlaciona o ciclo de carregamento e a DP

$\varepsilon_r(N)$  é a função que correlaciona o ciclo de carregamento e a DR

a é o fator multiplicador

b o coeficiente de forma

Os primeiros pesquisadores a aplicarem este modelo foram (MONISMITH, OGAWA E FREEME; 1975). Utilizar essa função tem suas vantagens: podemos determinar a taxa de crescimento da função em milímetros por ciclo, assim como a área sob a curva, em milímetros vezes ciclos, conforme equações 18 a 21. Contudo, há uma dificuldade inerente à função quando o número de ciclos, N, tende ao infinito. Isso ocorre porque, mesmo quando o material alcança o estado de estabilidade, a função de deformação permanente, DP(N), continua a crescer. Em resumo, embora as funções exponenciais sejam eficazes dentro de um intervalo conhecido de ciclos de carga, enfrenta-se limitações ao tentar prever o comportamento do material em longo prazo, quando exposto a um número muito grande de ciclos.

$$\varepsilon_p'(N) = a \cdot b \cdot N^{b-1} \cdot dN \quad \text{Eq. 18}$$

Sendo:

$\varepsilon_p'(N)$  é a derivada da função  $\varepsilon_p(N)$

$$\varepsilon_r'(N) = a \cdot b \cdot N^{b-1} \cdot dN \quad \text{Eq. 19}$$

Sendo:

$\varepsilon_r'(N)$  é a derivada da função  $\varepsilon_r(N)$

$$E_p(N) = \frac{a}{b+1} \cdot N^{b+1} + c \quad \text{Eq. 20}$$

Sendo:

$E_p(N)$  é a integral da função  $\varepsilon_p(N)$

$$E_r(N) = \frac{a}{b+1} \cdot N^{b+1} + c \quad \text{Eq. 21}$$

Sendo:

$E_r(N)$  é a integral da função  $\varepsilon_r(N)$

Em diversos ensaios, foi preciso ajustar mais de uma equação aos resultados obtidos, uma vez que os valores das taxas acumulativas de deformação permanente variavam. Nestes casos, as áreas abaixo das curvas foram calculadas conforme equações 22 e 23.

Região plástica

$$E_p(N) = \int_0^a \varepsilon_p dN + \int_a^{10000} \varepsilon_p dN \quad \text{Eq. 22}$$

Região elástica

$$E_r(N) = \left( \int_0^a \varepsilon_r dN - \int_0^a \varepsilon_p dN \right) + \left( \int_a^{10000} \varepsilon_r dN - \int_a^{10000} \varepsilon_p dN \right) \quad \text{Eq. 23}$$

Na Figura 43, tem-se um gráfico que mostra como a relação entre  $\text{Log}[\varepsilon_p(N)]$  e  $\text{Log}(N)$  pode ser representada por uma reta. No entanto, é possível perceber que essa reta não segue exatamente a inclinação dos pontos reais obtidos durante o experimento. Isso significa que é necessário um ajuste mais complexo, usando pelo menos duas funções, para que a curva representativa acompanhe de forma mais precisa o comportamento do acúmulo de deformação permanente que foi medindo.

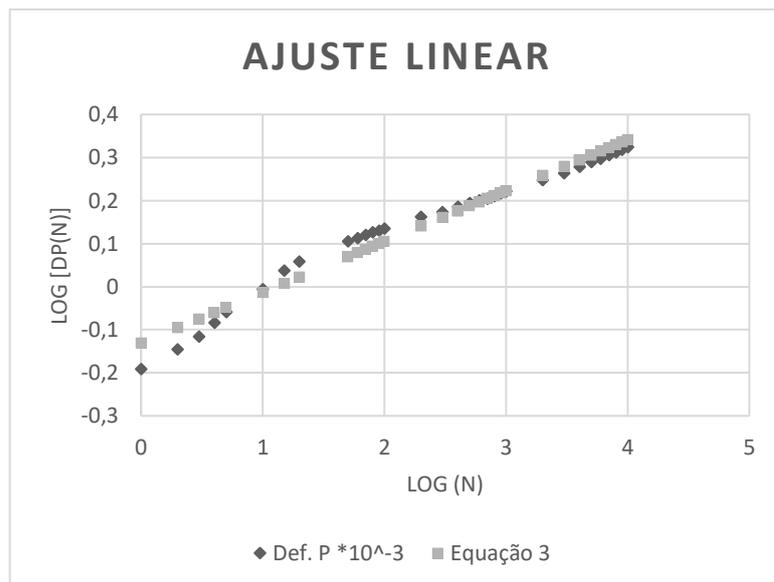


Figura 43: Ajuste linear a curva de deformação permanente

Foi realizada uma análise do desempenho da curva de deformação permanente (DP) e deformação resiliente (DR) com base em 9 pontos determinados, conforme Figura 44. Esses pontos foram escolhidos para avaliar tanto a taxa de crescimento das deformações quanto o crescimento cumulativo das regiões plásticas e elásticas ao longo do tempo.

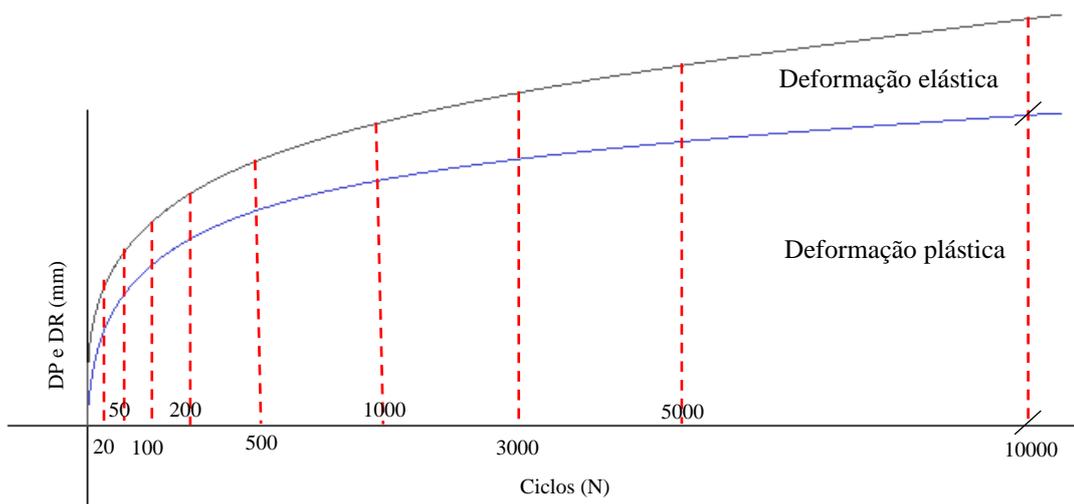


Figura 44: Pontos para análise da DP e DR

Salour e Erlingsson (2017) ressaltam que a principal vantagem de utilizar o carregamento multiestágio para modelar rodovias é a capacidade de submeter um único espécime a uma sequência de diferentes níveis de estresse. Isso reflete as variações de carga experimentadas pelo material no campo. Essa abordagem é particularmente valiosa, pois as condições reais de tráfego envolvem uma variedade de magnitudes de carga que afetam o material de maneiras distintas. Dessa forma, ao conduzir testes com carregamento multiestágio,

é possível obter uma compreensão mais abrangente e representativa do comportamento do pavimento, sem precisar preparar e testar várias amostras separadas. Esse método economiza tempo e recursos que seriam necessários para conduzir testes individuais para cada condição de carga.

Ainda segundo os autores a deformação permanente dos materiais não ligados em pavimentos e subleitos tem recebido menos atenção do que seu comportamento resiliente, principalmente devido ao longo tempo necessário para realizar os testes de deformação permanente. Tais testes demandam a simulação de várias aplicações de carga sob diferentes condições ambientais e de carga. Contudo, nos últimos anos, vários estudos têm se dedicado a estabelecer procedimentos, desenvolver técnicas e criar modelos preditivos para caracterizar a deformação permanente desses materiais. A maioria dos modelos preditivos se baseia em dados experimentais obtidos a partir de testes RLT de estágio único.

O modelo de deformação permanente desenvolvido por Tseng e Lytton (1989), e posteriormente adotado no Guia de Projeto de Pavimentos Mecânico-Empírico (ME PDG) ARA (2004), integra os efeitos do estado de estresse do material com o número de ciclos de carga. Ele pressupõe uma relação direta entre a deformação permanente e a deformação resiliente. Para um teste RLT de estágio único, o modelo é representado pela equação 24.

$$\varepsilon_p(N) = \varepsilon_r \varepsilon_0 e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad \text{Eq. 24}$$

Sendo:

$\varepsilon_r$  é a deformação resiliente no N-ésimo ciclo de carga, e  $\varepsilon_0$ ,  $\rho$  e  $\beta$  são parâmetros do material.

De acordo com o ME PDG (ARA 2004), o parâmetro  $\beta$  pode ser estimado com base no teor de umidade gravimétrica,  $W_c$  (%), equação 25.

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638 \cdot W_c \quad \text{Eq. 25}$$

É possível se observar que quando equação utilizada no *software* tende ao infinito, a função deformação permanente tende a  $\varepsilon_r \varepsilon_0$ .

Yaghoubi et al. (2023) explicam que há vários modelos disponíveis para prever como os agregados de demolição reciclados e materiais granulares não ligados se deformam ao longo do tempo, especialmente quando sujeitos a ciclos de carga. Um desses modelos, proposto por Tseng e Lytton (1989) na Equação 26, é amplamente utilizado. Este modelo estabelece uma relação entre a deformação permanente acumulada e o número de ciclos de carga, sendo especialmente útil em testes de um único estágio, conhecidos como RLT. No entanto, no estudo

em questão, foram realizados testes de cinco estágios. Para melhorar a precisão das previsões sobre a deformação permanente, um novo parâmetro chamado  $\varepsilon_0$  foi adicionado ao modelo, conforme descrito na Equação 27. Esse parâmetro representa a deformação permanente esperada ao final do estágio anterior. Essa inclusão permite uma previsão mais precisa das propriedades de deformação permanente ao longo do tempo.

$$\varepsilon_p(N) = \varepsilon_m e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad \text{Eq. 26}$$

Sendo:

$\varepsilon_m$ ,  $\rho$  e  $\beta$  são parâmetros do material.

$$\varepsilon_p(N) = \varepsilon_0 + \varepsilon_m e^{-\left(\frac{\rho}{N}\right)^\beta} \quad \text{Eq. 27}$$

Com a introdução do termo  $\varepsilon_0$ , houve uma alteração na dinâmica da função, e o fator multiplicador  $\varepsilon_m$  deixou de ser uma característica intrínseca da função. Apesar de os autores terem conseguido um bom ajuste para a nova função, essa mudança resultou em uma alteração nas suas características. Como consequência, não é mais possível estabelecer uma relação consistente entre o comportamento da curva ao longo dos vários ciclos de carregamento.

Por isso, optou-se, nesta pesquisa por utilizar a função proposta por Tseng e Lytton (1989). Desta forma, é possível levar a função DP para o infinito e ter um parâmetro de comparação entre cada ciclo de carregamento.

#### 4.5.1 *Análise do Shakedown*

De acordo com Delgado, Guimarães e Motta (2018), a teoria do acomodamento aplicada a solos destinados à pavimentação sugere que, quando as deformações plásticas cessam em um pavimento submetido a carregamento cíclico após um determinado número de aplicações de cargas, o material constituinte de uma ou todas as camadas atingiu o estado de *shakedown*.

No Nível A: *Shakedown* ou acomodamento plástico: o material apresenta deformações elásticas e plásticas até um determinado número de aplicações de carga e, a partir daí, apresenta apenas deformações elásticas, havendo, portanto, um acomodamento das deformações plásticas ou permanentes. Conforme explicado por Werkmeister et al. (2003), quando as curvas no gráfico tendem a ser paralelas ao eixo vertical, isso indica o fenômeno do *shakedown*. Estabeleceu-se que uma taxa de aumento na deformação permanente de cerca de  $10^{-7}$  metros por ciclo de aplicação de carga representa o acomodamento. Diz-se que o material entrou em

*shakedown* quando a carga repetida aplicada é tão pequena que não produz deformações plásticas significativas, sendo todas as deformações completamente recuperadas.

No Nível C, denominado colapso, ocorrem aumentos sucessivos na deformação permanente a cada ciclo de carga, e a resposta do material é sempre plástica. Isso pode levar à ruptura por cisalhamento ou tornar o material inutilizável para pavimentação. Observa-se que a taxa de deformação permanente depende do nível de carga e diminui mais lentamente em comparação com os domínios A e B.

No Nível B, ocorre uma resposta intermediária às solicitações impostas ao material, em que não se pode afirmar se o material entrará em colapso ou se já entrou em *shakedown*. No início dos ciclos de aplicação de cargas, a taxa de aumento da deformação permanente é alta, mas diminui gradualmente até se tornar quase constante. Estas informações podem ser analisadas e conferidas Figura 45.

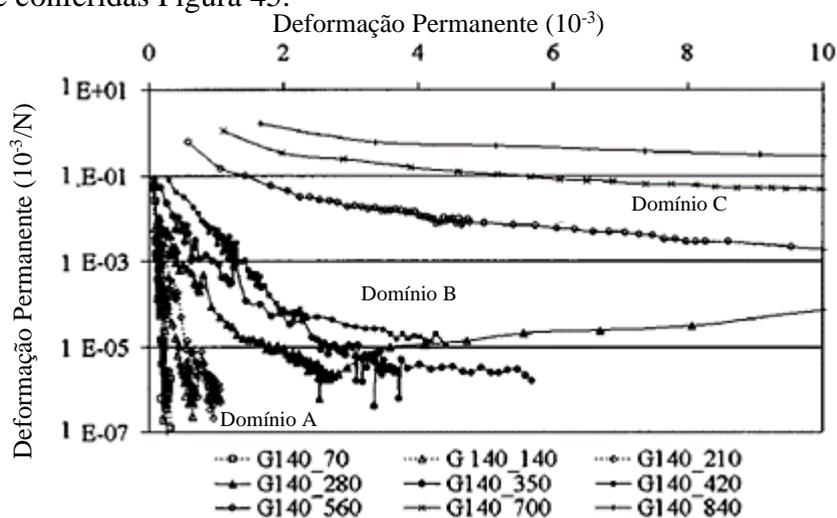


Figura 45: Taxa de deformação permanente vertical versus deformações permanentes verticais, escala logarítmica (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004) - Adaptado pelo autor

Para exemplificar o procedimento, no trabalho de Soliman e Shalaby (2015), os autores classificam diferentes materiais granulares em distintas configurações de umidade, quanto ao nível de *shakedown* utilizando as deformações permanentes num gráfico logaritmo conforme pode ser visto na Figura 46.

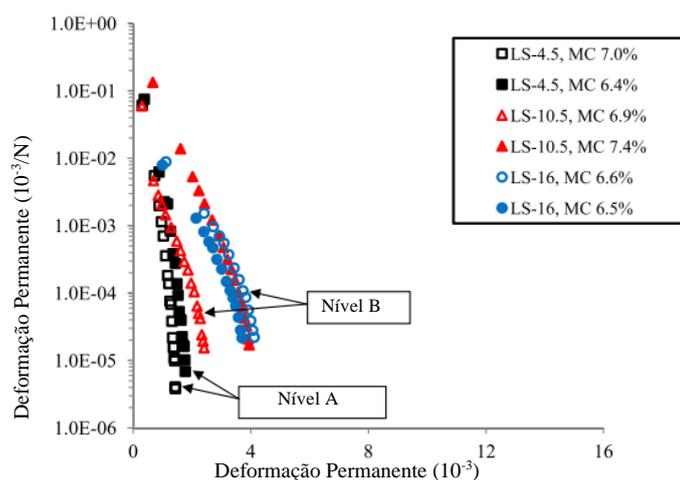


Figura 46: Classificação baseada na deformação permanente (SOLIMAN E SHALABY; 2015): adaptado pelo autor

Pode-se observar na Figura 47 que tanto os espécimes da Faixa A quanto da Faixa B apresentam um nível constante de deformação resiliente durante os testes e que o nível de deformação resiliente depende do nível de carga. Nos casos em que ocorre colapso incremental na Faixa B, as deformações resilientes aumentarão lentamente. No entanto, é observada uma diminuição significativa da deformação resiliente com o aumento do número de ciclos de carga na Faixa C.

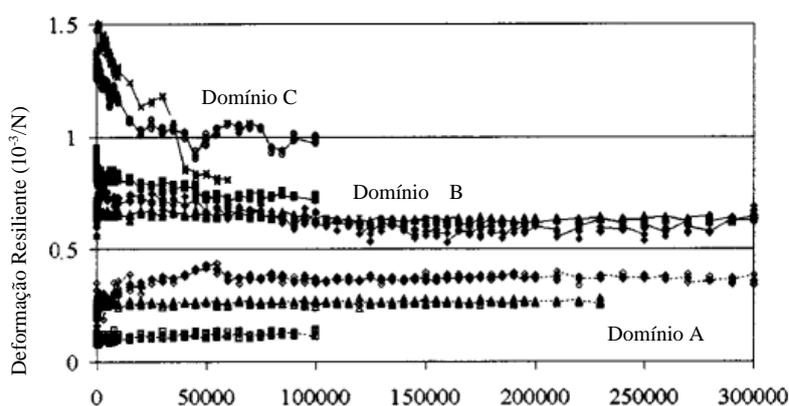


Figura 47: Deformação resiliente vertical versus número de ciclos de carga (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004): Adaptado pelo autor

Os níveis A e B podem ser diferenciados pela deformação resiliente. No nível A, a deformação resiliente aumenta progressivamente com o aumento da razão de tensões  $\sigma_{1max}/\sigma_c$  (WERKMEISTER et al., 2001), resultando em uma variação não linear em relação a essa variável, conforme mostrado na Figura 4, em que  $\sigma_{1max}$  é a soma entre a tensão desvio e a tensão confinante.

Para o nível B, o aumento na deformação resiliente é menor do que no Nível A, com uma transição bem definida entre eles. Além disso, pode-se afirmar que quanto maior a razão de tensões, maior será a deformação resiliente.

Os níveis A e B também podem ser distinguidas com base no comportamento de deformação resiliente. Dentro da Faixa A, as deformações resilientes, embora constantes durante os testes, aumentam progressivamente com o aumento das razões de estresse, exibindo uma resposta não linear de endurecimento ao estresse desviador. Com um aumento adicional na razão de estresse, observa-se um aumento rápido na deformação resiliente na transição para o nível B. Devido a isso, observa-se uma resposta resiliente em duas etapas indicando que o comportamento de deformação nos níveis A e B é diferente. A transição do nível A para a B ocorre em níveis quase iguais de deformações resilientes: em torno de  $0,5 \cdot 10^{-3}$  de deformação, conforme pode ser visto Figura 48.

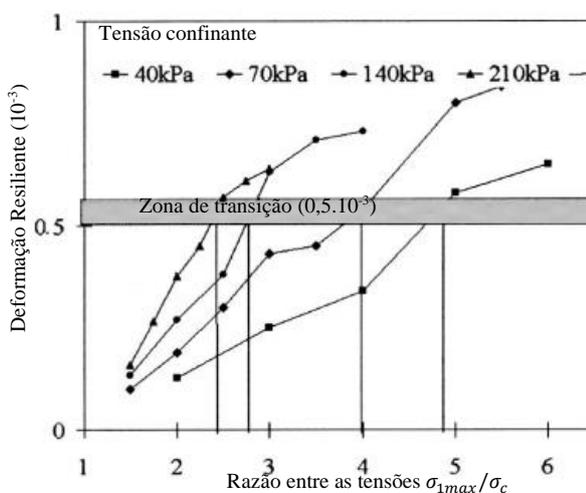


Figura 48: Deformação vertical resiliente versus razão entre tensões (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004): Adaptado pelo autor

A norma Europeia EN 13286-7 (2004), considera que a taxa de deformação permanente acumulada, no intervalo entre 3000 e 5000 ciclos de carregamento pode ser utilizado para se determinar o limite do *shakedown* conforme gráfico da Figura 49:

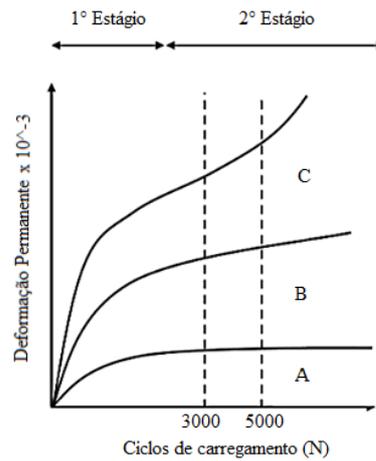


Figura 49: Limites para determinar o domínio de *shakedown*

Para se determinar os limites de *shakedown*, a norma Europeia mencionada admite os seguintes valores:

$$\text{Domínio A: } DP \cdot 10^{-3} < 0,045 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Domínio B: } 0,045 \cdot 10^{-3} < DP \cdot 10^{-3} < 0,4 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Domínio C: } 0,4 \cdot 10^{-3} < DP \cdot 10^{-3}$$

A alteração na deformação resiliente com o aumento do número de ciclos de carga: como mostrado na Figura 50, um material com comportamento de acomodação plástica ou fluência plástica (Nível A ou B) exibe uma deformação resiliente constante, enquanto uma diminuição significativa da deformação resiliente é observada para materiais dentro da zona de colapso incremental (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004).

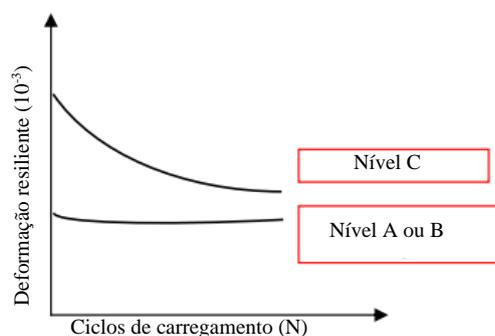


Figura 50: Classificação baseada na deformação e resilientes (WERKMEISTER, DAWSON E WELLNER; 2004): adaptado pelo autor

Para exemplificar o procedimento, no trabalho de Soliman e Shalaby (2015), os autores classificam diferentes materiais granulares em distintas configurações de umidade, quanto ao nível de *shakedown* utilizando as deformações resilientes conforme pode ser visto na Figura 51.

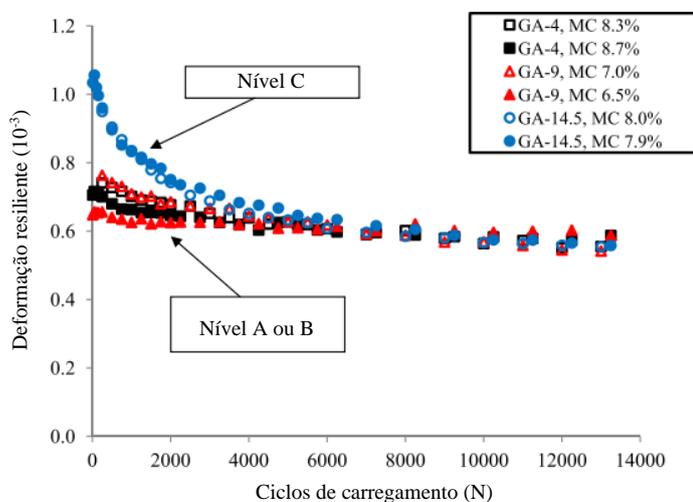


Figura 51: Classificação baseada na deformação resiliente (SOLIMAN E SHALABY; 2015): adaptado pelo autor

#### 4.6 Módulo resiliente

Conforme o trabalho de Werkmeister, Dawson e Wellner (2004), o comportamento de deformação dos materiais pode ser dividido em duas categorias: comportamento estável e instável. Mesmo quando submetidos a pequenas forças, os materiais podem sofrer dois tipos de deformação: resiliente, que é temporária, e permanente, que é duradoura.

Quando se olha como um material responde à aplicação de forças ao longo do tempo, é possível traçar uma curva mostrando a relação entre a tensão (força aplicada) e a deformação

(mudança no tamanho ou forma do material). Em materiais granulares, essa curva não é uma linha reta, mas uma curva não linear. Quando a força é removida, essa curva não segue exatamente o mesmo caminho, mas forma um de laço chamada de histerese, conforme pode ser visualizado na Figura 52.

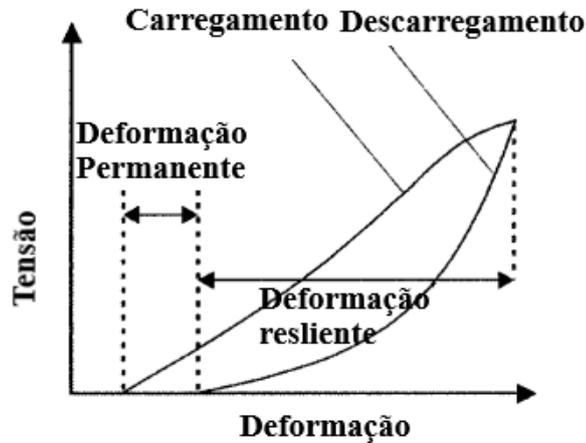


Figura 52: Laço de histerese formado pela deformação do material  
 Fonte: Werkmeister, Dawson e Wellner (2004), adaptado pelo autor

A interpretação desse laço de histerese permite calcular as deformações permanentes (aquelas que permanecem após a remoção da força) e as deformações resilientes (aquelas que retornam ao estado original após a remoção da força) a cada ciclo de carga.

A área dentro do laço de histerese representa o trabalho realizado para deformar o material por unidade de volume, conforme descrito na equação 28. A maior parte desse trabalho é convertida em energia térmica. Isso pode resultar em mudanças nas propriedades do material, eventualmente levando a danos.

$$w = 0,5. \left( \int s. de - \int e. ds \right) \quad \text{Eq. 28}$$

Sendo:

w = Trabalho

s = Tensão

e = Deformação

Portanto, apenas uma pequena parte desse trabalho contribui para a deformação acumulada do material ao longo do tempo.

Os solos ao se deformarem recuperam-se parcialmente, esta parcela recuperável da deformação relacionada com a força solicitante, é conhecido como módulo resiliente. Sua expressão pode ser visualizada na equação 29.

$$MR = \sigma_d / \varepsilon_r \quad \text{Eq. 29}$$

Sendo:

$\sigma_d$  – *tensão desvio*

$\varepsilon_r$  – *deformação vertical recuperável*

A tensão axial aplicada pelo *topcap* sobre o CP, pode avaliada pela equação 30.

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} \quad \text{Eq. 30}$$

Sendo:

$\sigma_1$  – *tensão axial*

$P$  – *Força (N) aplicada em Newtons*

$A$  – *Área do topo do corpo de prova*

Na prensa triaxial, é possível ajustar a tensão desvio, que pode ser definida como a diferença entre a tensão axial e a tensão confinante, conforme expressão da equação 31.

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad \text{Eq. 31}$$

Sendo:

$\sigma_d$  – *Tensão desvio*

$\sigma_3$  – *tensão confinante*

A deformação recuperável é uma medida adimensional, obtida pela expressão 32.

$$\varepsilon_r = \frac{\delta_r}{H_0} \quad \text{Eq. 32}$$

Sendo:

$\varepsilon_r$  – *deformação recuperável (adimensional)*

$\delta_r$  – *Deslocamento recuperável (mm)*

$H_0$  – *altura de referência descontada a deformação plástica (mm)*

A prensa triaxial, registra no banco de dados a deformação recuperável e a deformação plástica, cuja soma se refere a deformação total que o espécime sofreu durante a solicitação axial, conforme a equação 33.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t - \varepsilon_p \quad \text{Eq. 33}$$

Sendo:

$\varepsilon_t$  – *deformação total*

$\varepsilon_p$  – *deformação plástica não recuperável*

A força do atuador mecânico é aplicada no topcap que a distribui sobre a área superior do corpo de prova em análise, por um período de 0,1s, seguido por um tempo de descanso não superior a 0,9s, que correlacionado com o tráfego, simula a passagem de um eixo padrão sobre o pavimento.

O módulo resiliente se correlaciona com as trincas que surgem no pavimento flexível. Quanto maior for a parcela recuperável, mais flexível é o material e maior será sua contribuição para o surgimento de patologias no pavimento, devido as trincas que surgem por fadiga do pavimento asfáltico.

A norma DNIT 134/2018: ME do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) estabelece o método para determinar o módulo de resiliência de materiais para utilização em pavimentação. O ensaio consiste na aplicação de cargas cíclicas em um corpo de prova, medindo-se as deformações recuperáveis, sendo o módulo de resiliência uma propriedade importante para a análise e dimensionamento de estruturas de pavimentos.

Para se calcular o MR do solo, utilizou-se 6 (seis) ciclos de carregamentos com crescentes valores de função desvio e confinante, após 1500 ciclos de acomodação, conforme pode ser visualizado na Tabela.11

Tabela.11: Ciclo de carregamento para cálculo do MR

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_d/\sigma_3$	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	$\sigma_d/\sigma_3$
	0,02	1		0,07	1
0,02	0,04	2	0,07	0,14	2
	0,06	3		0,21	3
	0,035	1		0,105	1
0,035	0,07	2	0,105	0,21	2
	0,105	3		0,315	3
	0,05	1		0,14	1
0,05	0,1	2	0,14	0,28	2
	0,15	3		0,42	3

Ao longo do tempo, diferentes equações foram desenvolvidas para descrever como os materiais utilizados nas camadas inferiores do revestimento asfáltico se comportam elasticamente. Desde 1986, a Associação Americana de Autoridades de Transporte Rodoviário (ASSHTO) recomenda o uso do ensaio de Módulo de Resiliência (MR) para avaliar a estrutura das camadas de base, sub-base e subleito em pavimentos flexíveis. Macedo (1996) demonstrou

estatisticamente que um modelo composto obtido tem um alto coeficiente de determinação, indicando sua aceitabilidade como modelo.

Apesar de existirem diversos modelos para prever o comportamento resiliente do solo, para esta pesquisa utilizou-se o modelo composto para fazer a modelagem dos solos e dos compostos.

O módulo de resiliência é uma medida da capacidade do solo de recuperar sua forma original após sofrer deformação, cujos gráficos 3D do modelo composto podem ser visualizados como exemplo na Figura 53. Os gráficos foram plotados com auxílio do software Systrain.

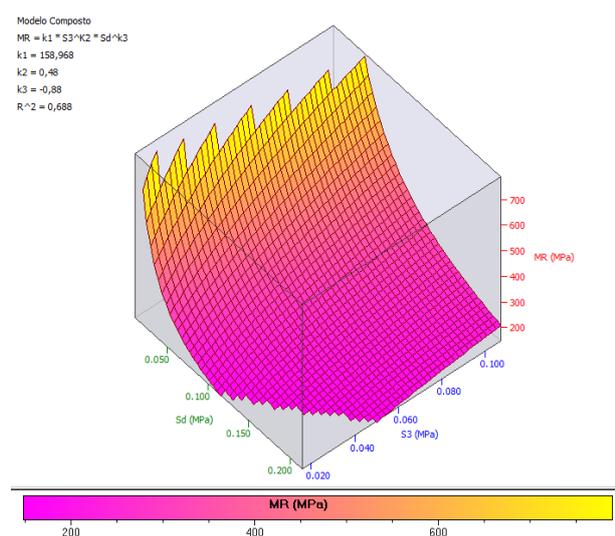


Figura 53: Gráfico 3D do modelo composto

#### 4.7 Análise estatística da deformação plástica e elástica

Para realizar a análise dos fatores e investigar a influência da emulsão asfáltica no comportamento do solo empregando o carregamento multiestágio, utilizou-se o software jamovi.

O jamovi é um software de análise estatística que foi desenvolvido recentemente, mas sua história remonta ao início dos anos 2010. O programa foi concebido como uma alternativa de código aberto e de fácil utilização aos softwares estatísticos mais tradicionais, como o SPSS e o R.

No programa Jamovi, é possível realizar diversos testes de normalidade para verificar se os dados seguem uma distribuição normal, o que é uma premissa importante para muitos testes estatísticos.

O Teste de Shapiro-Wilk é amplamente utilizado para verificar a normalidade, especialmente em amostras pequenas. Testa-se a hipótese nula de que os dados seguem uma distribuição normal. Se o valor de  $p$  for menor que 0,05, a hipótese de normalidade é rejeitada (SHAPIRO; WILK, 1965). O Teste de Kolmogorov-Smirnov, com ajuste de Lilliefors, é outra ferramenta comum para comparar a distribuição dos dados com uma normal teórica, sendo particularmente útil quando os parâmetros são estimados (LILLIEFORS, 1967). Já o Teste Anderson-Darling é uma extensão do teste de Kolmogorov-Smirnov, com maior sensibilidade para desvios nas caudas da distribuição, especialmente para grandes amostras (ANDERSON; DARLING, 1954).

Teste de Shapiro-Wilk: é um dos testes de normalidade mais utilizados, especialmente para amostras pequenas. Este teste avalia a hipótese nula de que os dados foram extraídos de uma distribuição normal. Se o valor de  $p$  for menor que o nível de significância (geralmente 0,05), rejeita-se a hipótese de normalidade.

Teste de Kolmogorov-Smirnov (com ajuste de Lilliefors): compara a distribuição dos dados com uma distribuição normal teórica. O teste Kolmogorov-Smirnov com o ajuste de Lilliefors é utilizado principalmente quando os parâmetros da distribuição normal (média e desvio padrão) são estimados a partir dos dados.

Teste Anderson-Darling: Também disponível em algumas extensões do Jamovi, esse teste é uma variante do teste de Kolmogorov-Smirnov, mas dá mais peso às caudas da distribuição. O teste é particularmente útil para detectar desvios significativos da normalidade, especialmente em grandes amostras.

Além dos testes de normalidade, o Jamovi também oferece gráficos diagnósticos, como histogramas e Q-Q plots, que permitem uma inspeção visual da normalidade dos dados.

Porém, para amostras pequenas, o teste de Shapiro-Wilk é geralmente o mais recomendado. Esse teste é amplamente utilizado e reconhecido por ser mais eficaz em detectar desvios da normalidade em conjuntos de dados com tamanhos de amostra pequenos (tipicamente  $n < 50$ ).

Nos conjuntos de dados em que o teste de Shapiro-Wilk não encontrou normalidade, o teste de normalidade não paramétrico utilizado foi Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn para comparações múltiplas pós-hoc. Esses testes são ideais para situações em que não se pode assumir que os dados seguem uma distribuição normal, o que é uma premissa básica para os testes paramétricos, como a ANOVA (ZAR, 2010; SHESKIN, 2003; DUNN, 1964).

O teste de Kruskal-Wallis é uma alternativa não paramétrica à ANOVA de uma via. Este é usado quando se tem dados em múltiplos grupos independentes e se quer verificar se esses grupos vêm da mesma distribuição ou não, sem assumir a normalidade dos dados. O teste verifica se as distribuições de dois ou mais grupos diferem entre si.

O Kruskal-Wallis deve ser utilizado:

- Quando os dados não seguem uma distribuição normal e essa condição não pode ser corrigida por transformações.
- Quando se está lidando com amostras pequenas, onde a suposição de normalidade não pode ser validamente testada.
- Quando os dados são ordinais ou contínuos, mas não atendem aos pressupostos dos testes paramétricos (por exemplo, homogeneidade de variâncias).
- Quando se quer comparar mais de dois grupos independentes, como no caso deste exemplo com vários tratamentos de solo.

O teste de Dunn é um teste pós-hoc aplicado após o Kruskal-Wallis para identificar quais grupos específicos diferem entre si. Enquanto o Kruskal-Wallis apenas informa que há uma diferença significativa entre os grupos, o teste de Dunn nos permite saber quais pares de grupos são significativamente diferentes. No script do Anexo C, o método de Bonferroni está sendo utilizado para ajustar os valores de significância, o que ajuda a controlar o erro tipo I (falsos positivos) quando se realiza múltiplas comparações.

O Teste de Dunn deve ser utilizado:

- Após um teste de Kruskal-Wallis resultar em uma diferença significativa entre os grupos.
- Quando se quer realizar comparações múltiplas para descobrir quais pares de grupos são diferentes.
- O método de Bonferroni é recomendado quando há múltiplas comparações, pois corrige os valores de p para evitar erros inflacionados.

Uma das características distintivas do jamovi é sua ênfase na transparência e na replicabilidade das análises estatísticas. É possível que os usuários visualizem e compartilhem facilmente os passos de análise, garantindo a integridade e a confiabilidade dos resultados. Além disso, o jamovi oferece suporte a uma variedade de extensões desenvolvidas pela comunidade, que adicionam funcionalidades adicionais ao software.

Atualmente, o jamovi é amplamente utilizado em instituições acadêmicas, empresas e organizações de pesquisa em todo o mundo. Sua história é marcada por um compromisso contínuo com a acessibilidade, a usabilidade e a qualidade na análise estatística, tornando-se uma ferramenta valiosa para profissionais e estudantes que buscam explorar e compreender os dados de forma eficaz.

#### **4.7.1 Teste ANOVA**

A análise de variância (ANOVA) é um método para testar a igualdade entre médias populacionais baseado na análise das variâncias amostrais, cujos dados são separados em grupos ou fatores.

O teste F do ANOVA é uma medida estatística utilizada para testar a significância da diferença entre as médias dos grupos. O valor do fator F é calculado dividindo a variância entre os grupos pela variância dentro dos grupos.

A variância entre os grupos é uma medida da variabilidade das médias dos grupos em relação à média geral de todos os grupos. Já a variância dentro dos grupos é uma medida da variabilidade dos dados individuais em cada grupo em relação à média do próprio grupo.

Se o valor do fator F for grande o suficiente (ou seja, se a variação entre os grupos for significativamente maior do que a variação dentro dos grupos), então podemos concluir que existe uma diferença significativa entre as médias dos grupos.

O valor crítico do fator F é determinado a partir dos graus de liberdade do numerador (ou seja, os graus de liberdade entre os grupos) e os graus de liberdade do denominador (ou seja, os graus de liberdade dentro dos grupos). Se o valor calculado do fator F for maior do que o valor crítico do fator F, então podemos rejeitar a hipótese nula de que não há diferenças significativas entre as médias dos grupos. Caso contrário, não podemos rejeitar a hipótese nula.

A probabilidade  $p$  permite determinar quão comum ou raro é o valor de F, sob a suposição de que a hipótese nula é verdadeira. Se a probabilidade for baixa o suficiente, pode-se concluir que os dados são inconsistentes com a hipótese nula. A evidência nos dados amostrais é forte o suficiente para rejeitar a hipótese nula para toda a população. A hipótese nula  $H_0$  é que não há influência dos fatores na estabilização e na variável dependente.

Antes de realizar a ANOVA, deve ser escolhido um nível de significância, geralmente  $\alpha = 0,05$ . O nível de significância é o critério a ser usado para decidir se deve ou não rejeitar a

hipótese nula. Com  $\alpha = 0,05$ , aceita-se um risco de 5% de rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira (erro tipo I).

Se o valor- $p \leq \alpha$  (por exemplo, 0,05), rejeita-se a hipótese nula. Isso significa que há evidências estatísticas suficientes para concluir que pelo menos um dos fatores (ou suas interações) tem um efeito significativo na variável dependente (deformação permanente, por exemplo).

A hipótese nula  $H_0$  afirma que não há efeito significativo dos fatores individuais ou suas interações nas variáveis dependentes. Em outras palavras, as médias das variáveis dependentes para todas as combinações dos fatores são iguais.

A Hipótese Alternativa  $H_1$  afirma pelo menos um dos fatores (tipo de solo, percentual de fresado, número de ciclos) ou suas interações têm um efeito significativo nas variáveis independentes dos materiais estudados. Ou seja, as médias de deformação permanente diferem em função das combinações desses fatores.

Para descrever a equação da hipótese nula ( $H_0$ ) no contexto de um experimento fatorial com três fatores e múltiplas variáveis dependentes (como deformação permanente, deformação resiliente, e módulo resiliente), cada variável dependente a hipótese nula pode ser expressa conforme equação 34.

$$H_0: \mu_{ikl} = \mu \quad \text{Eq. 34}$$

Sendo:

- $\mu_{ijk}$  é a média da variável dependente para a combinação específica de Tipo de Solo (i), Percentual de Fresado (j), e Ciclos (k).
- $\mu$  é a média geral da variável dependente, que seria constante se a hipótese nula for verdadeira.

O Erro Tipo 1 ( $\alpha$ ), falso positivo, ocorre quando a hipótese nula é rejeitada incorretamente, ou seja, conclui-se que existe uma diferença significativa quando, na verdade, não há. O nível de significância ( $\alpha$ ) é a probabilidade de cometer um erro tipo 1. Se você usa um  $\alpha$  de 0,05, há 5% de chance de rejeitar  $H_0$  quando ela é verdadeira.

O Erro Tipo 2 ( $\beta$ ), falso negativo, ocorre quando a hipótese nula não é rejeitada, mas na verdade ela é falsa, ou seja, conclui-se que não existe diferença significativa quando, na verdade, há. O poder do teste ( $1 - \beta$ ) está relacionado à probabilidade de evitar o erro tipo 2.

#### 4.7.2 Definindo os fatores do experimento

A matriz fatorial do experimento 1, mostra como diferentes níveis de emulsão, quando combinados com dois tipos de solo e submetidos a vários ciclos de carregamento, afetam as propriedades mecânicas das amostras de solo. Essa análise fatorial permite identificar as interações mais significativas entre esses fatores e suas influências sobre as variáveis dependentes (DP, DR, fator de forma “b” e MR), ajudando a compreender qual combinação de condições produz os resultados mais favoráveis em termos de estabilidade e desempenho do solo estabilizado. Portanto, a matriz fatorial definiu-se conforme Tabela 12.

Tabela 12: Matriz fatorial do experimento 1

Solo 1					Solo 2						
% de emulsão	Ciclos de carregamento					% de emulsão	Ciclos de carregamento				
	10000	20000	30000	40000	50000		10000	20000	30000	40000	50000
Solo	DP/DR/b/MR					Solo	DP/DR/b/MR				
D-0,5%											
Dosagem (D)											
D+0,5%											

A matriz fatorial do experimento 2 tem o objetivo de investigar como diferentes combinações de percentual de fresado e emulsão influenciam as propriedades mecânicas do Solo 1 e 2 ao longo de múltiplos ciclos de carregamento. A partir desses dados, será possível entender a contribuição de cada fator para a durabilidade e a estabilidade do solo tratado, auxiliando na validação das hipóteses da pesquisa e no desenvolvimento de soluções eficientes para a estabilização de pavimentos, conforme matriz descrita na Tabela 13.

Tabela 13: Matriz fatorial do experimento 2

Solo 1/2											
0% TE					TE						
% de fresado	Ciclos de carregamento					% de emulsão	Ciclos de carregamento				
	10000	20000	30000	40000	50000		10000	20000	30000	40000	50000
Solo + 0% fresado	DP/DR/b/MR					Solo + 0% fresado	DP/DR/b/MR				
Solo + 30% Fresado											
Solo + 50% Fresado											

O objetivo da matriz do experimento 3, descrita na Tabela 14, é analisar a influência da variação na dosagem de emulsão sobre o Módulo Resiliente ao longo de diferentes ciclos de carregamento. Essa análise procura determinar a eficácia das dosagens testadas em melhorar a rigidez e a durabilidade dos solos estabilizados, fornecendo dados que podem validar ou refutar as hipóteses da pesquisa.

Tabela 14: Matriz fatorial do experimento 3

Solo 1/2						
% de fresado	Ciclo 1 1: 2: 3	Ciclo 2 4: 5: 6	Ciclo 3 7: 8: 9	Ciclo 4 10: 11:12	Ciclo 5 13: 14: 15	Ciclo 6 16: 17: 18
Solo	MR (DNIT 134)					
D-0,5%						
Dosagem (D)						
D+0,5%						

O objetivo da matriz do experimento 4 é avaliar a contribuição de cada fator (tipo de solo, percentual de fresado, presença de emulsão e ciclos de carregamento) para a **rigidez do solo**, conforme refletido no Módulo Resiliente, conforme Tabela 15. Essa análise visa validar as hipóteses da pesquisa e determinar a eficácia do fresado e da emulsão na melhoria das propriedades mecânicas dos solos.

Tabela 15: Matriz fatorial do experimento 4

Solo 1/2						
0% TE / TE						
% de fresado	Ciclo 1 1: 2: 3	Ciclo 2 4: 5: 6	Ciclo 3 7: 8: 9	Ciclo 4 10: 11:12	Ciclo 5 13: 14: 15	Ciclo 6 16: 17: 18
Solo + 0% fresado	MR (DNIT 134)					
Solo + 30% Fresado						
Solo + 50% Fresado						

#### 4.8 Considerações finais do capítulo

O método experimental, conforme apontado por Neuman (2014), é uma das técnicas mais comuns dentro desta abordagem, pois envolve a seleção e o design adequados dos grupos de pesquisa, a implementação de tratamentos experimentais e o controle de variáveis de confusão que possam interferir nos resultados. Ao seguir esse método rigorosamente, os pesquisadores podem garantir a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos em seus estudos experimentais.

Além disso, a avaliação do efeito desempenha um papel tão importante quanto a análise estatística dos dados em estudos científicos e experimentais, especialmente na engenharia de pavimentos e em outras áreas técnicas. Enquanto a análise estatística se concentra em identificar padrões, testar hipóteses e determinar a significância dos resultados obtidos, a avaliação do efeito é o processo que busca entender a magnitude e relevância prática desses resultados no contexto aplicado.

Por exemplo, em um estudo sobre a estabilidade de solos e compostos em pavimentação, a análise estatística pode indicar se há uma diferença significativa entre dois materiais com base em deformações acumuladas. No entanto, apenas essa análise não seria suficiente para garantir a escolha do melhor material. A avaliação do efeito entra neste ponto, examinando o impacto prático e real dessa diferença: qual é a ordem de grandeza da melhora ou piora? Essa diferença trará benefícios reais no desempenho do pavimento ao longo do tempo? Ou ainda, quais são as implicações financeiras, ambientais ou de durabilidade dessa diferença estatística?

É possível que, em alguns casos, a diferença observada seja estatisticamente significativa, mas irrelevante em termos práticos — ou seja, o efeito pode ser pequeno demais para justificar mudanças no projeto ou na execução de um pavimento. Por outro lado, mesmo que uma diferença não seja estatisticamente significativa, esta pode apontar tendências importantes que valem a pena ser consideradas, especialmente em decisões de engenharia, onde o impacto a longo prazo e os riscos associados têm um papel crítico.

Assim, a avaliação do efeito possibilita uma análise mais completa e contextualizada, complementando os dados estatísticos com a perspectiva aplicada e prática. Esta também orienta a tomada de decisões mais informadas, garantindo que o foco não esteja apenas em números e testes de significância, mas também nas consequências e no impacto real das diferenças observadas.

Portanto, ao interpretar resultados experimentais, é essencial não apenas conduzir uma análise estatística rigorosa, mas também avaliar o efeito em termos de suas implicações práticas e de engenharia, assegurando que as decisões tomadas sejam as mais eficazes e benéficas no contexto da aplicação.

Os ensaios de Compressão por Tração Diametral foram utilizados para determinar o teor de emulsão asfáltica. Ao testar diferentes concentrações de emulsão, o método permite identificar a quantidade ideal para garantir a coesão e resistência do solo, abordando diretamente a hipótese 3 e ajudando a atender o primeiro objetivo específico.

O carregamento em Multiestágio envolve a aplicação de 50.000 ciclos de carga em corpos de prova estabilizados com diferentes teores de fresado e emulsão, o que possibilita a avaliação da deformação permanente, deformação resiliente e módulo resiliente. Isso está alinhado com as hipóteses 1 e 2, pois permite analisar como o cimento asfáltico e o fresado influenciam a resposta mecânica dos materiais, e atende ao objetivo geral da pesquisa.

A análise do *shakedown*, aplicada através do modelo de Tseng e Lytton, fornece uma visão sobre a durabilidade e estabilidade do solo sob carregamento repetido, o que é crucial para avaliar a efetividade da estabilização proposta, atendendo assim ao objetivo geral e corroborando com a hipótese de que a adição de cimento asfáltico e emulsão melhora a resposta resiliente.

A inclusão de diferentes percentuais de fresado (30% e 50%) e a aplicação de emulsão permitem testar diretamente a segunda hipótese, que sugere que a estabilização granulométrica e asfáltica melhora as respostas plásticas e elásticas dos compostos. A análise da influência dessas variações sobre o módulo resiliente e a deformação permanente fornece dados concretos para avaliar essa hipótese e atinge o segundo objetivo específico.

O uso do carregamento em múltiplos estágios, com a aplicação de ciclos de carga e tensões desviadoras e confinantes, é uma metodologia que permite avaliar como as variações nos materiais (teor de emulsão, fresado) influenciam a resposta mecânica ao longo do tempo, testando de forma abrangente as hipóteses formuladas.

ANOVA (Análise de Variância) é uma ferramenta estatística utilizada para comparar as médias de diferentes grupos e determinar se as diferenças observadas entre esses grupos são estatisticamente significativas.

A ANOVA pode ser usada para comparar as médias das deformações permanentes e resilientes dos solos estabilizados com diferentes teores de emulsão asfáltica. Se a análise

mostrar que há diferenças estatisticamente significativas entre as médias, isso sugere que a adição de cimento asfáltico e emulsão realmente influencia a coesão e resistência do solo, validando a primeira hipótese.

A ANOVA é igualmente aplicável para comparar o módulo resiliente dos solos estabilizados com diferentes teores de fresado e emulsão. Se forem observadas diferenças significativas, isso indica que a estabilização granulométrica e asfáltica melhora as respostas plásticas e elásticas dos compostos, conforme esperado na segunda hipótese.

Embora a ANOVA seja mais diretamente aplicável às hipóteses relacionadas às medições de respostas mecânicas (como MR, DP, DR), ela pode ser utilizada indiretamente para verificar a adequação do teor de emulsão escolhido através do ensaio de compressão por tração diametral. Se as variações no teor de emulsão resultarem em diferenças significativas nas propriedades mecânicas medidas (analisadas via ANOVA), isso validaria o processo de seleção do teor de emulsão como eficaz.

O uso da ANOVA permite avaliar como as diferentes variáveis experimentais (tipo de solo, teor de emulsão, percentual de fresado, ciclos de carregamento) afetam as respostas resilientes e plásticas do solo e do solo-fresado estabilizado. Isso ajuda a identificar quais fatores são mais influentes, atendendo diretamente ao objetivo geral da pesquisa.

A ANOVA ajuda a analisar a influência do filme de betume no comportamento do solo durante o ensaio de tração por compressão diametral. Ao comparar diferentes teores de emulsão e suas respectivas respostas mecânicas, a ANOVA identifica qual teor proporciona o desempenho mais adequado, auxiliando na escolha correta para os ensaios subsequentes.

A ANOVA permite comparar os efeitos das estabilizações asfáltica e granulométrica sobre o módulo resiliente, mostrando se há interações significativas entre esses fatores que afetam a rigidez do solo. Isso está em completo alinhamento com o segundo objetivo específico, que busca entender a eficácia das diferentes técnicas de estabilização.

A pesquisa experimental é uma abordagem amplamente utilizada em várias áreas do conhecimento, desde as ciências naturais até as ciências sociais e a engenharia. Ela consiste na manipulação de variáveis independentes sob condições controladas, visando observar e medir os efeitos dessas manipulações nas variáveis dependentes. Segundo Babbie (2016), essa abordagem é reconhecida por sua capacidade de estabelecer relações de causa e efeito entre as variáveis, proporcionando um alto nível de controle sobre o ambiente de estudo.

Dentro desse contexto, esta pesquisa que procurou compreender como a estabilização asfáltica influencia o comportamento do solo. Neste estudo, foram realizados experimentos em laboratório, em que os solos e compostos foram submetidos a testes em condições controladas. O objetivo era estabelecer uma correlação entre as variáveis, especificamente examinando a influência do ligante asfáltico na estabilização do solo. Ao aplicar o método experimental de forma cuidadosa, conforme descrito na literatura atual, o objetivo era obter resultados confiáveis e representativos, levando em consideração o estado da arte da pesquisa, atendendo os objetivos e validando as hipóteses.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os parâmetros geotécnicos resultados das análises físicas e químicas do solo, bem como, as respostas mecânicas do solo às solicitações dos ensaios.

Conforme descrito no Capítulo 3, a dosagem da estabilização asfáltica foi realizada utilizando o ensaio de CTD. Foram realizados ensaios de carregamento multiestágio do solo e do solo estabilizado, bem como MR.

### 5.1 Caracterização física

#### 5.1.1 Granulometria do solo 1

Determinação dos Valores D10, D30 e D60:

- D10: 0,074 mm
- D30: 0,213 mm
- D60: 1,052 mm

Esses valores representam os diâmetros das partículas correspondentes às porcentagens de 10%, 30% e 60% passantes na análise granulométrica. O valor de D10 indica que 10% das partículas do solo têm diâmetros menores ou iguais a 0,074 mm. Da mesma forma, D30 representa que 30% das partículas são menores ou iguais a 0,213 mm, e D60 significa que 60% das partículas são menores ou iguais a 1,052 mm. Esses dados são fundamentais para determinar a distribuição granulométrica do solo, ajudando na classificação e na avaliação de suas propriedades geotécnicas.

O coeficiente de uniformidade é de 14. O Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) é um parâmetro que pode ser encontrado pela curva de distribuição granulométrica, sendo definido pela razão entre o diâmetro que 60% do material passa no peneiramento e o diâmetro efetivo. Os solos que apresentam  $C_u$  menores que 5 são considerados solos uniformes. Valores maiores que 15 são considerados solos desuniformes e entre 5 e 15 são mediamente uniformes.

Um coeficiente de curvatura de 0,59 sugere uma distribuição pobre dos tamanhos de partículas intermediárias. Valores entre 1 e 3 são considerados bons indicadores de solos bem graduados. O valor abaixo de 1 aqui confirma a classificação do solo como mal graduado com

a falta de algum diâmetro de solo. O (CC) pode ser definido como a divisão do D30 elevado ao quadrado pela multiplicação do diâmetro efetivo pelo D60.

Desta forma, é possível se determinar a graduação do solo:

- Graduação: Solo mal graduado
- Uniformidade: Uniformidade média

Classificação da Fração Fina pelo Triângulo de Ferret:

- % Areia: 68,7% (98,85%)
- % Silte: 0,7% (1,01%)
- % Argila: 0,10% (0,14%)

A classificação do solo como “mal graduado” indica que o solo possui uma distribuição não uniforme dos tamanhos de partículas, com lacunas significativas. Isto é corroborado pela análise dos valores de D10, D30 e D60, que mostram uma ampla variação nos tamanhos de partículas.

A uniformidade média indica que há alguma variação nos tamanhos das partículas, mas não a ponto de ser considerada uma boa mistura de todas as frações.

A maior parte da amostra é composta por areia, com uma quantidade muito pequena de silte e argila.

A pré-classificação do solo como “solo grosso”, Figura 54, reforça a predominância de partículas maiores (areia e pedregulho), o que pode ser vantajoso para determinadas aplicações de engenharia civil.

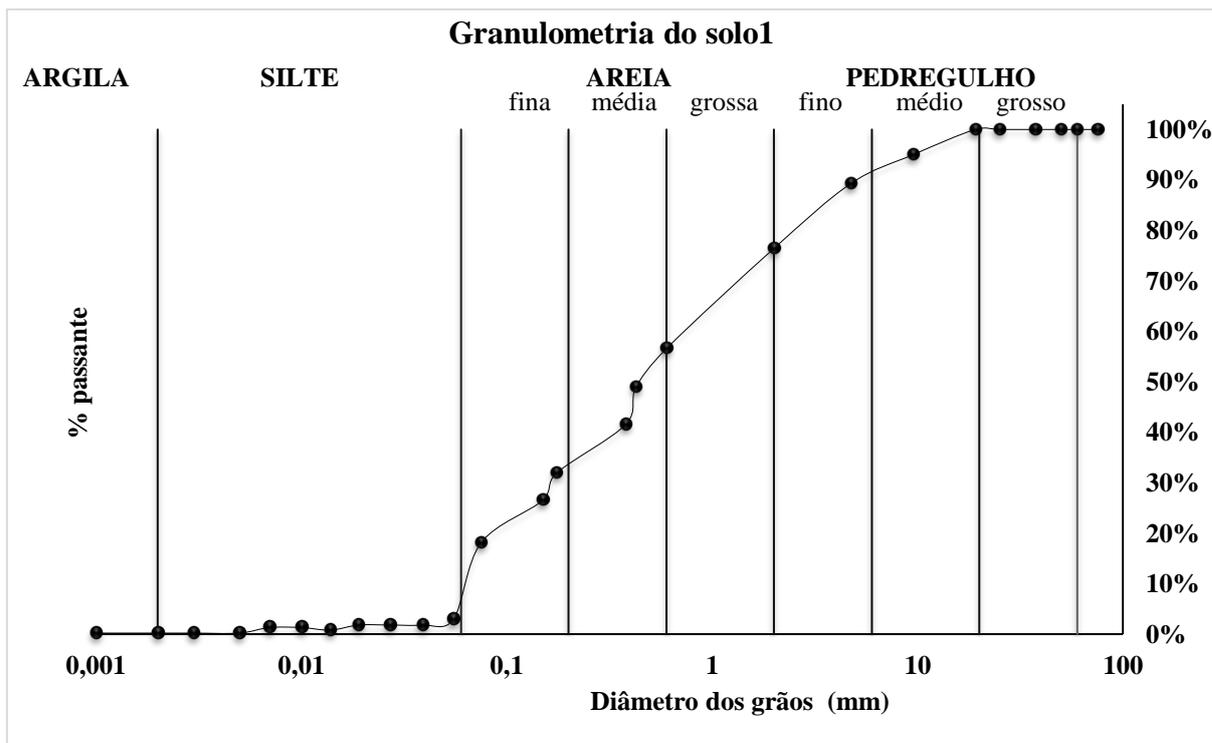


Figura 54: Curva granulométrica do solo 1

### 5.1.2 Granulometria do solo 2

Determinação dos Valores D10, D30 e D60:

- D10: 0,002 mm
- D30: 0,032 mm
- D60: 0,132225422 mm

O coeficiente de uniformidade é de 62. O Coeficiente de Uniformidade ( $C_u$ ) é considerado desuniforme.

Um coeficiente de curvatura de 3,68 sugere um solo mal graduado.

Desta forma, é possível se determinar a graduação do solo:

- Graduação: Solo mal graduado
- Uniformidade: Desuniforme

Classificação da Fração Fina pelo Triângulo de Ferret:

- % Areia: 57,0% (58,28%)
- % Silte: 30,9% (31,59%)
- % Argila: 9,90% (10,12%)

A classificação do solo como "mal graduado" indica que ele possui uma distribuição não uniforme dos tamanhos de partículas, com lacunas significativas. Isso é corroborado pela análise dos valores de D10, D30 e D60, que mostram uma ampla variação nos tamanhos de partículas.

A desuniformidade indica que há grande variação nos tamanhos das partículas, com uma falta de uma boa mistura de todas as frações.

A maior parte da amostra é composta por areia, com quantidades significativas de silte e argila. Esta classificação sugere que o solo possui propriedades de drenagem razoáveis, mas pode ter baixa capacidade de retenção de nutrientes e água.

A pré-classificação do solo como "solo grosso", Figura 55 reforça a predominância de partículas maiores neste caso areia.

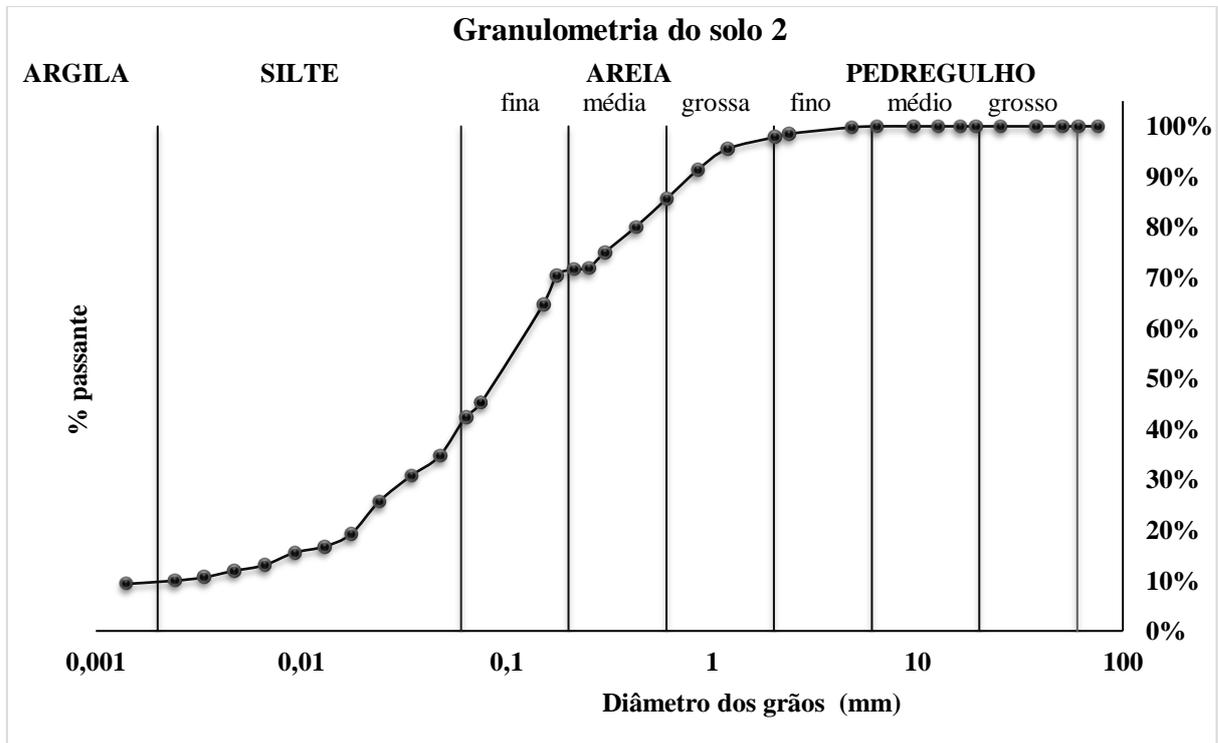


Figura 55: Curva granulométrica do solo 2

### 5.1.3 Granulometria do fresado

Determinação dos Valores D10, D30 e D60:

- D10: 0,18 mm.
- D30: 0,297 mm.
- D60 9,5 mm.

As peneiras com aberturas maiores (50 mm, 37,5 mm e 25 mm) mostram que 100% das partículas passam, indicando que não há partículas maiores que esses diâmetros.

As partículas maiores são gradualmente retidas nas peneiras menores, com uma diminuição significativa na quantidade passante a partir de 19 mm.

A partir de 2,36 mm até 0,075 mm, a quantidade de partículas passantes diminui de 46,14% para aproximadamente 5,80%.

Um  $C_u$  de aproximadamente 52,78 indica que o fresado é muito desuniforme, com uma grande variedade de tamanhos de partículas.

Um  $C_c$  de aproximadamente 0,0516 sugere uma distribuição pobre dos tamanhos de partículas intermediárias. O valor abaixo de 1 confirma que o solo é mal graduado, com falta ou saltos de algum diâmetro de solo, conforme Figura 56.

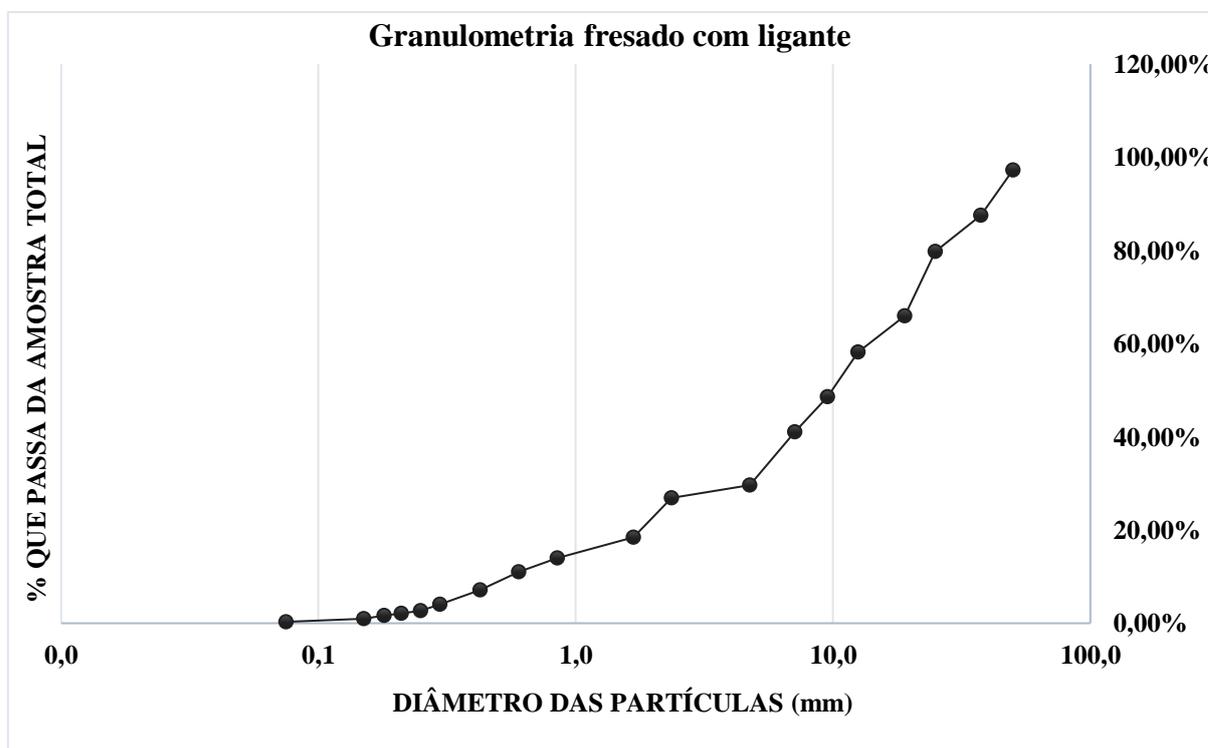


Figura 56: Curva granulométrica do fresado

#### 5.1.4 Granulometria do fresado sem ligante

A densidade aparente do fresado é de aproximadamente  $2,1993 \text{ g/cm}^3$ . Esse valor indica a massa do material por unidade de volume, incluindo os espaços vazios entre as partículas. A densidade aparente é um parâmetro importante para avaliar a compactação e a estabilidade do material.

A absorção do fresado é de 2,84%. Esse valor representa a capacidade do material de absorver água, expressa como uma porcentagem da sua massa seca. A absorção é crucial para entender o comportamento do material em condições úmidas, afetando suas propriedades de durabilidade e resistência.

O teor do fresado é de 6,67%. Esse valor refere-se ao teor de ligante presente no fresado.

Determinação dos Valores D10, D30 e D60:

- D10: 0,18 mm
- D30: 0,85 mm
- D60: 12,5 mm

As peneiras com aberturas maiores (50 mm, 37,5 mm e 25 mm) mostram que mais de 97% das partículas passam, indicando que não há uma quantidade significativa de partículas maiores que esses diâmetros. As partículas maiores são gradualmente retidas nas peneiras menores, com uma diminuição significativa na quantidade passante a partir de 19 mm.

A partir de 2,36 mm até 0,075 mm, a quantidade de partículas passantes diminui de 26,85% para aproximadamente 0,3%. Isso mostra que, além de ter uma quantidade significativa de partículas finas, o solo possui uma distribuição contínua dessas partículas menores.

Um  $C_u$  de aproximadamente 69,44 indica que o fresado é extremamente desuniforme, com uma grande variedade de tamanhos de partículas. Valores de  $C_u$  maiores que 15 são considerados desuniformes.

Um  $C_c$  de aproximadamente 0,32 sugere uma distribuição pobre dos tamanhos de partículas intermediárias. Valores de  $C_c$  entre 1 e 3 são considerados bons indicadores de solos bem graduados. O valor abaixo de 1 confirma que o solo é mal graduado, com falta ou saltos de algum diâmetro de solo.

A presença de ligante influenciou a distribuição das partículas, especialmente nas frações intermediárias e grossas. Ambas as amostras são mal graduadas e desuniformes, mas a amostra com ligante mostra uma desuniformidade ligeiramente menor em comparação com a amostra sem ligante, Figura 57.

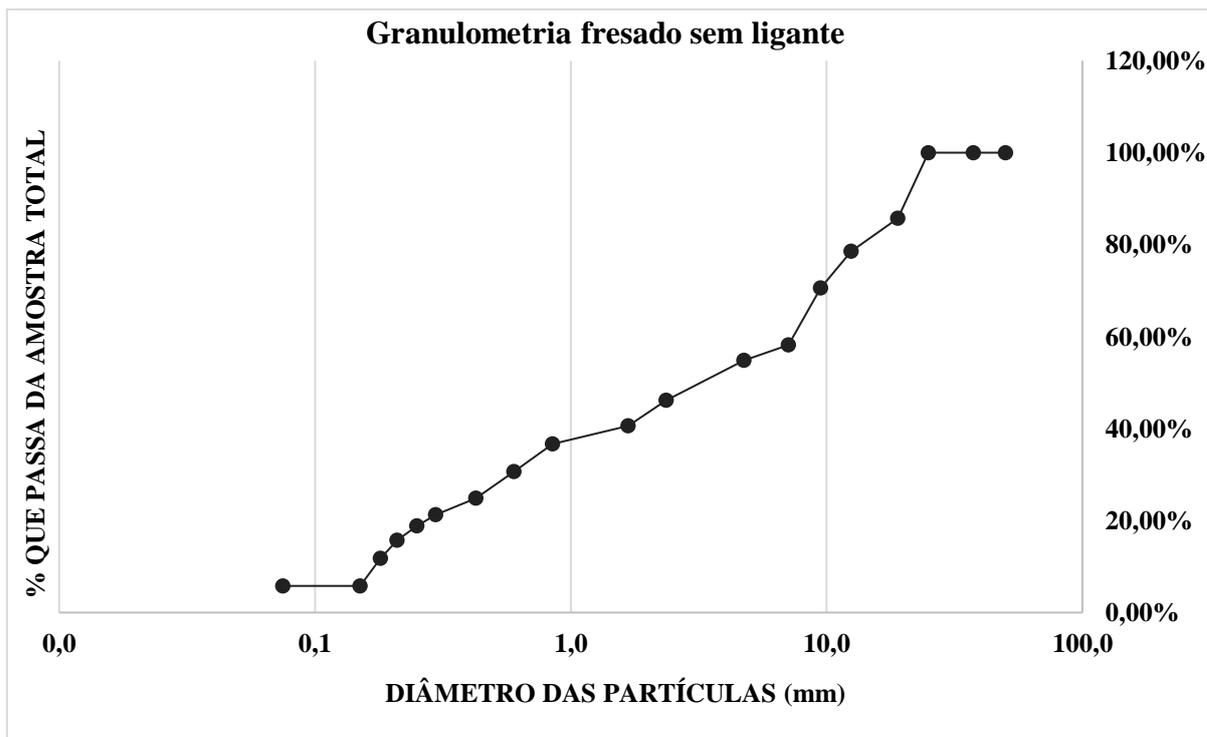


Figura 57: Curva granulométrica do fresado sem ligante

### 5.1.5 Granulometria (solo1 mais fresado)

A análise granulométrica, Figura 58, mostra que as peneira abaixo da 4,8 mm estão fora dos limites especificados pelo manual de estabilização da África do Sul, o que sugere que o material não está bem classificado de acordo com os padrões especificados. Para o composto 1, 13,6% de material fino passa na peneira 0,075 mm após a inserção de 30% de fresado.

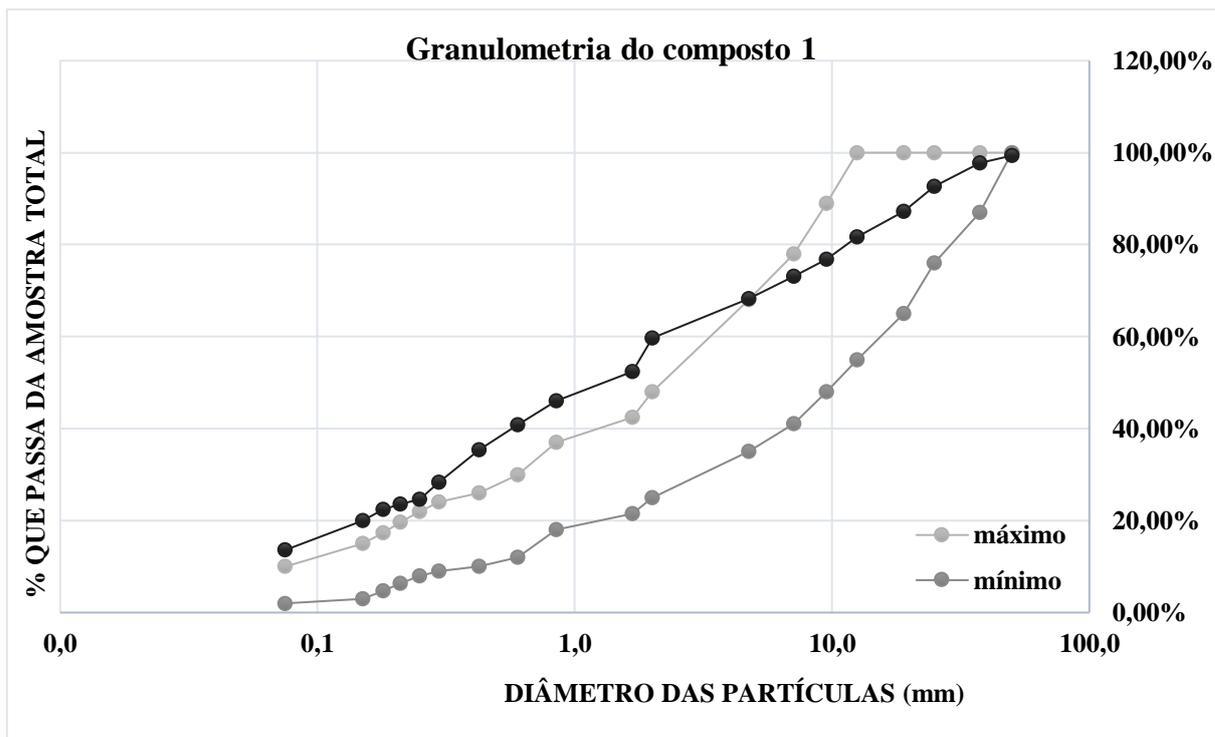


Figura 58: Curva granulométrica composto 1

A análise granulométrica, Figura 59 mostra todas as peneiras estão dentro dos limites ou no limite superior especificados pelo manual de estabilização da África do Sul, o que sugere que o material está bem classificado de acordo com os padrões especificados. Para o composto 2, 8,95% de material fino passa na peneira 0,075 mm, após ser misturado com 50% de fresado.

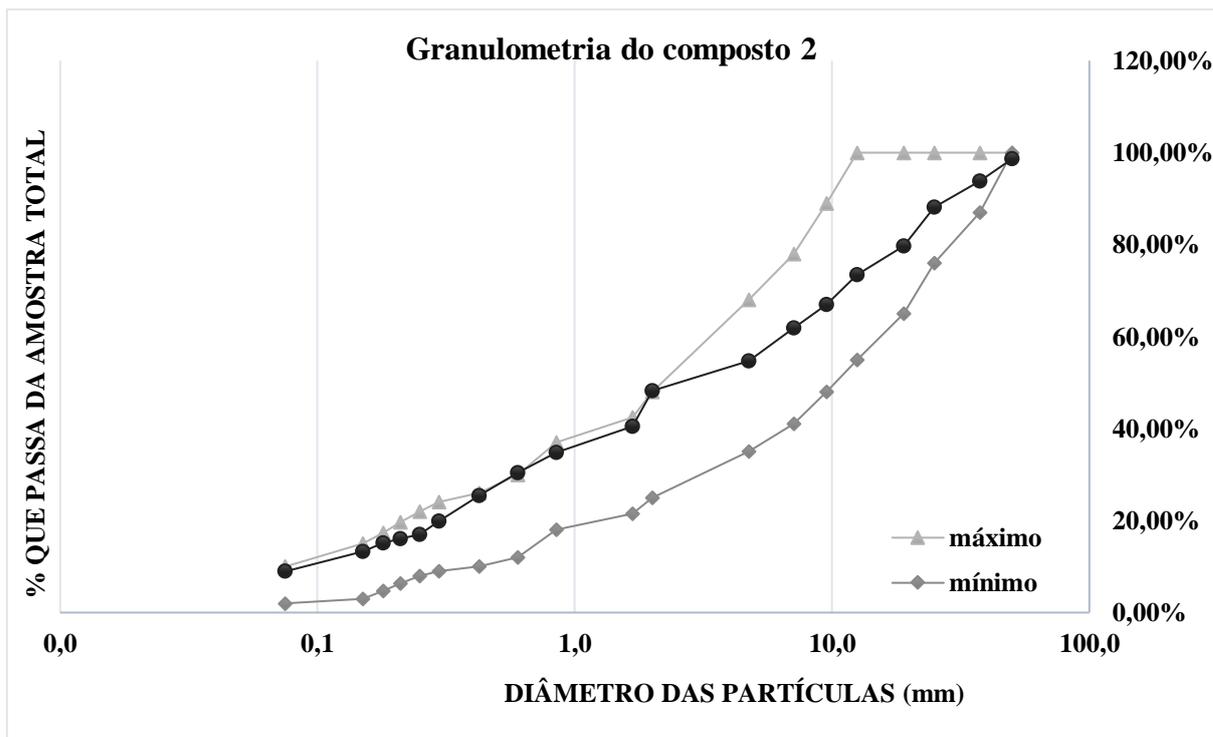


Figura 59: Curva granulométrica composto 2

### 5.1.6 Granulometria (solo2 mais fresado)

A análise granulométrica do composto 3, Figura 60, mostra que a maioria das peneiras estão fora dos limites, com percentuais de material passante superiores aos máximos permitidos. Isso sugere que o material tem uma distribuição de partículas mais fina do que o recomendado pelos limites do manual de estabilização da África do Sul. O passante da peneira 200 ficou em 34,8%.

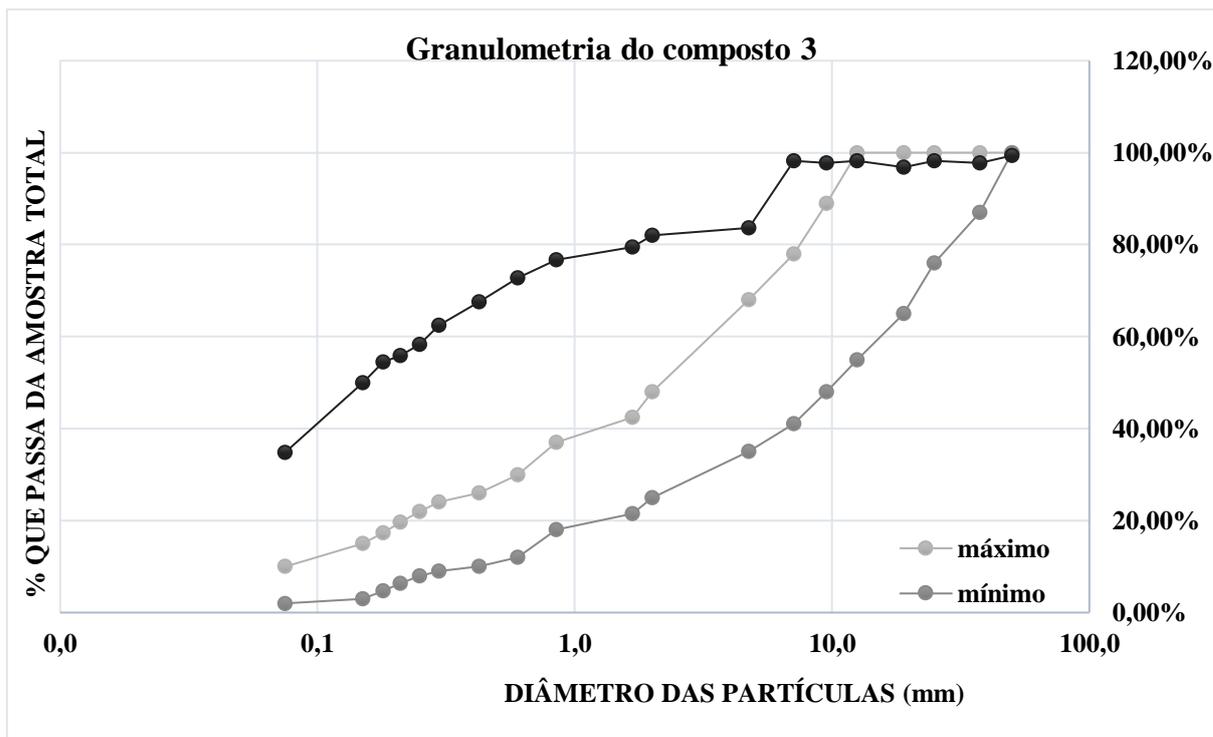


Figura 60: Curva granulométrica composto 3

A análise granulométrica do composto 4, Figura 61, mostra que, enquanto as peneiras mais grossas (acima de 4,75 mm) estão dentro dos limites especificados, as peneiras mais finas estão fora dos limites, com percentuais de material passante superiores aos máximos permitidos. Isso sugere que o material tem uma distribuição de partículas mais fina do que o recomendado pelos limites do manual de estabilização da África do Sul. O passante da peneira 200 ficou em 22,7%.

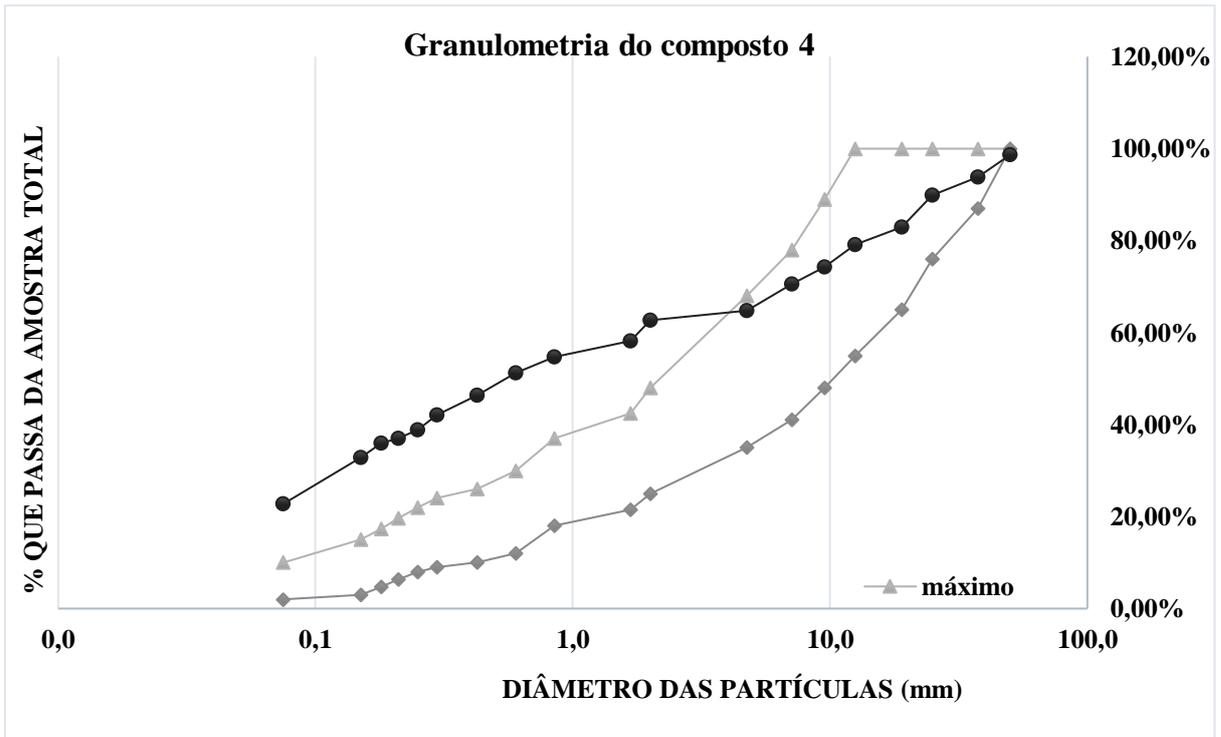


Figura 61: Curva granulométrica composto 4

## 5.2 Curva de compactação

Saibro

A Figura 62 mostra a curva de compactação na umidade ótima utilizando a energia Proctor modificada para o solo 1. A equação da curva é:  $y = -0,0073x^2 + 0,1373x + 1,6036$ . Para determinar a umidade ótima a partir da equação da curva de compactação, pode-se utilizar a fórmula do vértice de uma parábola  $y = ax^2 + bx + c$ ; A umidade ótima  $x$  é dada por:  $x = -b/2a = -0,1373/2*(-0,0073)$ . A umidade ótima é aproximadamente 9,44%

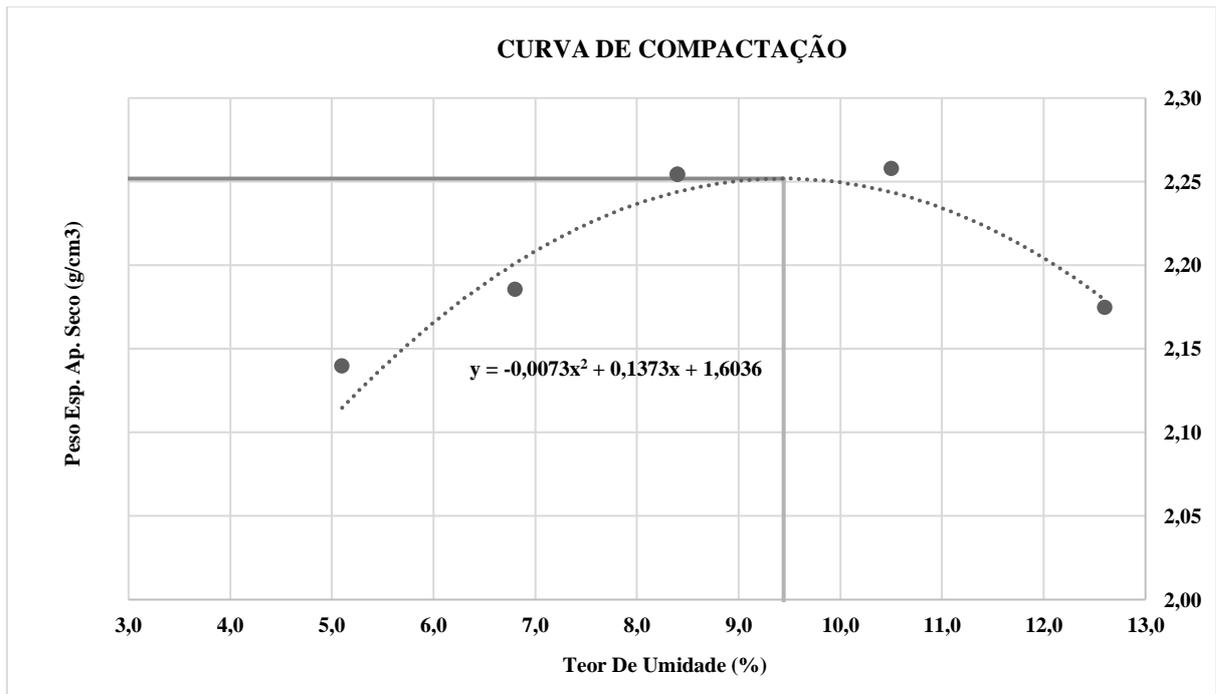


Figura 62: Curva de compactação do solo 1

A Figura 63 mostra a curva de compactação na umidade ótima utilizando a energia Proctor modificada para o composto 1 (solo 1 + 30% fresado). A equação da curva é:  $y = -0,0096x^2 + 0,1664x + 1,4705$ . A umidade ótima  $x$  é dada por:  $x = -b/2a = -0,1664/2(-0,0096)$ . A umidade ótima é aproximadamente 8,67%

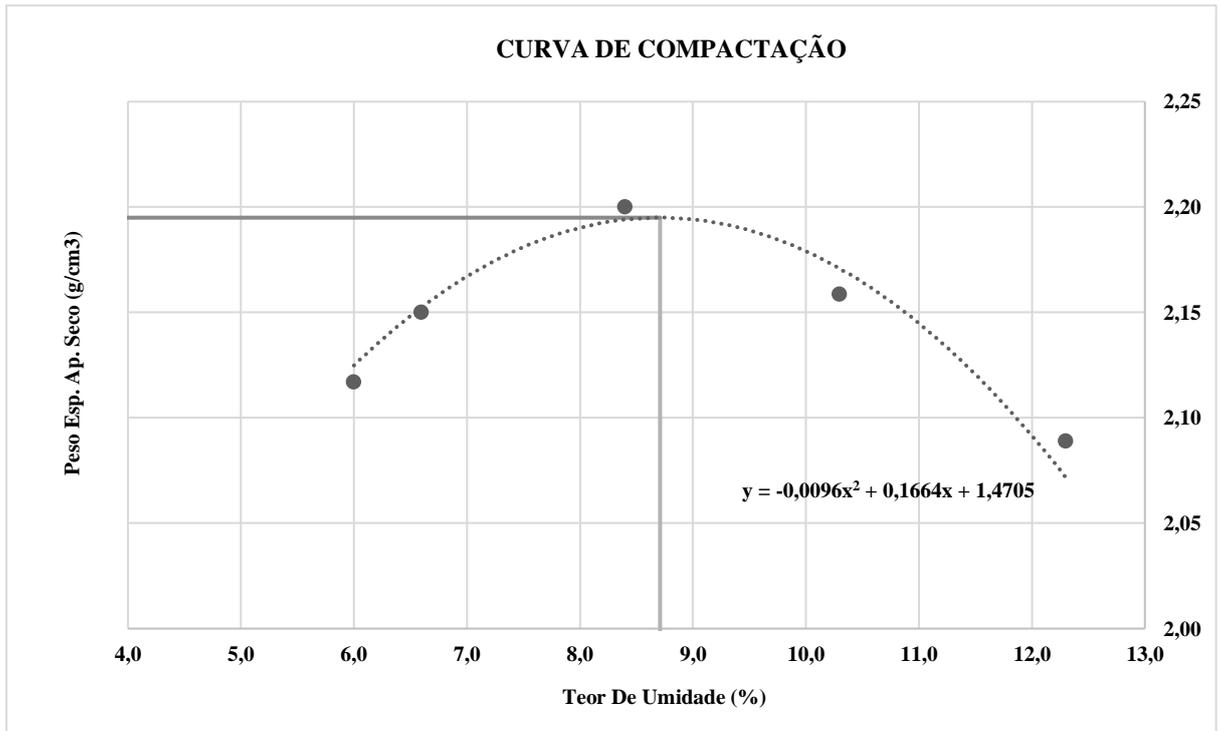


Figura 63: Curva de compactação do composto 1

A Figura 64 mostra a curva de compactação na umidade ótima utilizando a energia Proctor modificada para o composto 2 (solo 1 + 50% fresado). A equação da curva é:  $y = -0,0124x^2 + 0,2035x + 1,3771$ . A umidade ótima  $x$  é dada por:  $x = -b/2a = -0,20352/(-0,0124)$ . A umidade ótima é aproximadamente 8,22%

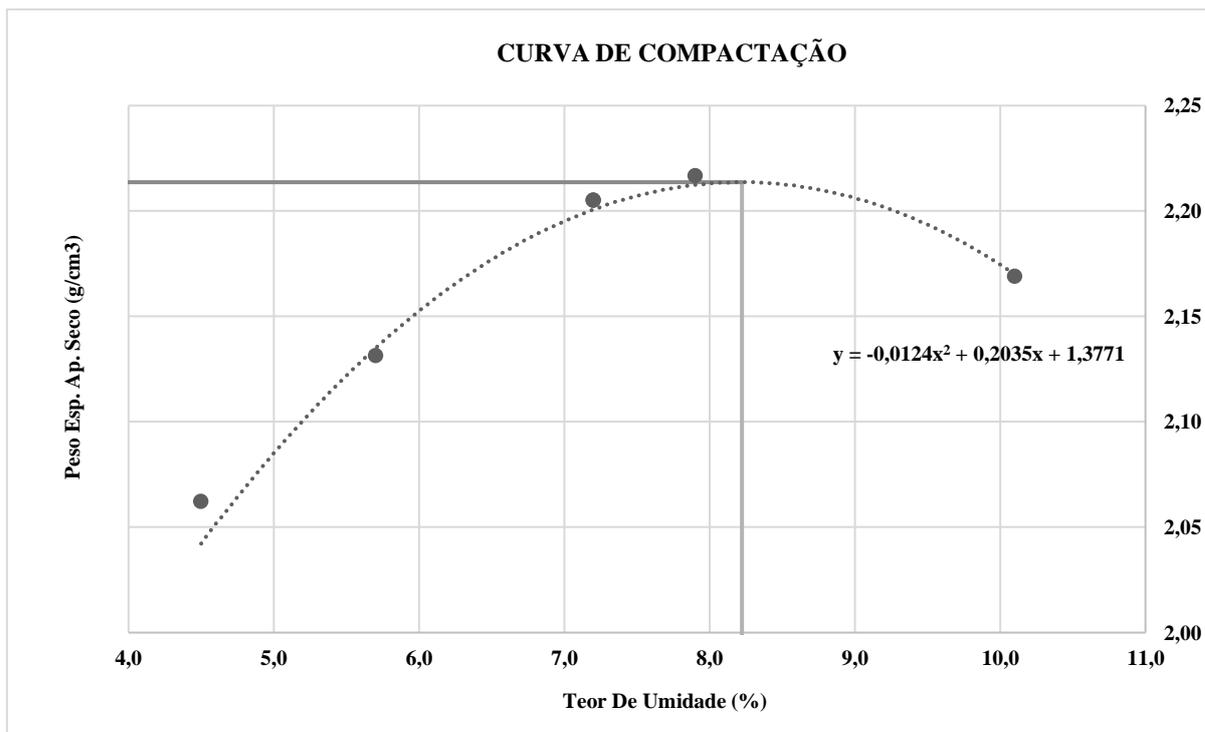


Figura 64: Curva de compactação do composto 2

A Figura 65 mostra a curva de compactação na umidade ótima utilizando a energia Proctor modificada para o solo 2. A equação da curva é:  $y = 0,0009x^2 + 0,0243x + 1,555$ . Para determinar a umidade ótima a partir da equação da curva de compactação, pode-se utilizar a fórmula do vértice de uma parábola  $y = ax^2 + bx + c$ . A umidade ótima  $x$  é dada por:  $x = -b/2a = -0,0243 / (2 \cdot 0,0009) = -13,5$ . A umidade ótima é aproximadamente 13,5%.

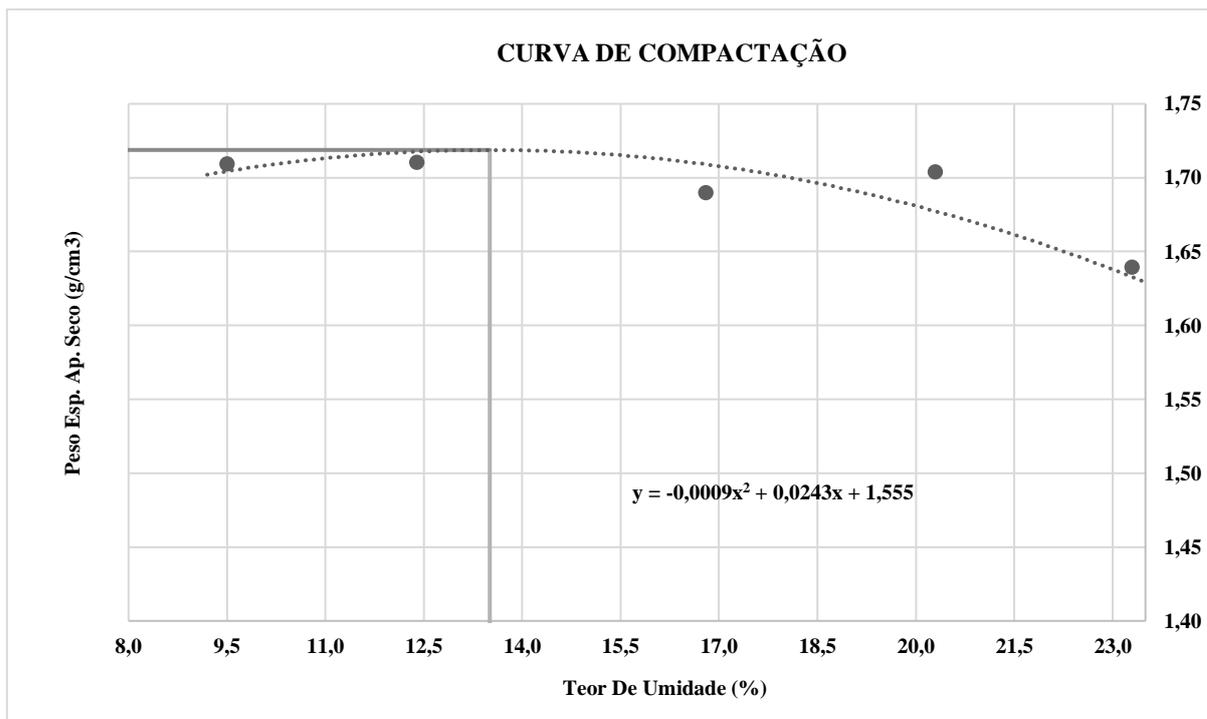


Figura 65: Curva de compactação do solo 2

A Figura 66 mostra a curva de compactação na umidade ótima utilizando a energia Proctor modificada para o composto 3 (solo 2 com 30% de fresado). A umidade ótima  $x$  é dada por:  $x = -b/2a = -0,0506/2(-0,0021)$ . A umidade ótima é aproximadamente 12,05%

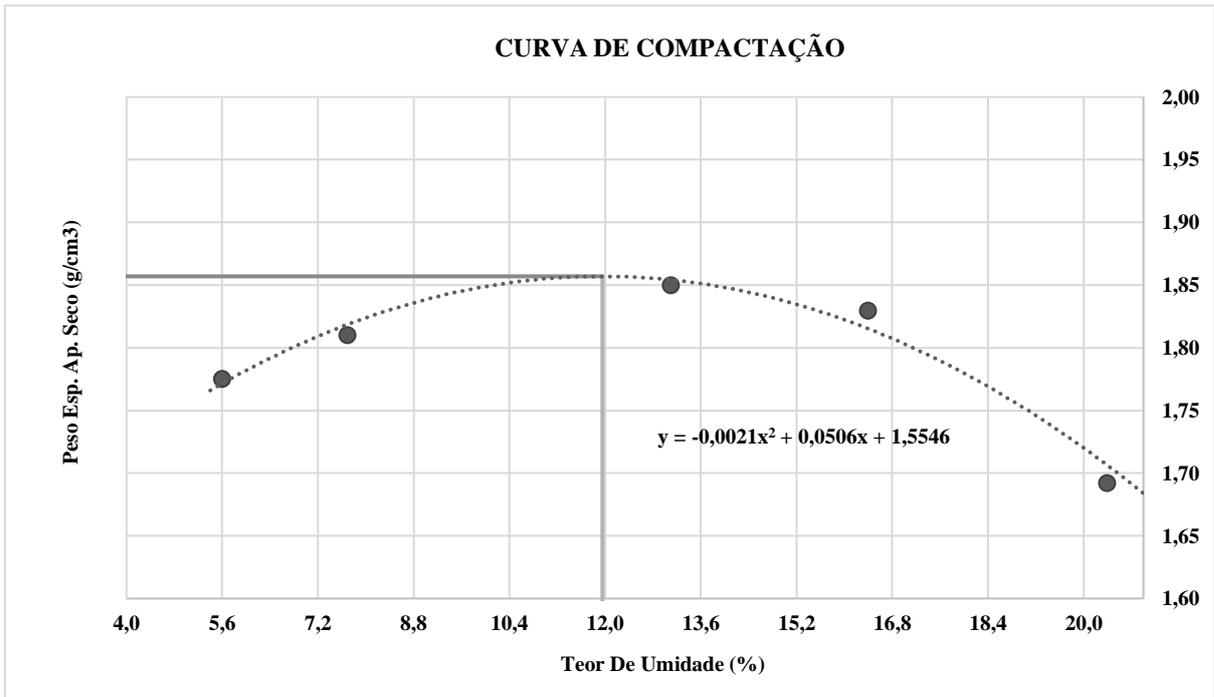


Figura 66: Curva de compactação do composto 3

A Figura 67 mostra a curva de compactação na umidade ótima utilizando a energia Proctor modificada para o composto 4 (solo 2 com 50% de fresado). A umidade ótima  $x$  é dada por:  $x = -b/2a = -0,06352/2(-0,0028)$ . A umidade ótima é aproximadamente 11,34%

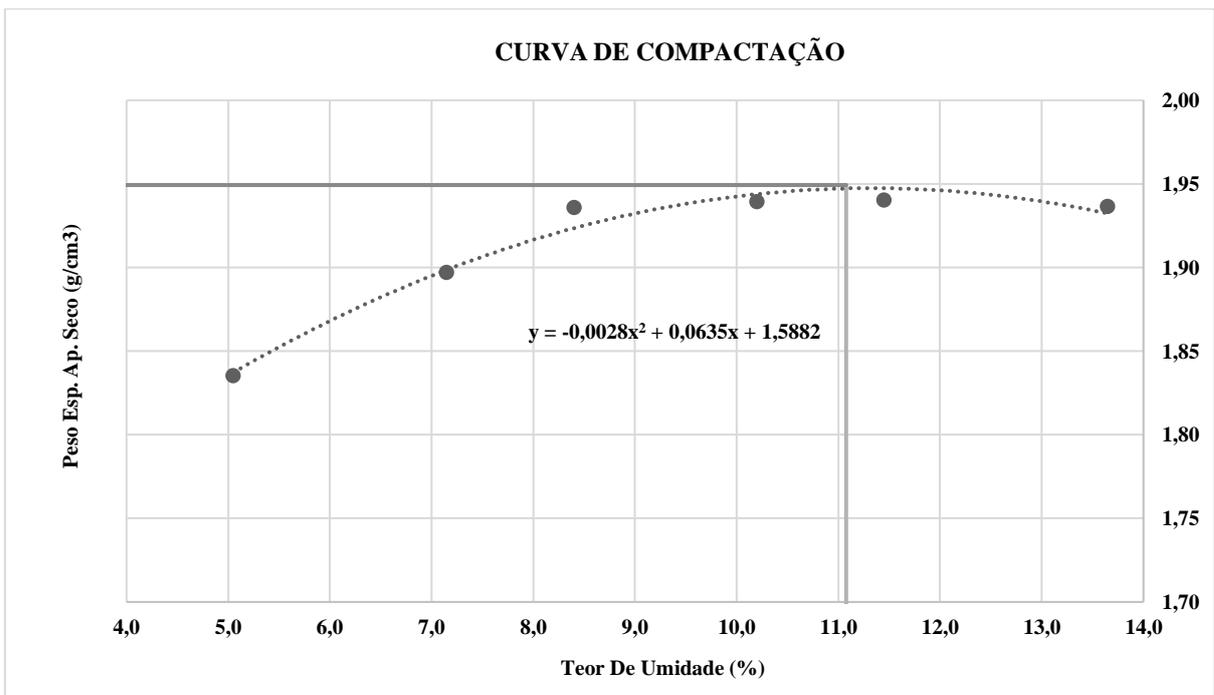


Figura 67: Curva de compactação do composto 4

### 5.3 Parâmetros geotécnicos do solo

Ambos os solos apresentaram resultados NP (Não Plástico) para os limites de liquidez e plasticidade, indicando que esses solos não apresentam coesão.

A densidade real dos grãos, que é a massa por unidade de volume dos grãos do solo, foi de 2,87 g/cm<sup>3</sup> para o Solo 1 e 2,71 g/cm<sup>3</sup> para o Solo 2. Esse parâmetro sugere que os grãos do Solo 1 são mais densos do que os do Solo 2.

A massa específica aparente seca, que é a densidade do solo seco, foi de 2,25 g/cm<sup>3</sup> para o Solo 1 e 1,72 g/cm<sup>3</sup> para o Solo 2. Este valor reflete a densidade do solo sem considerar a umidade presente.

O número de vazios, que indica a relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos do solo, foi de 0,274 para o Solo 1 e 0,577 para o Solo 2. Isso sugere que o Solo 2 possui uma maior quantidade de espaços vazios em comparação ao Solo 1.

A umidade ótima, que é o teor de umidade no qual o solo atinge sua máxima densidade seca durante a compactação, foi de 9,42% para o Solo 1 e 13,5% para o Solo 2.

Pela classificação HRB (Highway Research Board), o Solo 1 foi classificado como A-2-4 e o Solo 2 como A4. Pela classificação SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos), o Solo 1 foi classificado como SM (Silty Sand) e o Solo 2 como ML (Silty Loam).

A porcentagem de material passante na peneira #0,075 (material fino) foi de 18% para o Solo 1 e 43% para o Solo 2. Isso sugere que o Solo 2 contém uma maior proporção de partículas finas em comparação ao Solo 1.

Os parâmetros de MCT (Miniatura Compactação Tropical) não foram especificados para ambos os solos. Os corpos de prova desagregaram totalmente durante a fase de imersão impossibilitando a continuidade do ensaio.

A análise comparativa dos parâmetros de Solo 1 e Solo 2, Tabela 16, revela diferenças significativas em termos de densidade, umidade ótima e composição granulométrica. O Solo 1 apresenta maior densidade e menor número de vazios, enquanto o Solo 2 possui maior umidade ótima e maior quantidade de partículas finas. Essas características influenciam diretamente o comportamento e a aplicabilidade dos solos em diferentes tipos de obras de engenharia.

Tabela 16: Parâmetros geotécnicos do solo 1 e 2

Parâmetros	Solo 1	Solo 2
LL	NP	NP
LP	NP	NP
Densidade Real dos grãos	2,87 g/cm <sup>3</sup>	2,71 g/cm <sup>3</sup>

Massa específica aparentemente seca	2,25 g/cm <sup>3</sup>	1,72 g/cm <sup>3</sup>
Número de vazios (e)	0,274	0,577
Umidade ótima	9,42 %	13,5%
HRB	A-2-4	A4
SUCS	SM	ML
MCT	x	x
Passante #0,075	18%	43%

## 5.4 Caracterização química

### 5.4.1 MEV/EDS

A alta porcentagem de oxigênio (48.192% em peso e 70.721% em atonicidade) indica a presença significativa de óxidos. Isso é comum em solos, já que muitos minerais e compostos do solo contêm oxigênio ligado a outros elementos. A presença significativa de silício (11.050% em peso) sugere que a amostra contém minerais silicatos, que são comuns em solos e formam a maior parte da crosta terrestre. A alta concentração de ferro (24.653% em peso) indica que a amostra pode conter minerais ferrosos, como óxidos de ferro (hematita, magnetita) ou minerais de silicato de ferro. O ferro é um elemento importante no solo, contribuindo para a coloração (solos vermelhos ou amarelos) e fertilidade. A presença significativa de titânio (11.538% em peso) pode indicar a presença de minerais como rutilo, ilmenita ou anatásio, que são comuns em alguns tipos de solos e sedimentos. A presença de magnésio (2.054% em peso) e alumínio (1.995% em peso) sugere a existência de minerais como olivina, piroxênio ou micas (biotita, muscovita), que contêm esses elementos. A baixa concentração de cálcio (0.519% em peso) pode estar associada a minerais carbonatados ou feldspatos de cálcio, embora a baixa porcentagem sugira que esses minerais não sejam predominantes na amostra. Estes dados podem ser conferidos na Tabela 17.

Tabela 17: Composição química do solo 1

Elemento	Peso %	Peso % $\sigma$	Atômico (%)
Oxigênio	48.192	0.526	70.721
Magnésio	2.054	0.120	1.983
Alumínio	1.995	0.110	1.736
Silício	11.050	0.197	9.237
Cálcio	0.519	0.084	0.304
Titânio	11.538	0.240	5.655
Ferro	24.653	0.424	10.364

A análise de um espectro de energia dispersiva de raios X (EDX ou EDS), Figura 68, como o fornecido envolve identificar os picos e correlacioná-los aos elementos presentes na

amostra de solo. Cada pico no gráfico corresponde à energia característica de emissão de raios X de um elemento específico. Na figura elementos detectados e seus níveis de energia aproximados em keV:

- Oxigênio (O): em torno de 0,5 keV
- Magnésio (Mg): em torno de 1,25 keV
- Alumínio (Al): em torno de 1,5 keV
- Silício (Si): em torno de 1,75 keV
- Cálcio (Ca): em torno de 3,7 keV e 4 keV
- Titânio (Ti): em torno de 4,5 keV e 4,9 keV
- Ferro (Fe): em torno de 6,4 keV e 7 keV

Oxigênio (O): Com 48.192% em peso e 70.721% em atonicidade, o oxigênio é o elemento mais abundante, indicando a presença predominante de óxidos e silicatos.

Magnésio (Mg): Com 2.054% em peso e 1.983% em atonicidade, o magnésio está presente em menor quantidade, possivelmente como parte de minerais como olivina ou piroxênios.

Alumínio (Al): Com 1.995% em peso e 1.736% em atonicidade, o alumínio sugere a presença de minerais como feldspatos ou micas.

Silício (Si): Com 11.050% em peso e 9.237% em atonicidade, o silício indica a presença significativa de minerais de silicato.

Cálcio (Ca): Com 0.519% em peso e 0.304% em atonicidade, o cálcio está presente em quantidades muito pequenas, indicando minerais carbonatados ou feldspatos de cálcio em menor quantidade.

Titânio (Ti): Com 11.538% em peso e 5.655% em atonicidade, o titânio indica a presença de minerais como ilmenita ou rutilo.

Ferro (Fe): Com 24.653% em peso e 10.364% em atonicidade, o ferro é o segundo elemento mais abundante, sugerindo a presença de óxidos de ferro ou minerais ferrosos.

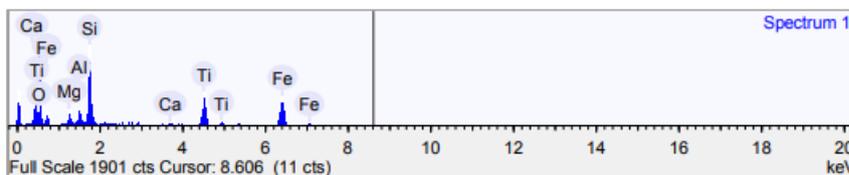


Figura 68: Espectro de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) mostrando a composição elementar do solo 1

O mapa mostra a distribuição do silício na amostra (em magenta). O silício está amplamente distribuído, sugerindo a presença de minerais de silicato em várias partes da amostra.

O mapa mostra a distribuição do alumínio na amostra (em branco). O alumínio também está bem distribuído, mas parece estar presente em áreas específicas, possivelmente associado a minerais como feldspatos ou micas.

O mapa mostra a distribuição do oxigênio (em ciano). O oxigênio está amplamente distribuído, indicando a presença generalizada de óxidos e silicatos.

O mapa mostra a distribuição do magnésio (em azul). O magnésio parece estar menos uniformemente distribuído, possivelmente associado a minerais específicos como olivina ou piroxênios.

O mapa mostra a distribuição do cálcio (em branco) é menos abundante e parece estar concentrado em algumas áreas, indicando a presença de minerais carbonatados ou feldspatos de cálcio.

O mapa mostra a distribuição do ferro (em vermelho). O ferro está amplamente distribuído, com concentrações significativas em várias áreas, indicando a presença de óxidos de ferro ou minerais ferrosos.

O mapa mostra a distribuição titânio (em verde). O titânio está presente em áreas específicas, sugerindo a presença de minerais como ilmenita ou rutilo.

A distribuição variada dos elementos, Figura 69, indica que o solo é heterogêneo, contendo diferentes tipos de minerais. A combinação de silício, alumínio, magnésio, ferro e titânio sugere uma composição mineral complexa, típica de solos derivados de rochas ígneas ou metamórficas.

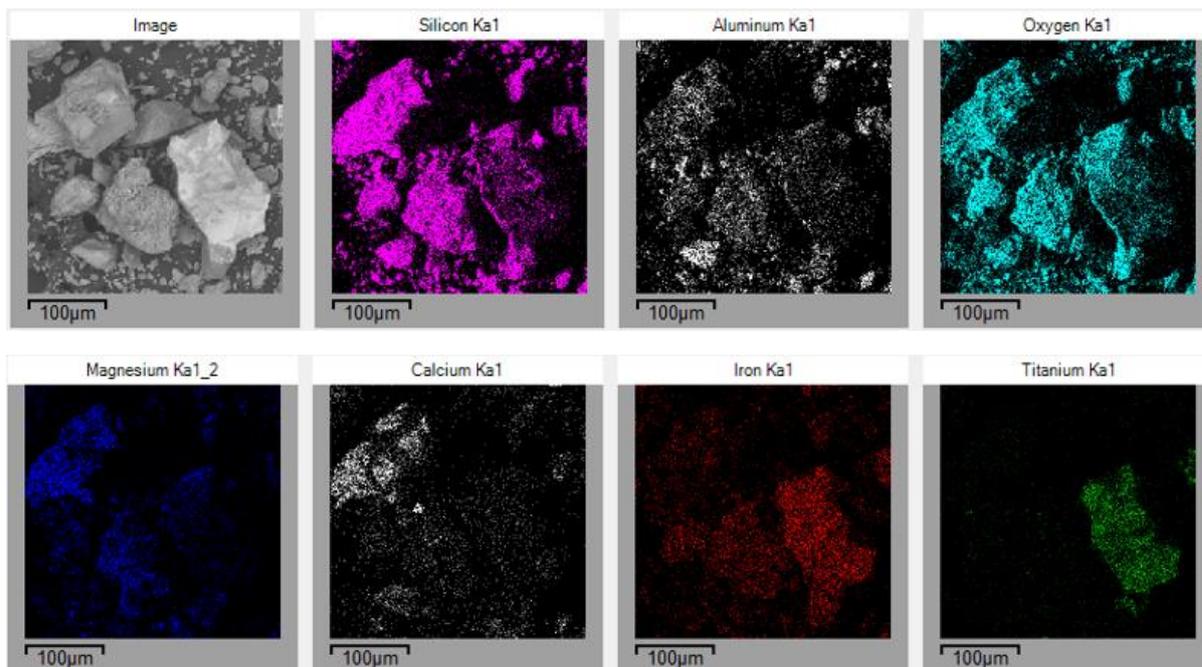


Figura 69: Micrografia de varredura eletrônica e mapeamento EDS do solo 1

As imagens mostram partículas de diferentes tamanhos e formas, algumas angulares e outras mais arredondadas.

A presença de partículas angulares sugere que elas podem ser fragmentos de minerais quebrados recentemente, indicando um processo de intemperismo físico ou mecânico. A variedade de tamanhos de partículas indica uma amostra de solo não classificada, possivelmente contendo uma mistura de diferentes frações granulométricas (areia, silte, argila). As partículas maiores parecem ser minerais primários ou secundários, possivelmente feldspatos ou quartzo, que resistem ao intemperismo. A superfície rugosa e fraturada sugere que esta partícula pode ser um mineral de silicato, como quartzo ou feldspato, que sofreu intemperismo físico.

A presença de partículas de diferentes tamanhos e formas indica que a amostra de solo passou por processos variados de formação e intemperismo. A mistura de partículas angulares e arredondadas sugere intemperismo físico seguido por transporte e deposição. As partículas angulares indicam intemperismo físico recente, enquanto as partículas mais arredondadas podem ter sido transportadas por água ou vento, sofrendo abrasão. As partículas grandes e fraturadas são indicativas de minerais resistentes ao intemperismo, como quartzo e feldspatos, comuns em muitos solos.

A distribuição variada das partículas sugere que o solo pode conter uma combinação de diferentes frações granulométricas, o que pode afetar suas propriedades físicas, como

porosidade e capacidade de retenção de água, conforme pode ser visto nas imagens da Figura 70.

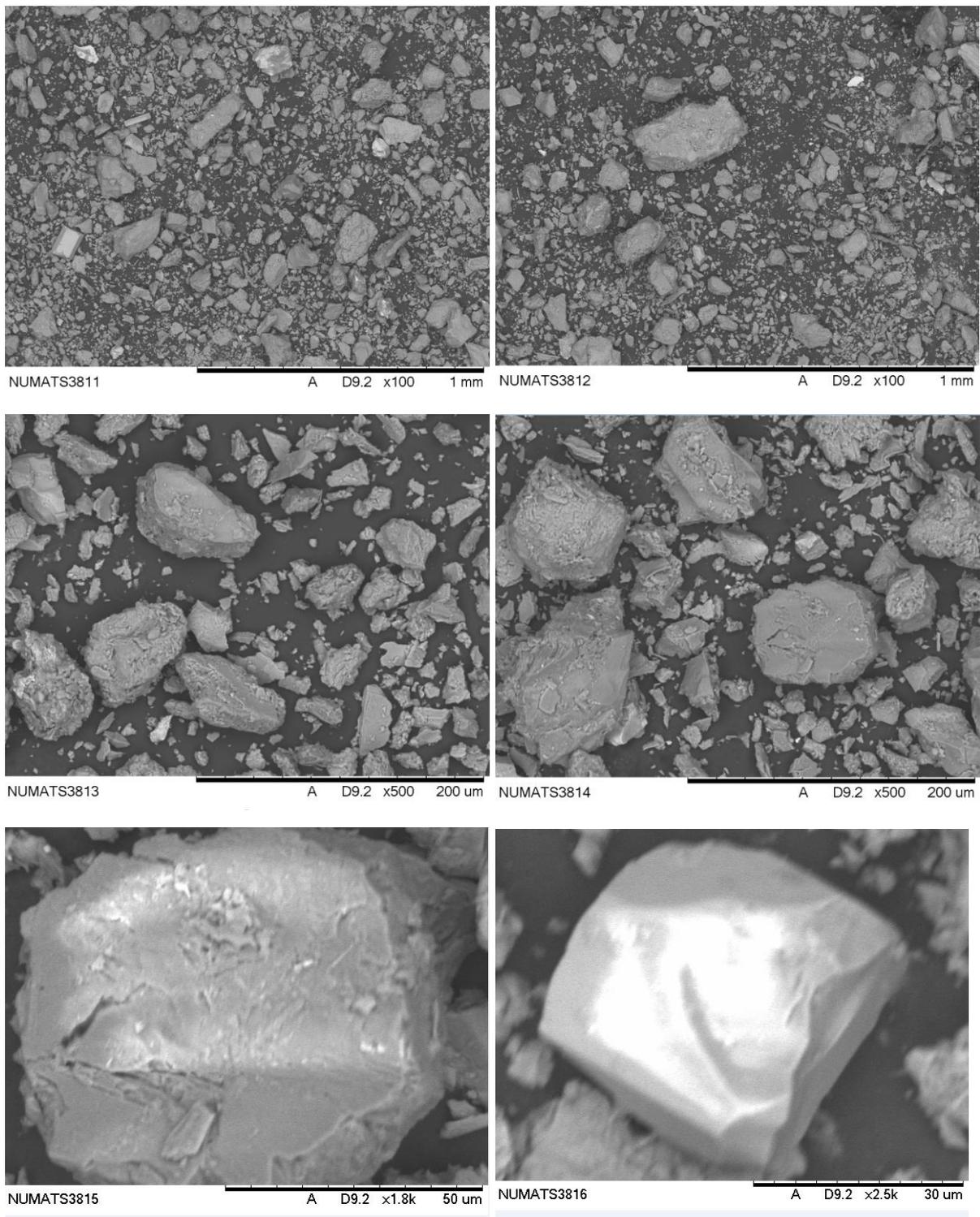


Figura 70: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do solo 1

A composição, Tabela 18, sugere que os minerais dominantes são silicatos aluminosos, como feldspatos, micas e minerais de argila, possivelmente acompanhados de óxidos de ferro

e minerais contendo magnésio e titânio. A presença de elementos como Si, K, Fe, Al e Mg indica que a amostra de solo contém uma mistura de minerais, incluindo silicatos e óxidos. conforme pode ser visualizado na .

Tabela 18: Composição química do solo 2

Elemento	Peso %	Peso % $\sigma$	Atômico %
Oxigênio	54.421	0.442	69.814
Magnésio	5.232	0.149	4.416
Alumínio	9.731	0.183	7.402
Silício	17.756	0.245	12.975
Potássio	3.688	0.127	1.936
Titânio	1.408	0.118	0.603
Ferro	7.763	0.282	2.853

A análise de um espectro de energia dispersiva de raios X (EDX ou EDS) como o fornecido, Figura 71, envolve identificar os picos e correlacioná-los aos elementos presentes na amostra de solo. Cada pico no gráfico corresponde à energia característica de emissão de raios X de um elemento específico.

As energias (em keV) são correlacionadas com os elementos detectados.

- Oxigênio (O): Pico à esquerda, próximo a 0,5 keV.
- Titânio (Ti): Picos próximos a 0,4 keV e entre 4,5-5 keV.
- Ferro (Fe): Picos próximos a 1,25 keV e 6,4 keV.
- Magnésio (Mg): Pico próximo a 1,3 keV.
- Alumínio (Al): Pico próximo a 1,5 keV.
- Silício (Si): Pico próximo a 1,75 keV.
- Potássio (K): Picos próximos a 3,3 keV.

Oxigênio (O): O pico de oxigênio sugere a presença de óxidos na amostra, comuns em minerais de solos.

Titânio (Ti): Frequentemente encontrado em minerais como ilmenita e rutilo.

Ferro (Fe): Comum em vários minerais de solo, indicando possíveis minerais como hematita ou magnetita.

Magnésio (Mg) e Alumínio (Al): Podem indicar a presença de minerais argilosos como caulinita ou outros silicatos.

Silício (Si): Comum em todos os tipos de solos, geralmente presente como sílica ou silicatos.

Potássio (K): Indicativo de feldspatos ou minerais de mica, comuns em muitos tipos de solos.

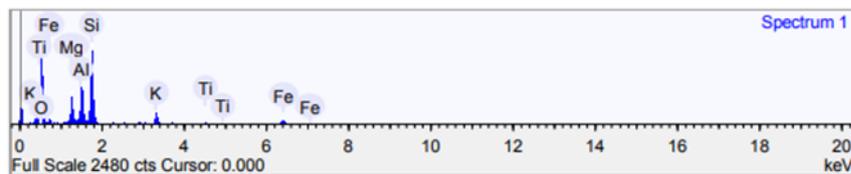


Figura 71: Espectro de Energia Dispersiva de Raios X (EDS) mostrando a composição elementar do solo 1

O mapa de distribuição de silício é mostrado em magenta. O silício está distribuído de maneira relativamente uniforme em toda a amostra, com algumas áreas de concentração mais alta. A presença de silício é comum em minerais de argila, quartzo e outros silicatos que compõem a maior parte dos solos.

O mapa de distribuição alumínio é mostrado em cinza. O alumínio também está distribuído de forma bastante uniforme, semelhante ao silício. O alumínio é um componente principal em muitos minerais argilosos, como a caulinita e outros filosilicatos.

O mapa de distribuição de oxigênio é mostrado em ciano. O oxigênio está distribuído uniformemente por toda a amostra, indicando a presença de óxidos e silicatos. O oxigênio é abundante na maioria dos minerais de solo, especialmente em óxidos de ferro e minerais silicatos.

O mapa de distribuição de potássio é mostrado em amarelo. O potássio parece estar distribuído de maneira relativamente uniforme na amostra. A presença de potássio pode estar associada a minerais como feldspatos e micas, que são comuns em solos.

O mapa de distribuição de ferro é mostrado em vermelho. O ferro também parece estar distribuído de forma relativamente uniforme, embora possa haver algumas áreas de concentração mais alta. O ferro pode estar presente na forma de minerais como hematita, magnetita ou outros óxidos de ferro.

O mapa de distribuição de magnésio é mostrado em azul. O magnésio parece estar distribuído de maneira menos uniforme do que o potássio e o ferro, com algumas áreas mais ricas em magnésio. A presença de magnésio pode indicar a presença de minerais como olivina, piroxênio ou minerais de argila.

O mapa de distribuição de titânio é mostrado em verde. O titânio tem uma distribuição relativamente uniforme, mas parece ser menos abundante em comparação com os outros elementos.

O mapeamento EDS, Figura 72 fornecem uma visão detalhada da distribuição de elementos na amostra de solo, revelando uma composição homogênea. A maioria dos elementos (K, Fe, Mg, Ti, Si, Al, O) está distribuída de maneira relativamente uniforme na amostra. Isso sugere uma composição homogênea, pelo menos na escala de observação. Há algumas variações locais, indicando que certos minerais podem estar concentrados em áreas específicas da amostra, como Magnésio.

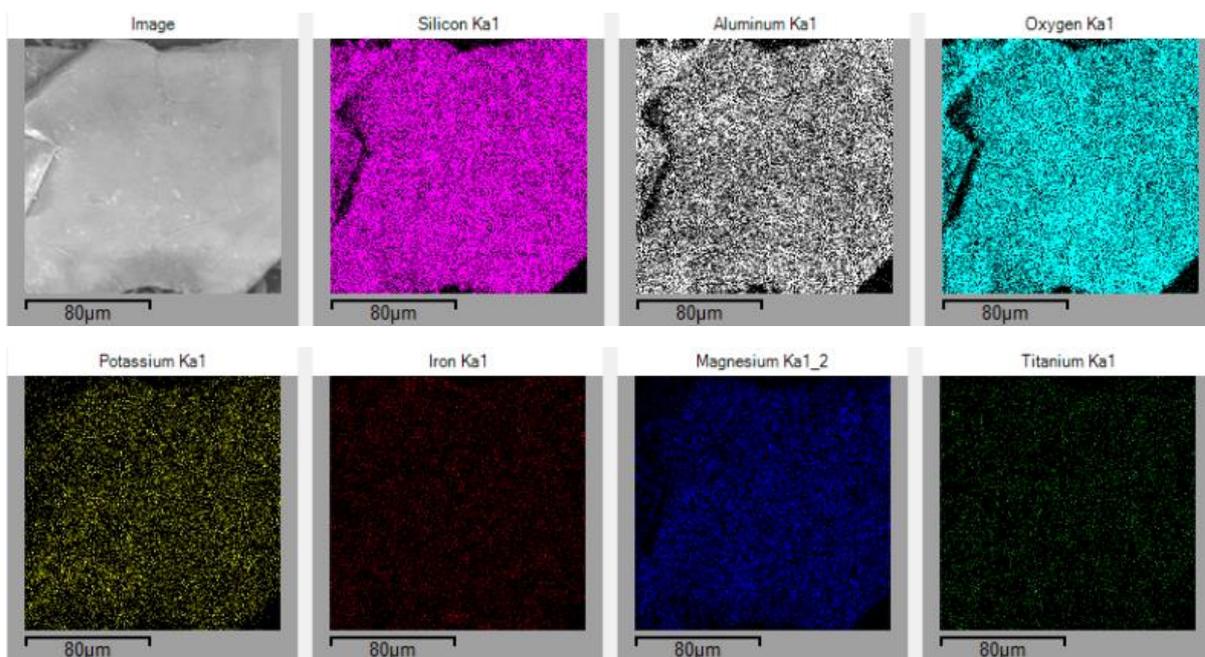


Figura 72: Micrografia de varredura eletrônica e mapeamento EDS do solo 2

As partículas visíveis na imagem têm formas variadas, incluindo algumas com bordas angulares e outras mais arredondadas. A presença de partículas angulares sugere que o solo contém minerais que não foram extensivamente transportados ou que estão próximos à fonte de origem. Minerais angulares podem indicar um solo jovem ou um ambiente com pouca erosão e transporte. Partículas mais arredondadas podem indicar transporte e erosão, resultando em superfícies mais suaves.

A análise qualitativa da imagem pode indicar a presença de minerais específicos com base na morfologia das partículas. Por exemplo, cristais com formas bem definidas e lisas podem ser indicativos de minerais como quartzo ou feldspatos.

A imagem (50 $\mu$ m) mostra partículas com formas variadas e algumas com estruturas lamelares bem definidas. A presença de partículas lamelares pode indicar a presença de minerais argilosos ou micáceos, como micas (biotita, muscovita) ou vermiculita. Essas informações podem ser conferidas nas imagens da Figura 73.

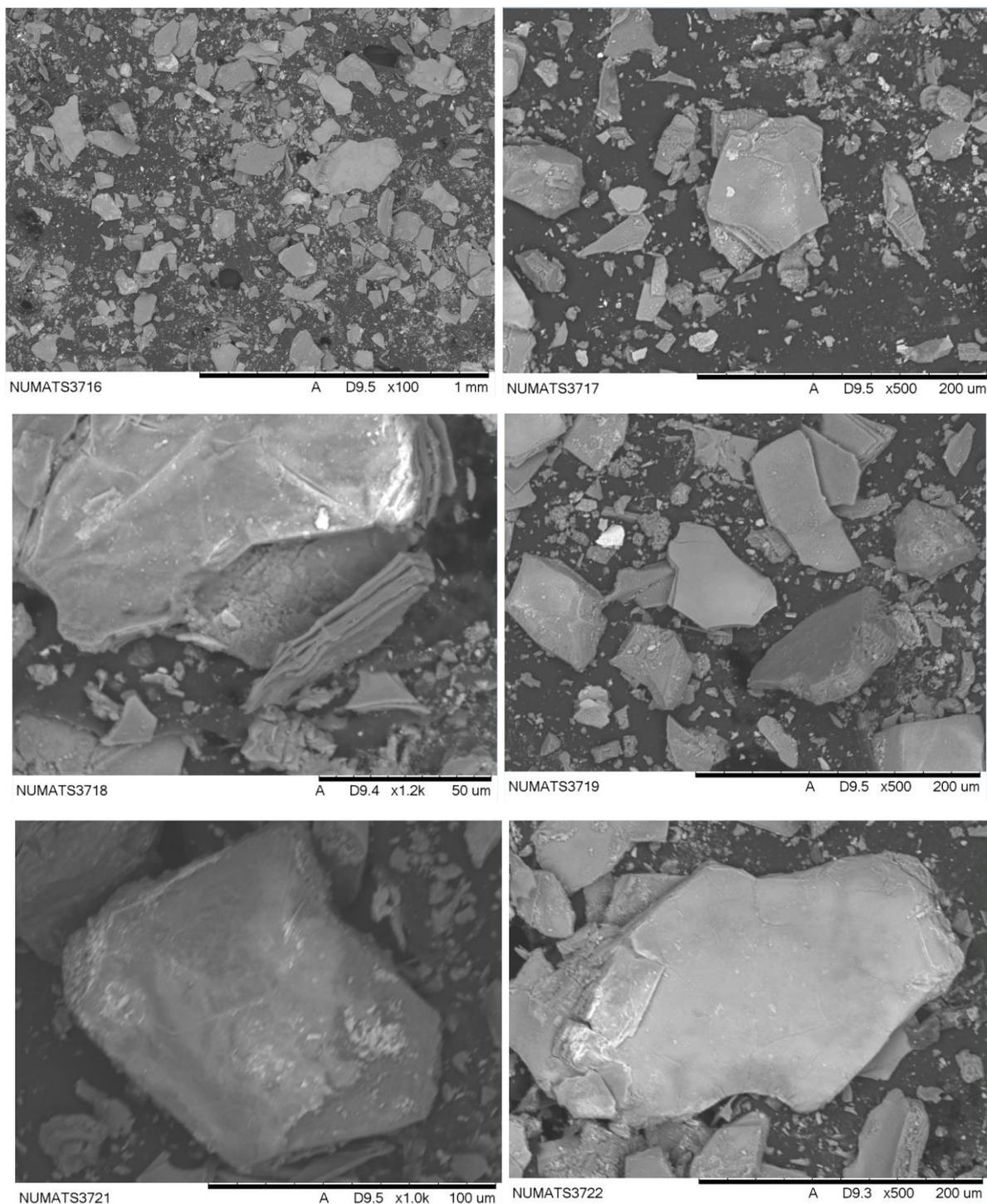


Figura 73: Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do solo 2

#### 5.4.2 *pH e intemperismo químico*

A diferença entre pH em H<sub>2</sub>O e em KCl pode indicar a predominância de cargas no solo. No Solo 1, o pH é mais alto em H<sub>2</sub>O (5,4) do que em KCl (3,95), indicando predominância de

cargas negativas. No Solo 2, o pH também é mais alto em H<sub>2</sub>O (6,98) do que em KCl (5,4), sugerindo uma maior predominância de cargas negativas comparado ao Solo 1.

Um valor mais alto de Ki indica menor intemperismo químico. O Solo 1 tem um Ki mais alto (10,52) sugerindo menor intemperismo comparado ao Solo 2 (4,44). Já um valor mais alto de Kr indica maior resistência ao intemperismo. O Solo 1 também apresenta maior resistência ao intemperismo (Kr = 5,28) em comparação ao Solo 2 (Kr = 3,36). Estas informações podem ser visualizadas na Tabela 19.

Tabela 19: pH e intemperismo químico

Amostra	pH		Ataque Sulfúrico						
	H <sub>2</sub> O	KCL 1M	ΔP (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Ki	Kr	Res. (%)
solo 1	5,4	3,95	1,59	31	5,01	7,78	10,52	5,28	71,36
solo 2	6,98	5,4	6,26	53,69	20,54	10,39	4,44	3,36	40,31

## 5.5 Emulsão escolhida

É essencial escolher a emulsão correta para garantir que o solo tratado tenha as propriedades desejadas.

Ambos os solos possuem uma quantidade considerável de finos, o que significa que estes solos contêm uma alta porcentagem de partículas pequenas, portanto uma maior área superficial para serem envoltas pelo filme de asfalto.

Tanto o Solo 1 quanto o Solo 2 têm características ácidas. Isso é importante porque solos ácidos têm mais cargas iônicas, o que influencia a interação com a emulsão.

A emulsão RL é recomendada para solos com muitos finos porque demora mais tempo para romper. Isso significa que há mais tempo para trabalhar e misturar a emulsão com o solo, garantindo uma distribuição mais uniforme e uma melhor estabilização.

Devido à acidez dos solos, a emulsão catiônica é a mais adequada. Solos ácidos, com suas cargas iônicas, interagem melhor com emulsões catiônicas. Quando a emulsão catiônica rompe, os glóbulos de asfalto se aderem melhor às partículas do solo com carga oposta, formando uma matriz mais estável e durável.

Para ambos os solos, a emulsão RL catiônica é a melhor escolha. Esta emulsão oferece um tempo de trabalho mais longo, permitindo uma melhor manipulação e mistura com o solo, além de garantir uma aderência eficaz devido à sua natureza catiônica.

Sendo assim, conforme pode ser visto na classificação da emulsão exibida na Tabela 20, o CAP residual em cada percentual de emulsão é a seguinte: 1% de emulsão (0,62%), 2% de emulsão (1,24%) e 3% de emulsão (1,86%), 4% de emulsão (2,48%), 5% de emulsão (3,10%) e 6% de emulsão (3,72%).

**Tabela 20: Classificação da emulsão asfáltica**

CARACTERÍSTICAS DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO ANP Nº 36, DE 13/11/2012 E REGULAMENTO TÉCNICO ANP N.º 6/2012	LIMITES	MÉTODO	REPRODUTIBILIDADE(*)	Carregamento
VISCOSIDADE SAYBOLT À 25°C,SSF	70 máx.	NBR-14491	± 21%	17
RESÍDUO POR EVAPORAÇÃO, % peso	60 mín.	NBR-14376	ND	62,0
PENEIRAMENTO, 0,84mm, % em peso	0,1 máx.	NBR-14393	± 0,08%	0
SEDIMENTAÇÃO, 5 DIAS, % peso	5 máx.	NBR-6570	± 10%	2
CARGA DA PARTÍCULA	Positiva	NBR-6567	ND	Positiva
MISTURA COM CIMENTO, %	2 máx.	NBR-6297	± 0,4%	0,2
pH	6,5 máx.	NBR-6299	ND	2,67

(\*) A diferença entre dois resultados de ensaios, individuais e independentes, obtidos por operadores diferentes trabalhando em laboratórios distintos e em amostras de mesmo material, com a execução correta e normal deste método, pode exceder os valores somente em um caso em vinte.

(\*\*) Ensaio não faz parte da especificação indicada. Apenas para informação. (ND) Não Determinado. (NA) Não Aplicável;

O percentual de emulsão foi determinado com base no peso seco do solo em estufa. Para uma amostra de 4000 g, foram utilizados 40 g de emulsão na estabilização com 1% de emulsão e assim por diante. Esses 40 g de emulsão, cujo volume equivalem a aproximadamente 43 ml a uma temperatura de 26°C, possui 62% de CAP (Resíduo por evaporação). O percentual de água restante, após descontar o da emulsão, foi adicionado até atingir a umidade ótima do solo

#### **5.4 Dosagem utilizando TCD**

Com base nos dados apresentados no gráfico da resistência à tração indireta (ITS) em função da dosagem de emulsão, podemos identificar a dosagem que proporciona a melhor performance do solo estabilizado.

Dados de TCD:

- 0% de Emulsão: ITS = 97,428
- 1% de Emulsão: ITS = 68,491
- 2% de Emulsão: ITS = 78,275
- 3% de Emulsão: ITS = 69,740
- 4% de Emulsão: ITS = 66,628
- 5% de Emulsão: ITS = 63,516
- 6% de Emulsão: ITS = 51,195

Ao observar os dados, Figura 74, percebe-se que a dosagem de **2% de emulsão** proporciona a melhor performance em termos de resistência à tração indireta após a adição de emulsão. Embora a resistência à tração indireta (ITS) a 2% ainda seja inferior ao valor sem emulsão, esta dosagem mostrou a maior resistência entre as dosagens testadas.

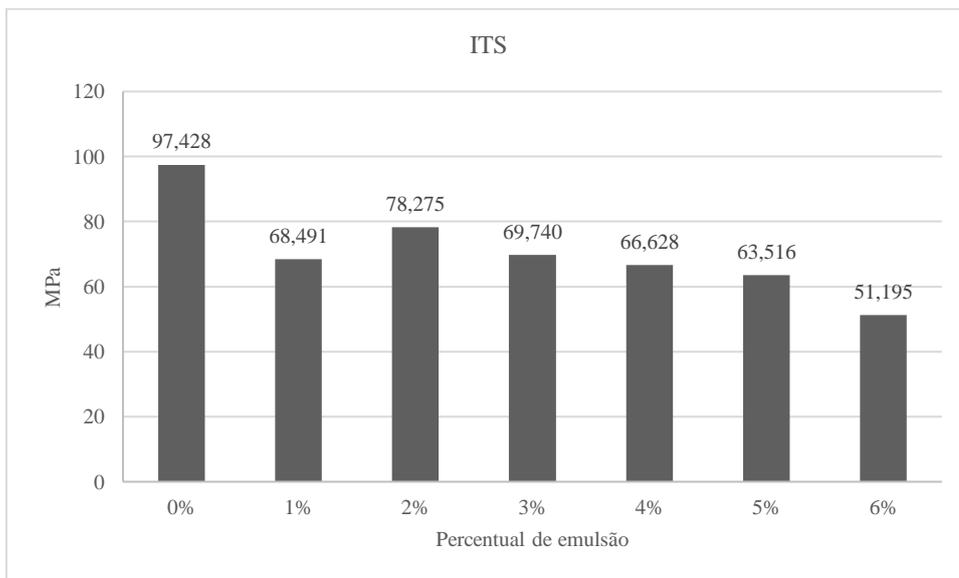


Figura 74: Tração por compressão diametral do solo 1

O gráfico apresentado mostra a variação da resistência à tração (TS) em KPa em função da dosagem de emulsão, variando de 0% a 6%. A análise desses dados é crucial para identificar a dosagem de emulsão que proporciona a melhor resistência à tração do solo.

Dados de TCD:

- 0% de Emulsão: TS = 40,80 KPa
- 1% de Emulsão: TS = 71,11 KPa
- 2% de Emulsão: TS = 59,60 KPa
- 3% de Emulsão: TS = 56,76 KPa
- 4% de Emulsão: TS = 47,86 KPa
- 5% de Emulsão: TS = 47,04 KPa
- 6% de Emulsão: TS = 40,33 KPa

Ao observar os dados, Figura 75, percebe-se que a dosagem de 1% de emulsão proporciona a melhor performance em termos de resistência à tração, com um valor de TS de 71,11 KPa. Esta dosagem mostrou a maior resistência entre todas as dosagens testadas.

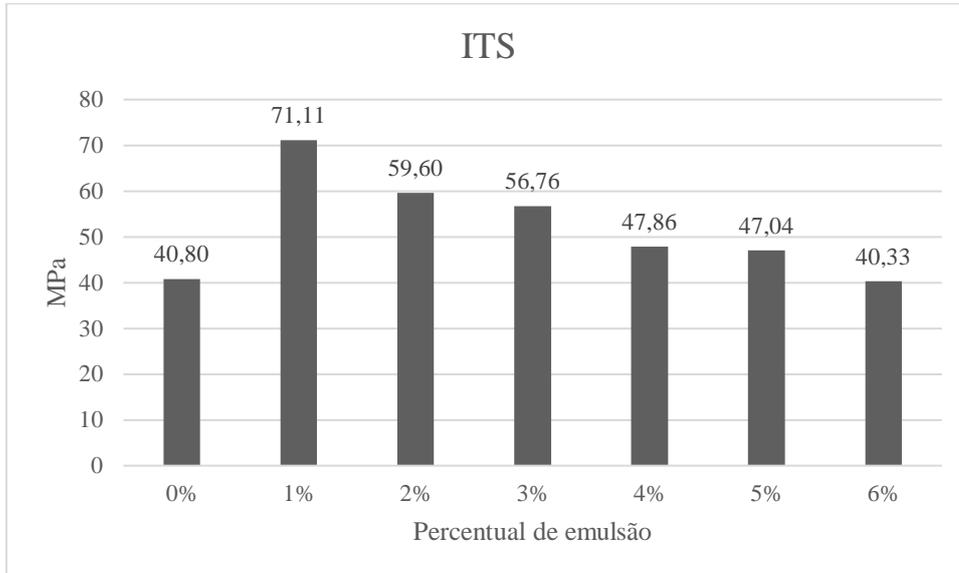


Figura 75: Tração por compressão diametral do solo 2

## 5.5 Módulo resiliente

### 5.5.1 Módulo resiliente do solo 1

Na Figura 76 observa-se que quando a tensão confinante aumenta, há um aumento no Módulo de Resiliência (MR), indicando que uma maior tensão de confinamento melhora a rigidez do solo à deformação elástica. Este comportamento é observado em ambos os tipos de solo, tanto no solo controle quanto no solo estabilizado. Nos ciclos 4, 5 e 6, o solo estabilizado com 1,5% de emulsão apresenta um comportamento distinto. Ao contrário dos ciclos anteriores e posteriores, o MR não diminui. No entanto, para o solo controle, observa-se uma diminuição do MR nos ciclos 14 e 17 e um aumento nos ciclos 15 e 16, dentro dos dois últimos conjuntos de ciclos de mesma tensão confinante. O ganho de rigidez média foi de 93,16%.

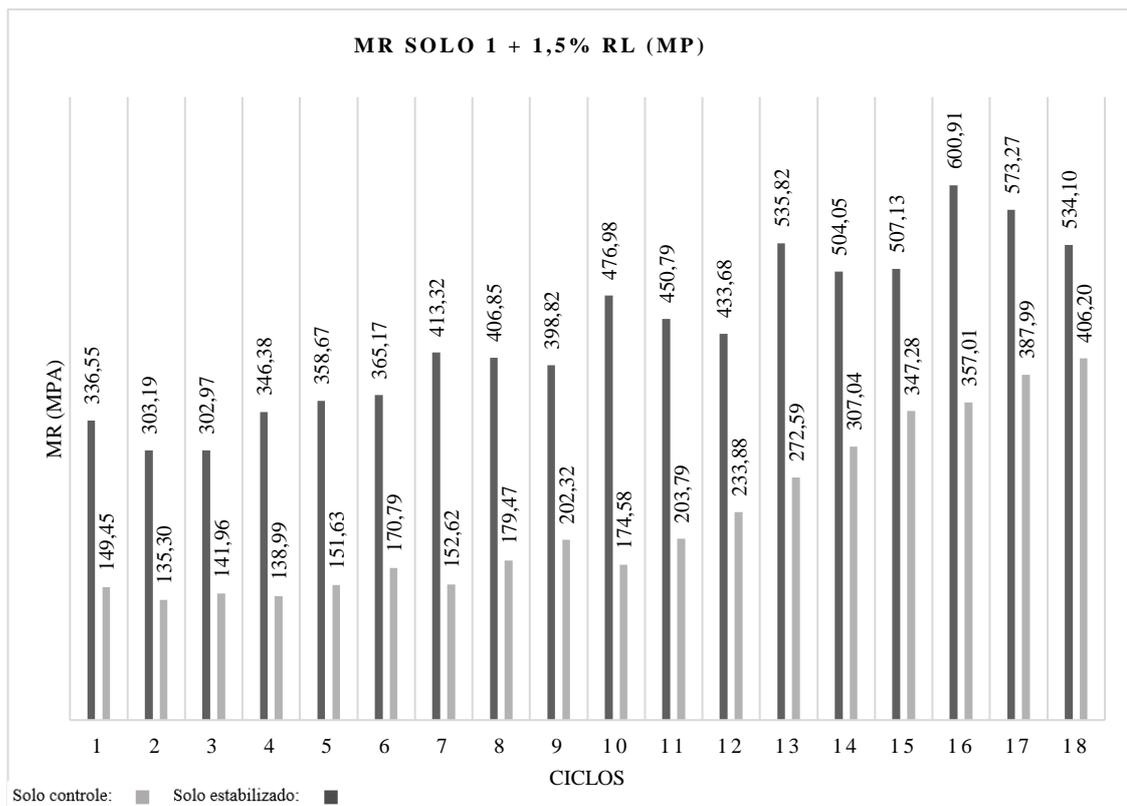


Figura 76: MR do solo 1 e do solo 1 + 1,5% de emulsão

Na Figura 77 observa-se que a estabilização do solo com 2% de emulsão resulta em um incremento significativo na rigidez e na capacidade de recuperação elástica em comparação com o solo controle. Dentro dos ciclos de mesma tensão confinante, o aumento da tensão de desvio diminui o Módulo de Resiliência (MR) no solo estabilizado, indicando que a emulsão melhora o desempenho elástico do solo com o aumento da tensão confinante, mas reduz sua rigidez com o aumento da tensão de desvio para este percentual de CAP. Esses resultados confirmam que a estabilização com emulsão de 2% é mais eficaz, especialmente sob condições de alto estresse, resultando em maiores valores absolutos de MR. O ganho de rigidez médio foi de 115,47%.

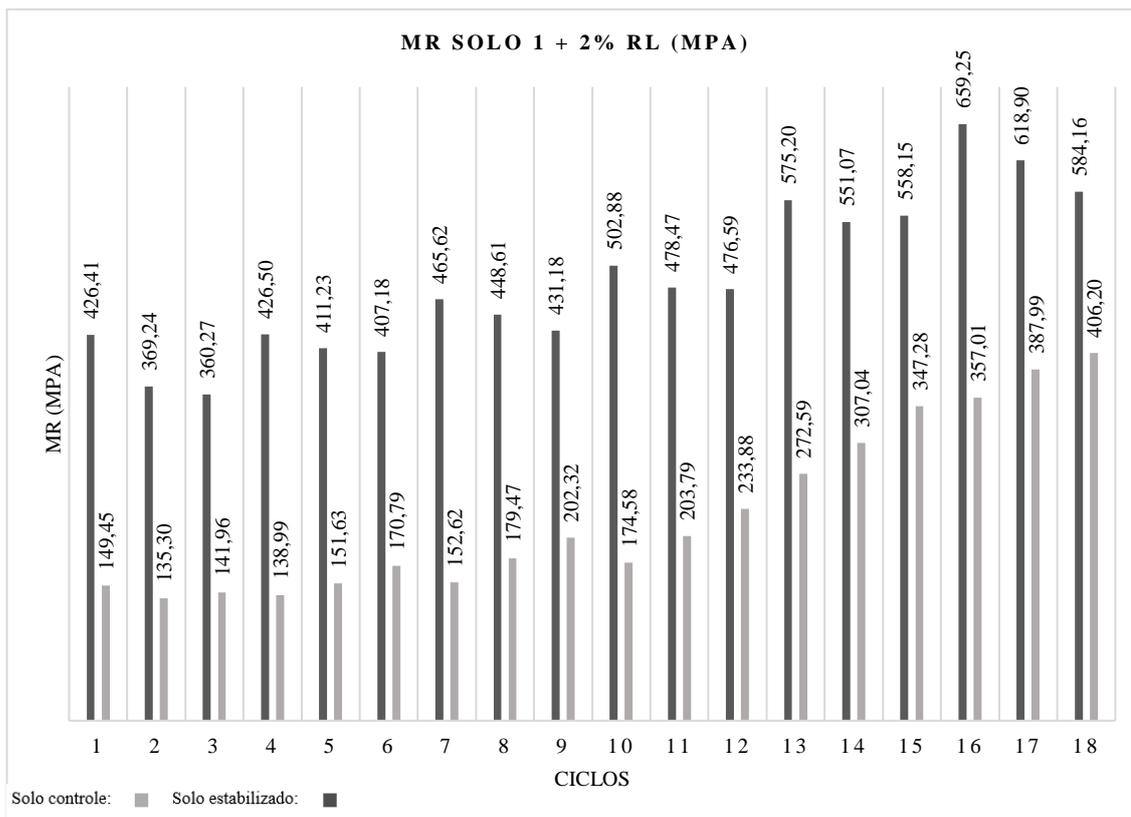


Figura 77: MR do solo 1 e do solo 1 + 2% de emulsão

A estabilização do solo com 2,5% de emulsão, Figura 78 altera o comportamento do solo, que passa a responder positivamente ao aumento da Tensão de Desvio (TD), excetuando-se nos três últimos ciclos de carregamento. Observa-se que, nos ciclos iniciais, os valores de Módulo de Resiliência (MR) são menores em comparação com outras estabilizações, mas alcança valores significativamente maiores conforme os ciclos de carregamento são incrementados. O ganho de rigidez média foi de 94,44%.

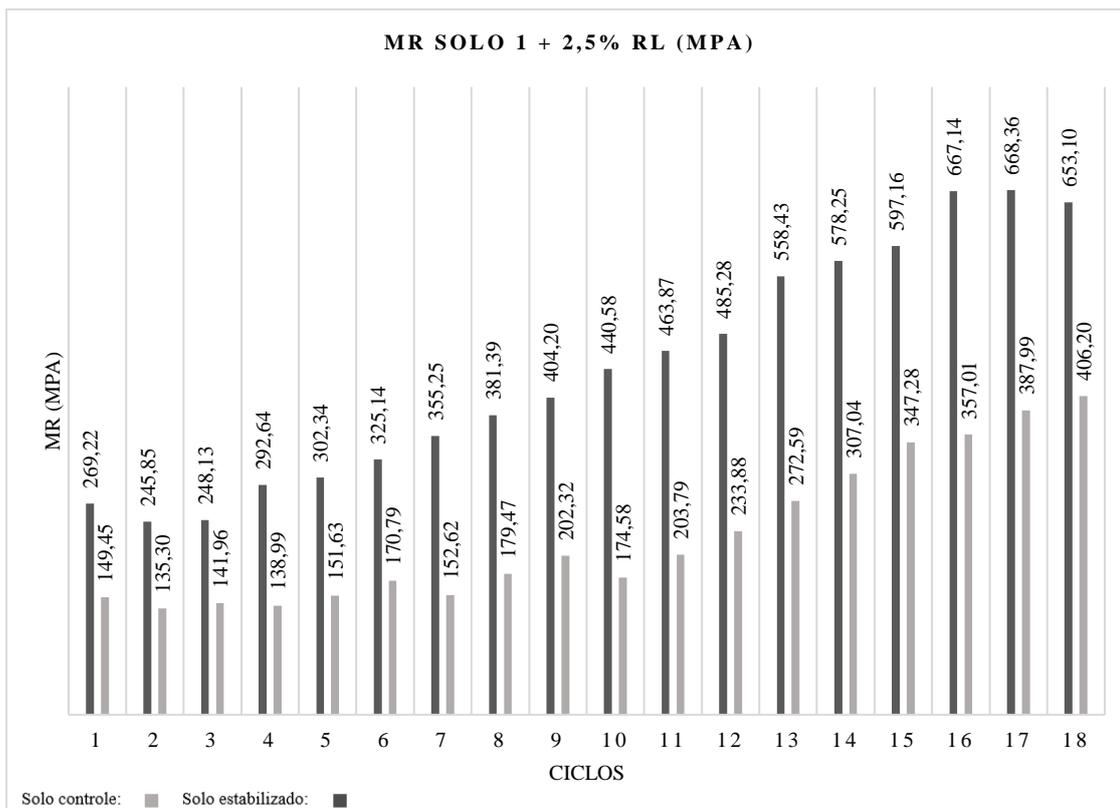


Figura 78: MR do solo 1 e do solo 1 + 2,5% de emulsão

A estabilização do solo com 30% de fresado resulta em um aumento significativo da rigidez e na capacidade de recuperação elástica em comparação com o solo controle e os solos estabilizados apenas com emulsão, conforme exibido na Figura 79. Exceto nos ciclos de 4 a 9, observa-se que o solo estabilizado com fresado diminui sua rigidez quando a Tensão de Desvio (TD) é aumentada para o mesmo valor de Tensão Confinante (TC). O ganho de rigidez média foi de 154,41%.

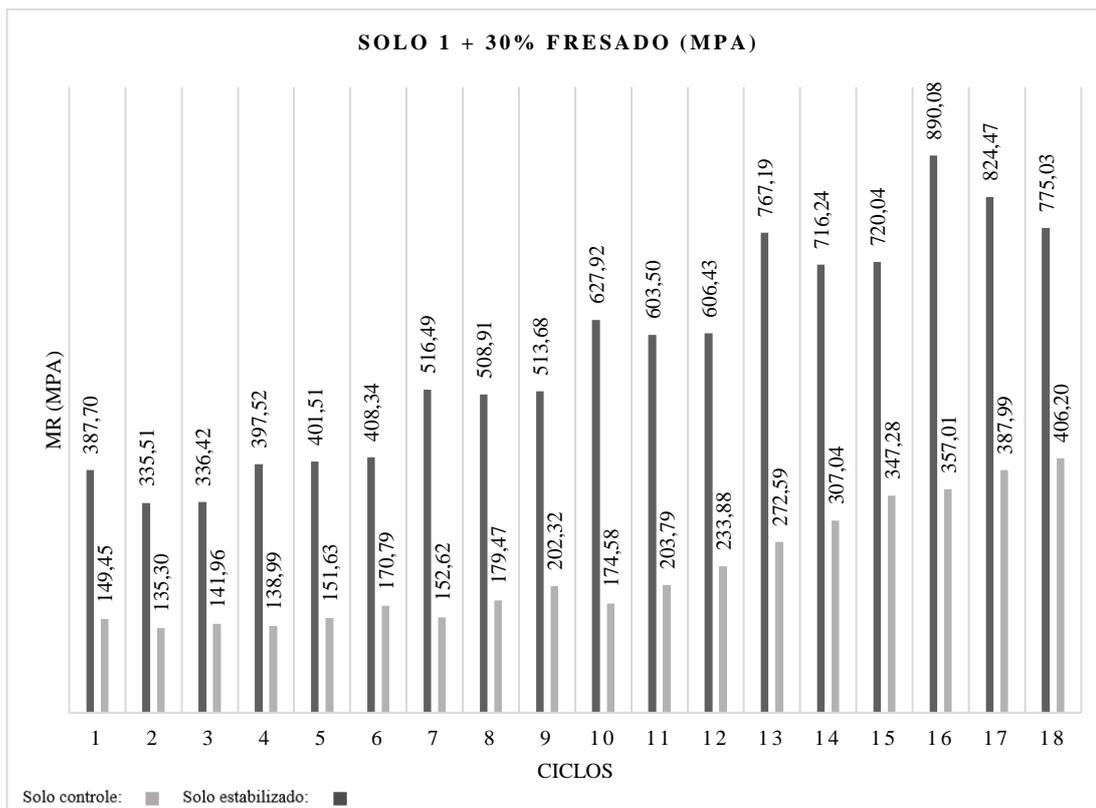


Figura 79: MR do solo 1 e do solo 1 + 30% de fresado

Na Figura 80 é possível se visualizar a comparação do solo controle com o solo estabilizado com fresado e 2% de emulsão alcança uma rigidez superior em todos os ciclos de carregamento, apesar de continuar a responder negativamente ao aumento da Tensão de Desvio (TD). Houve uma pequena perda de rigidez em comparação com o composto estabilizado apenas com fresado, sem emulsão. O ganho de rigidez média foi de 113,63%.

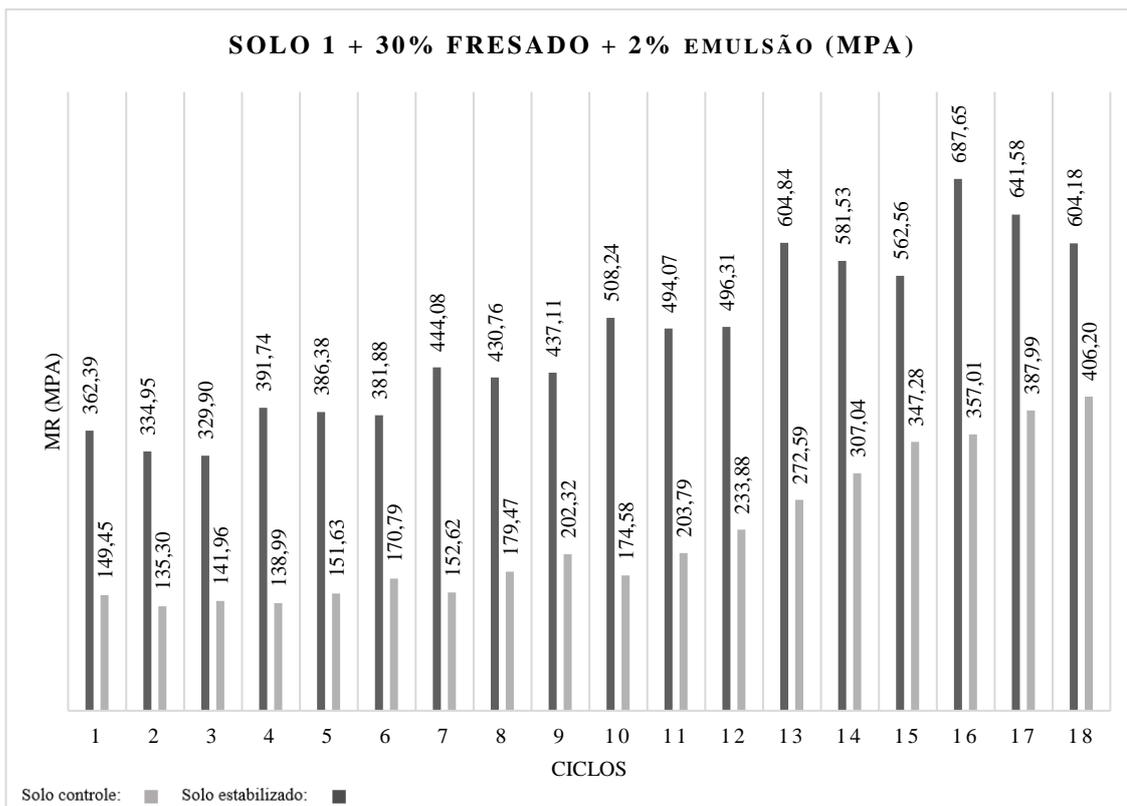


Figura 80: MR do solo 1 e do solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão

Vale observar na Figura 81 que o solo 1 com 50% de fresado responde melhor ao acréscimo de TD. O decréscimo de rigidez acontece apenas nos últimos 3 ciclos para o aumento de TD. Para os demais o composto solo fresado respondeu satisfatoriamente ao aumento de TD e TC. De forma similar a estabilização com 2,5% de emulsão, a estabilização começa com valores menores de MR e aumentam significativamente a rigidez nos ciclos finais. O ganho de rigidez média foi de 83,20%.

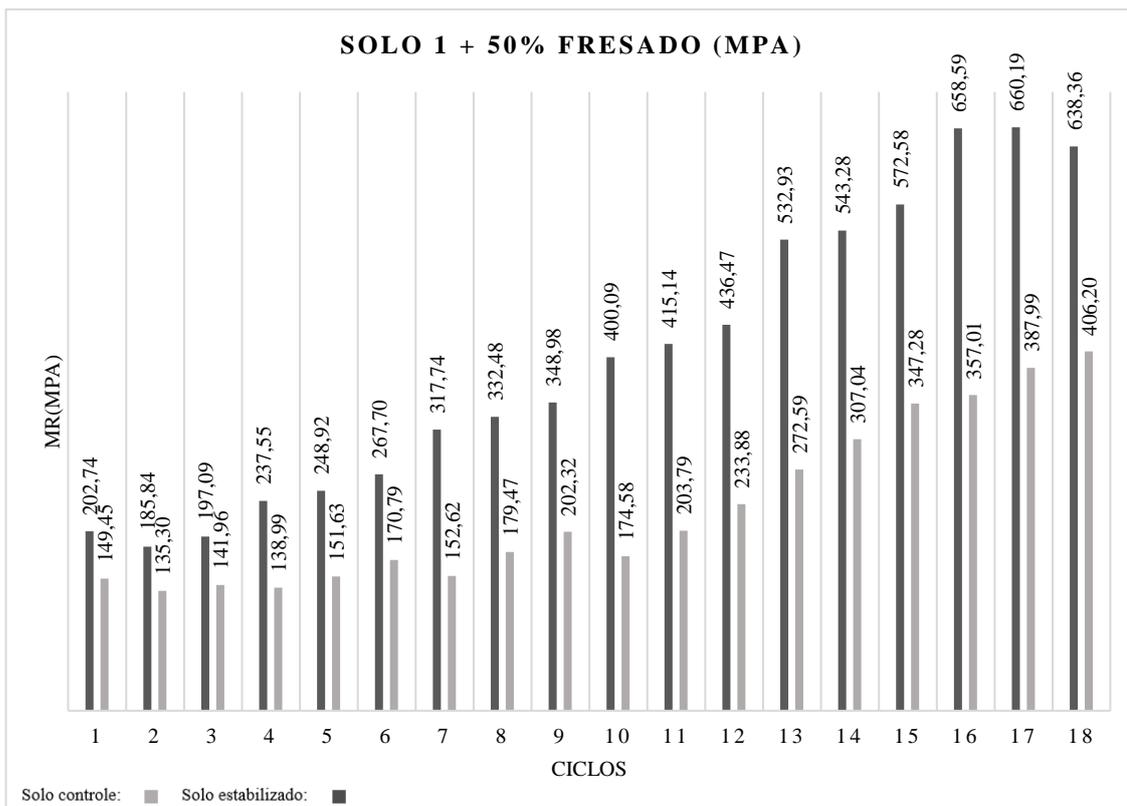


Figura 81: MR do solo 1 e do solo 1 + 50% de fresado

Ao se adicionar 2% de emulsão ao composto com 50% de fresado em que o composto passa a responder com perda de rigidez ao aumento da TD. É possível se observar, Figura 82, também, uma mudança de comportamento, porém, com valores significativamente superior ao solo controle. O ganho de rigidez média foi de 119,49%.

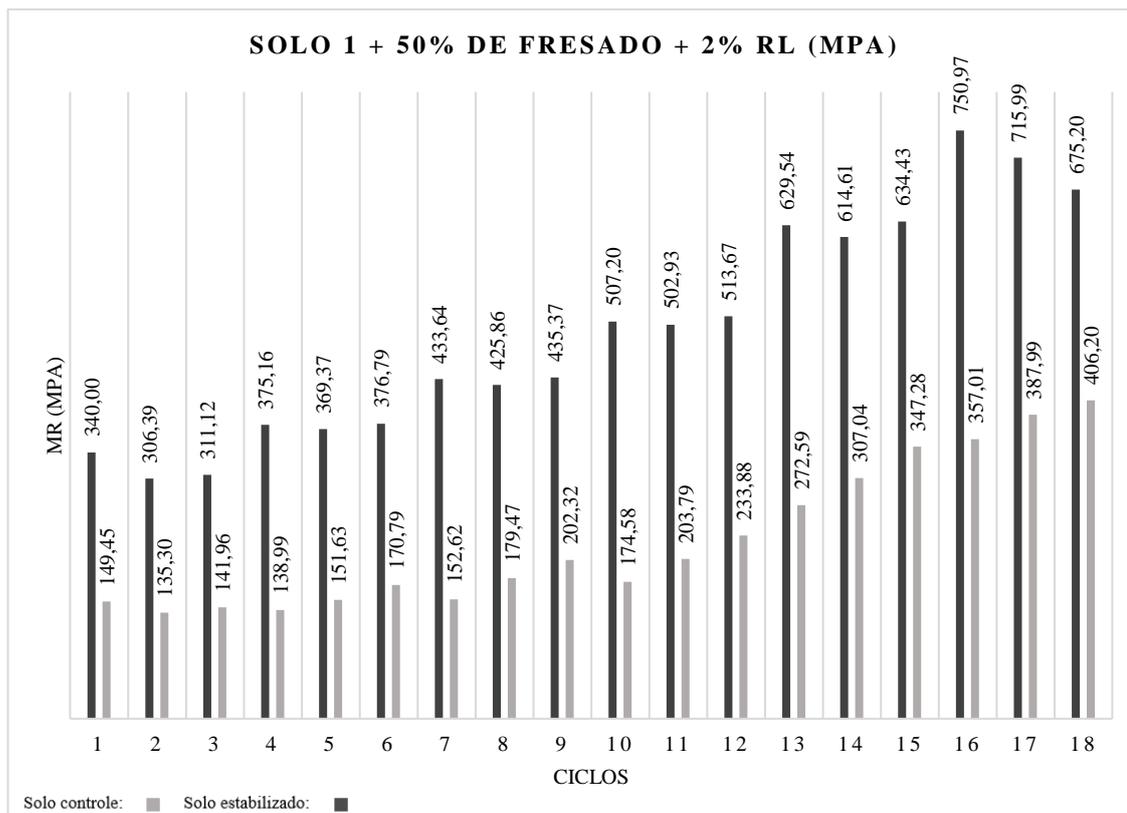


Figura 82: MR do solo 1 e do solo 1 + 50% de fresado 2% de emulsão

Todas essas informações não podem ser conjeturadas apenas com modelos numéricos, que pode ajustar o  $k_2$  e  $k_3$ , como expoentes positivos ou negativos, como no caso do modelo composto, porém, é possível se verificar em alguns exemplos que o material não responde às solicitações de forma estática, variando seu comportamento conforme o tipo de estabilização.

Os dados apresentados na Tabela 21 mostram o Módulo de Resiliência (MR) médio do solo 1 e suas variações com a adição de diferentes teores de emulsão e fresado (FRSD) ao longo de cinco estágios de carregamento. O solo 1 puro, sem adição de estabilizantes, apresenta um aumento contínuo no MR, partindo de 536,415 MPa no estágio 1 e atingindo 901,269 MPa no estágio 5. Esse comportamento indica que o solo, em sua forma natural, apresenta maior rigidez conforme o carregamento se intensifica.

Quando se adiciona 1,5% de emulsão ao solo 1, observa-se uma melhora inicial no MR, com 567,856 MPa no estágio 1, valor superior ao do solo *in natura*. Contudo, à medida que os estágios avançam, o ganho de MR em relação ao solo puro diminui, com o MR final alcançando 785,743 MPa no estágio 5, valor inferior ao do solo sem emulsão. Isso sugere que a adição de 1,5% de emulsão proporciona alguma melhora na rigidez inicial, mas essa vantagem não se sustenta nos estágios finais de carregamento.

Com a adição de 2% de emulsão, os valores de MR se mantêm semelhantes aos da amostra com 1,5% de emulsão, com uma leve melhora nos primeiros estágios, mas uma tendência de estabilização nos estágios finais, com o MR no estágio 5 atingindo 728,811 MPa, abaixo do valor do solo 1. Essa adição de emulsão não proporciona uma melhora significativa no comportamento mecânico do solo e, nos estágios mais avançados, parece até reduzir a eficiência.

Por outro lado, ao adicionar 2,5% de emulsão, o MR do solo cai consideravelmente em relação ao solo puro e às amostras com menor teor de emulsão. O MR no estágio 1 é de 515,949 MPa, e, apesar de apresentar uma recuperação nos estágios 4 e 5, atingindo 693,989 MPa, o comportamento geral é o pior entre todas as amostras. Isso sugere que o aumento do teor de emulsão pode ter um efeito adverso, provavelmente devido ao excesso de emulsão que afeta negativamente a coesão e a rigidez do solo.

A adição de 30% de fresado, por sua vez, tem um impacto significativo no aumento do MR em todos os estágios. No estágio 1, o MR é de 701,235 MPa, e no estágio 5, chega a 988,211 MPa, o valor mais alto registrado entre todas as combinações testadas. Isso indica que a adição de fresado melhora substancialmente o desempenho mecânico do solo, proporcionando uma maior rigidez à deformação sob carregamento repetido.

Quando se adiciona 2% de emulsão à mistura de 30% de fresado, observa-se um desempenho também elevado, com o MR final alcançando 967,458 MPa no estágio 5, ligeiramente inferior à mistura de 30% de fresado sem emulsão. Isso sugere que a adição de emulsão a essa composição específica não traz benefícios adicionais expressivos.

Já com a adição de 50% de fresado, o MR é inferior ao observado com 30% de fresado. No estágio 1, o MR é de 529,113 MPa, e no estágio 5 chega a 800,983 MPa. Embora os valores de MR ainda sejam superiores aos do solo, essa quantidade maior de fresado parece não proporcionar um ganho adicional de rigidez, o que indica que o teor de 30% de fresado pode ser mais eficiente para a estabilização.

A combinação de 50% de fresado com 2% de emulsão apresenta uma melhora em relação ao fresado puro, com o MR final no estágio 5 alcançando 943,872 MPa. Contudo, esse valor ainda é inferior ao da mistura com 30% de fresado, reforçando que a adição de maiores quantidades de fresado não resulta necessariamente em um desempenho melhor e que a combinação com emulsão tem efeitos limitados.

De forma geral, a análise dos dados mostra que a adição de fresado melhora significativamente o Módulo de Resiliência do Solo 1, especialmente com 30% de fresado, que apresentou os melhores resultados. A adição de emulsão, por sua vez, parece ter um impacto misto: teores menores, como 1% e 1,5%, podem melhorar o desempenho inicial, mas teores maiores, como 2% e 2,5%, tendem a reduzir a rigidez do solo, especialmente nos estágios finais de carregamento.

Tabela 21: MR médio do solo 1

MR de cada estágio (MPa)	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
Solo 1	536,415	611,224	737,526	836,360	901,269
Solo 1 + 1,5% RL	567,856	626,757	664,369	734,619	785,743
Solo 1 + 2% RL	585,789	619,044	665,965	673,308	728,811
Solo 1 + 2,5% RL	515,949	504,564	547,687	631,346	693,989
Solo 1 + 30% FRSD	701,235	753,726	830,379	916,077	988,211
Solo 1 + 30% FRSD + 2% RL	749,532	839,376	863,598	923,601	967,458
Solo 1 + 50% FRSD	529,113	582,140	657,819	741,945	800,983
Solo 1 + 50% FRSD + 2% RL	596,872	690,708	777,946	888,664	943,872

### 5.5.2 Ajuste do modelo composto para o solo 1

A Tabela 22 contém um modelo composto para diferentes misturas de solo, onde MR é dada pela equação  $MR = k_1 \times S_3^{k_2} \times S_d^{k_3}$ . Aqui,  $S_3$  é a tensão confinante, e  $S_d$  é a tensão desviadora. Os coeficientes  $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ , juntamente com os valores de  $R^2$  para o ajuste, são fornecidos para cada mistura de solo.

Tabela 22: Modelo composto para o solo 1 e seus compostos

material	modelo composto			ajuste
	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$R^2$
solo 1 CTR	1160,393	0,48	0,16	0,939
Solo 1 + 1,5% RL	1099,847	0,4	-0,08	0,981
Solo 1 + 2% RL	1101,399	0,36	-0,08	0,962
Solo 1 + 2,5% RL	1954,449	0,52	0,04	0,989
Solo 1 + 30% FRSD	2216,195	0,56	-0,08	0,982
Solo 1 + 30% FRSD + 2% RL	1355,071	0,44	-0,08	0,986
Solo 1 + 50% FRSD	2421,477	0,64	0,04	0,993
Solo 1 + 50% FRSD + 2% RL	1864,692	0,52	-0,04	0,985

$k_1$  representa o valor inicial do módulo quando tanto  $S_3$  quanto  $S_d$  estão em seus valores de referência (1 unidade). O valor de  $k_1$  aumenta significativamente com a adição de fresado.

O maior valor de  $k_1$  é para a mistura com 50% de fresado. (2421,477), indicando um módulo inicial muito mais alto. O menor valor de  $k_1$  é para o solo controle (solo 1 CTR) (621,104), mostrando o módulo de referência sem qualquer reforço ou aditivo.

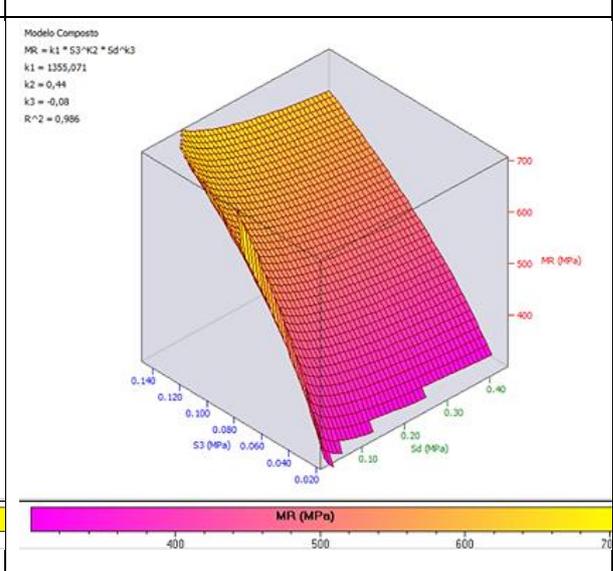
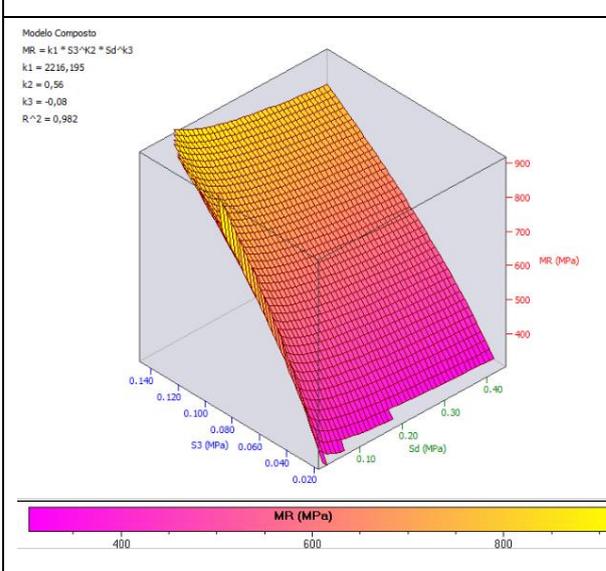
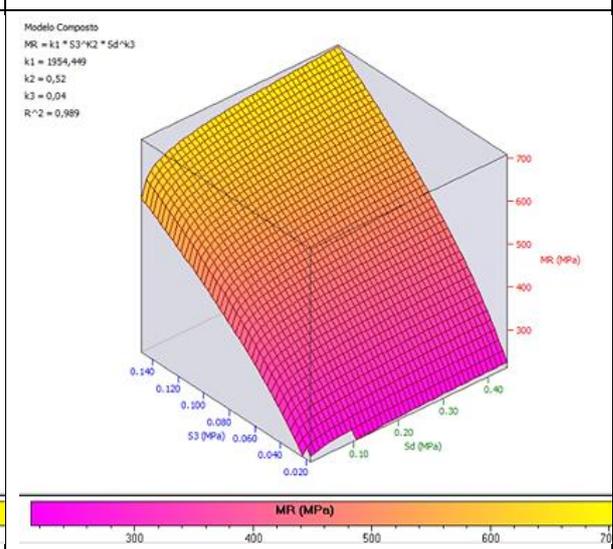
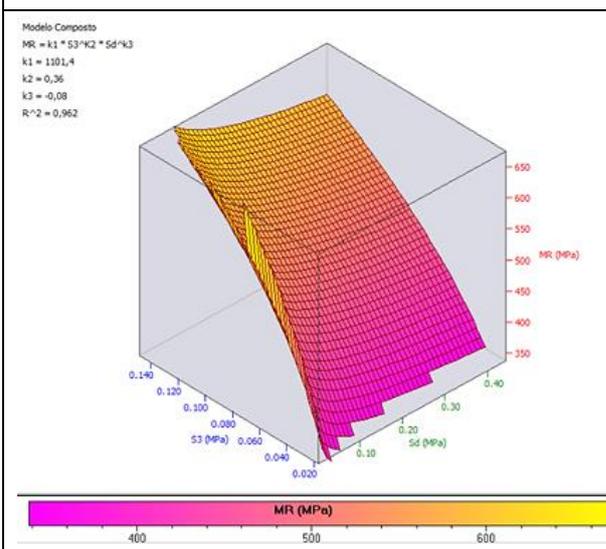
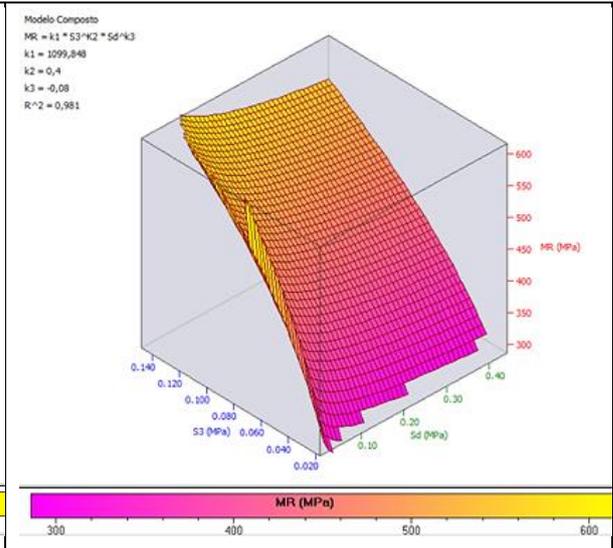
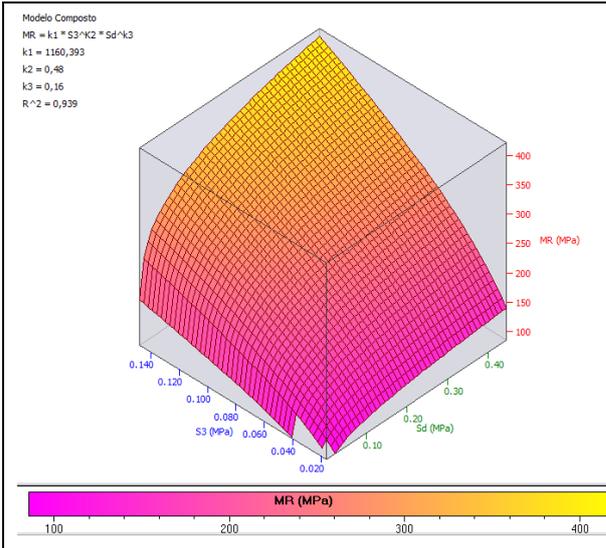
$k_2$  é o expoente para a tensão confinante  $S_3$ . Os valores variam de 0,36 a 0,64, sugerindo diferentes graus de sensibilidade à tensão confinante. A maior sensibilidade a  $S_3$  é observada na mistura com 50% de fresado (0,64). A menor sensibilidade a  $S_3$  é para a mistura com 2% de RL (0,36).

$k_3$  é o expoente para a tensão desviadora  $S_d$ . A maioria dos valores de  $k_3$  são negativos, indicando uma diminuição no módulo com o aumento da tensão desviadora, exceto para as misturas com 2,5% de emulsão e 50% de fresado. Valores positivos de  $k_3$  sugerem uma interação diferente da tensão desviadora com o módulo nessas misturas.

Os valores de  $R^2$  variam de 0,949 a 0,993, indicando um alto grau de ajuste para todos os modelos. O maior valor de  $R^2$  é para a mistura com 50% de fresado (0,993), sugerindo que este modelo se ajusta excepcionalmente bem aos dados. O menor valor de  $R^2$  é para o solo base (solo 1 CTR) (0,949), mas ainda é considerado um bom ajuste.

Por fim, conclui-se que a adição de emulsão ou fresado aumenta significativamente o módulo inicial  $k_1$ , especialmente com maiores percentuais de fresado. A sensibilidade à tensão confinante  $k_2$  geralmente aumenta com a adição de fresado. A resposta à tensão desviadora  $k_3$  varia, com algumas misturas mostrando uma diminuição no módulo com o aumento de  $S_d$  e outras mostrando um aumento. No geral, todos os modelos se ajustam bem aos dados, como indicado pelos altos valores de  $R^2$ , com o melhor ajuste observado para a mistura com 50% de fresado.

Os gráficos tridimensionais foram gerados para visualizar como o módulo de resiliência (MR) varia em função da tensão confinante ( $S_3$ ) e da tensão desviadora ( $S_d$ ).



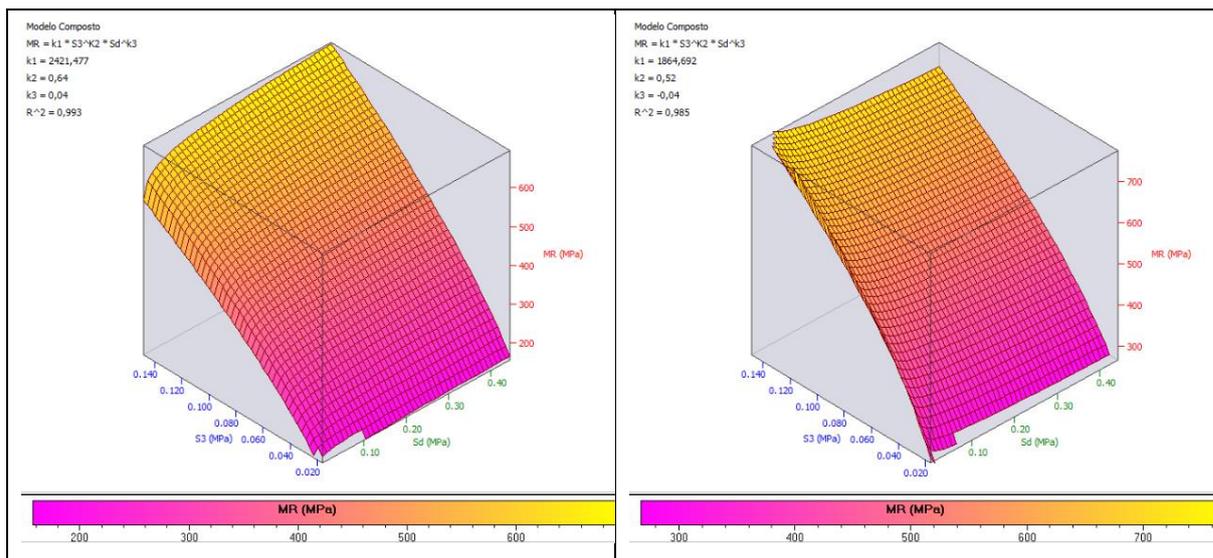


Figura 83: Gráfico 3D do modelo composto do solo 1 e seus compostos

### 5.5.3 Módulo resiliente do solo 2

É possível se observar na Figura 84 que a emulsão não alterou o comportamento do solo 2, além de não melhorar o ganho de rigidez, o solo estabilizado continuou respondendo negativamente ao incremento da tensão desvio e confinante. Com 42% de solo passante na peneira 0,075 mm isso era esperado. A emulsão não consegue envolver todos os grãos e surgem grumos. É média, o ganho de rigidez foi de 4%, o que não refutaria a dispersão experimental.

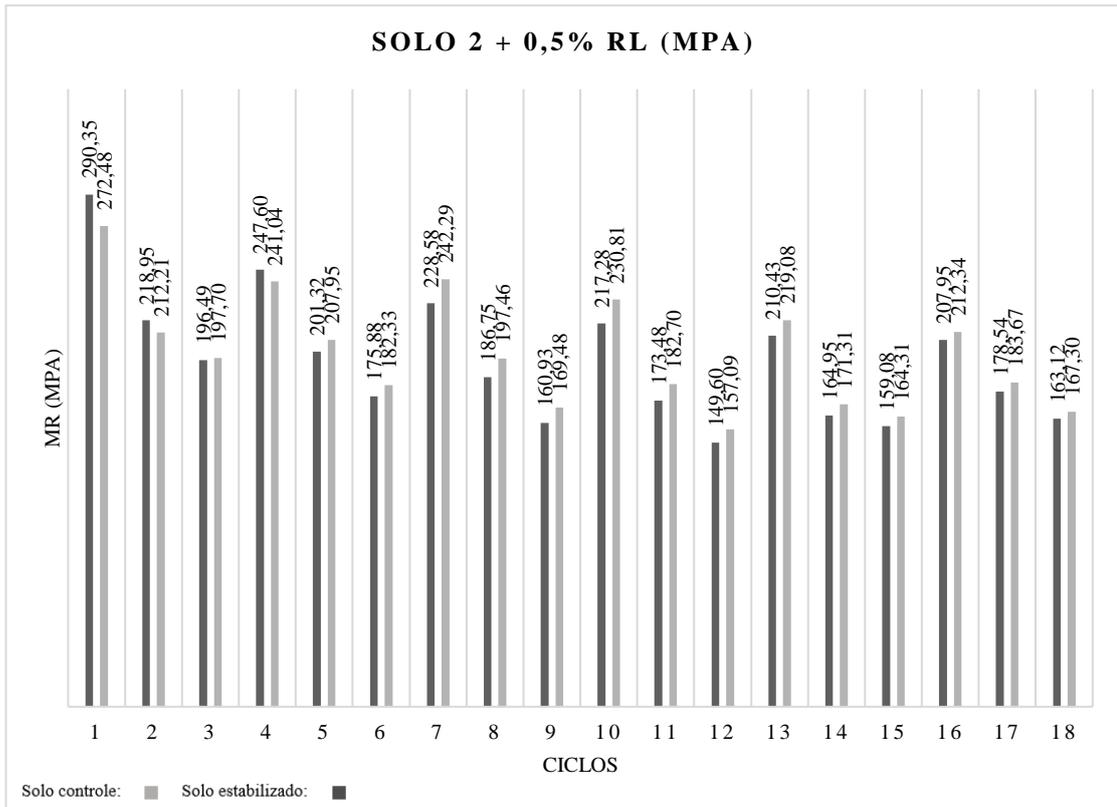


Figura 84: MR do solo 2 e do solo 2 + 0,5% de emulsão

Para estabilização com 1% de emulsão RL, o percentual de diferença entre as médias é de aproximadamente 16,19%. Isso significa que o solo estabilizado apresentou uma rigidez média 16,19% maior em comparação com o solo 2. Mas, é possível se verificar que não houve mudança no comportamento do solo estabilizado, conforme Figura 85.

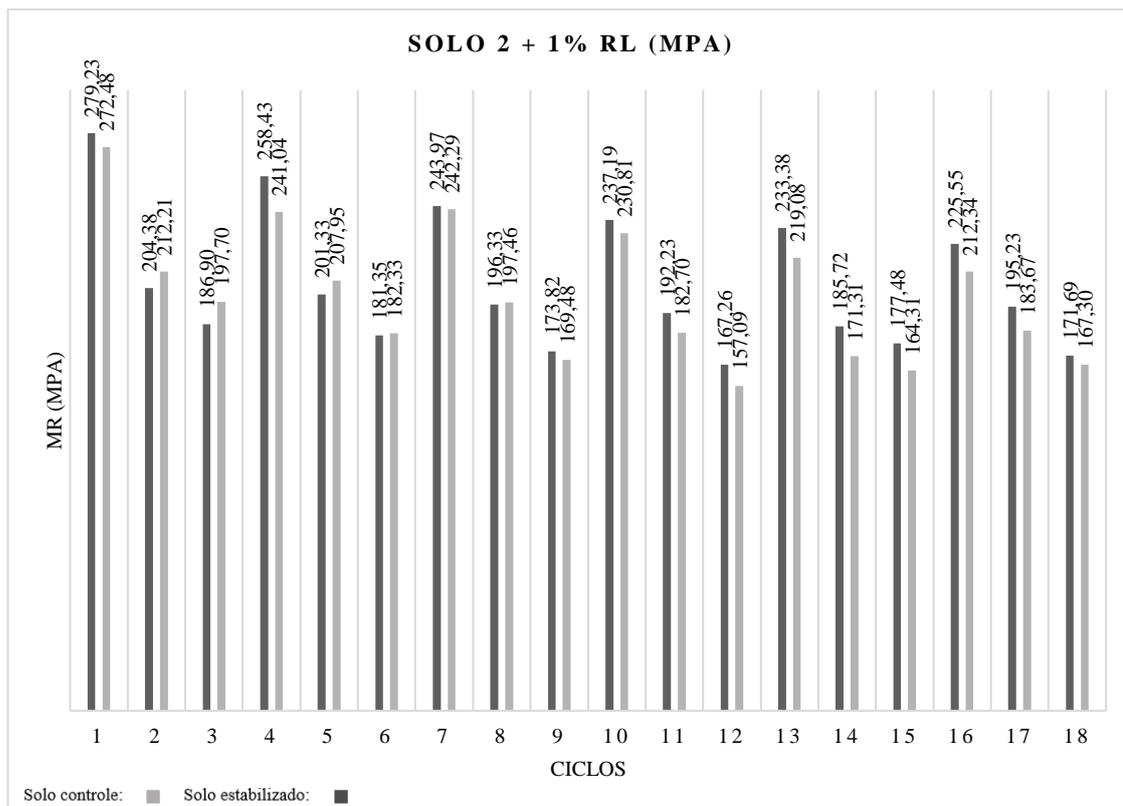


Figura 85: MR do solo 2 e do solo 2 + 1% de emulsão

Para o solo estabilizado com 1,5% de emulsão, o percentual de diferença entre as médias é de aproximadamente 10,31%. Isso significa que o solo estabilizado com 1,5% de emulsão apresentou uma rigidez média 10,31% maior em comparação com o solo 2. Aqui, Figura 86, também se observa que não houve mudança no comportamento resiliente do solo.

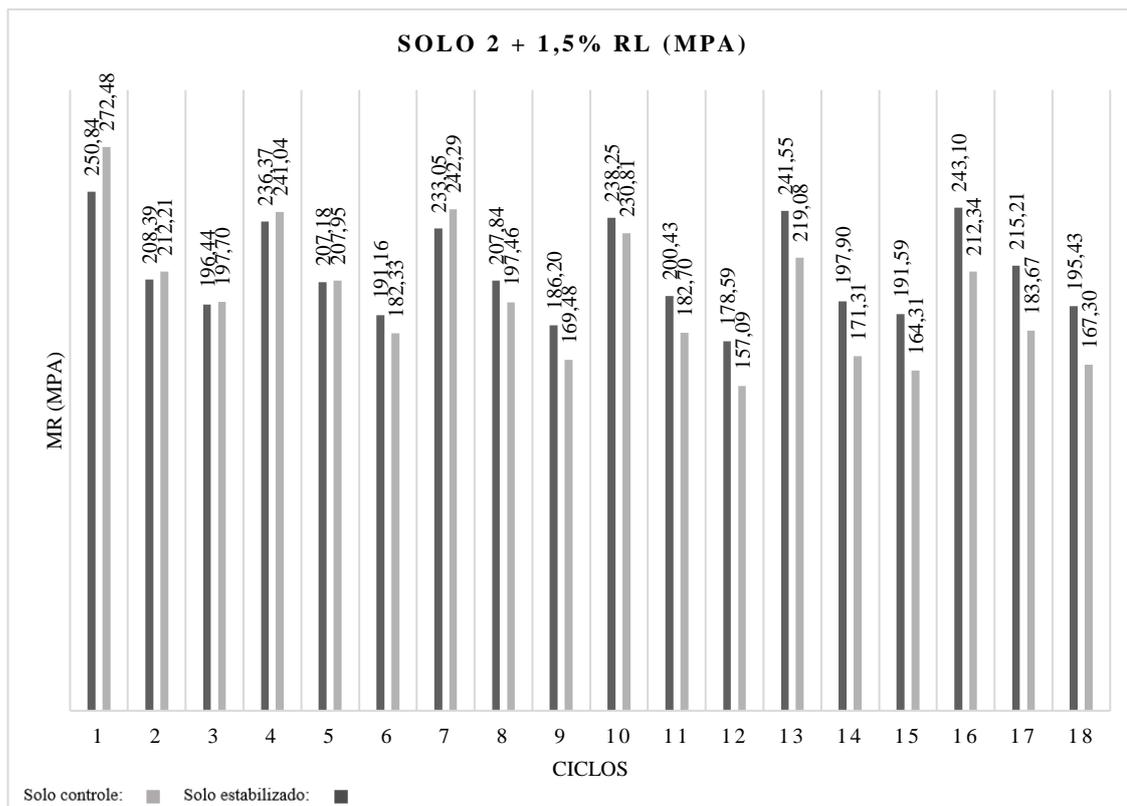


Figura 86: MR do solo 2 e do solo 2 + 1,5% de emulsão

O percentual de diferença entre as médias é de aproximadamente 86,40%. Isso significa que o solo estabilizado com 30% fresado apresentou uma rigidez média 86,40% maior em comparação com o solo 2. Quando se insere o fresado, se diminui a quantidade de material passante na peneira 200, que com 30% de fresado é de aproximadamente 33% para o composto solo fresado, o que foi suficiente para alterar substancialmente o comportamento do material, que passou a responder melhor ao aumento da tensão confinante, conforme pode ser analisado na Figura 87

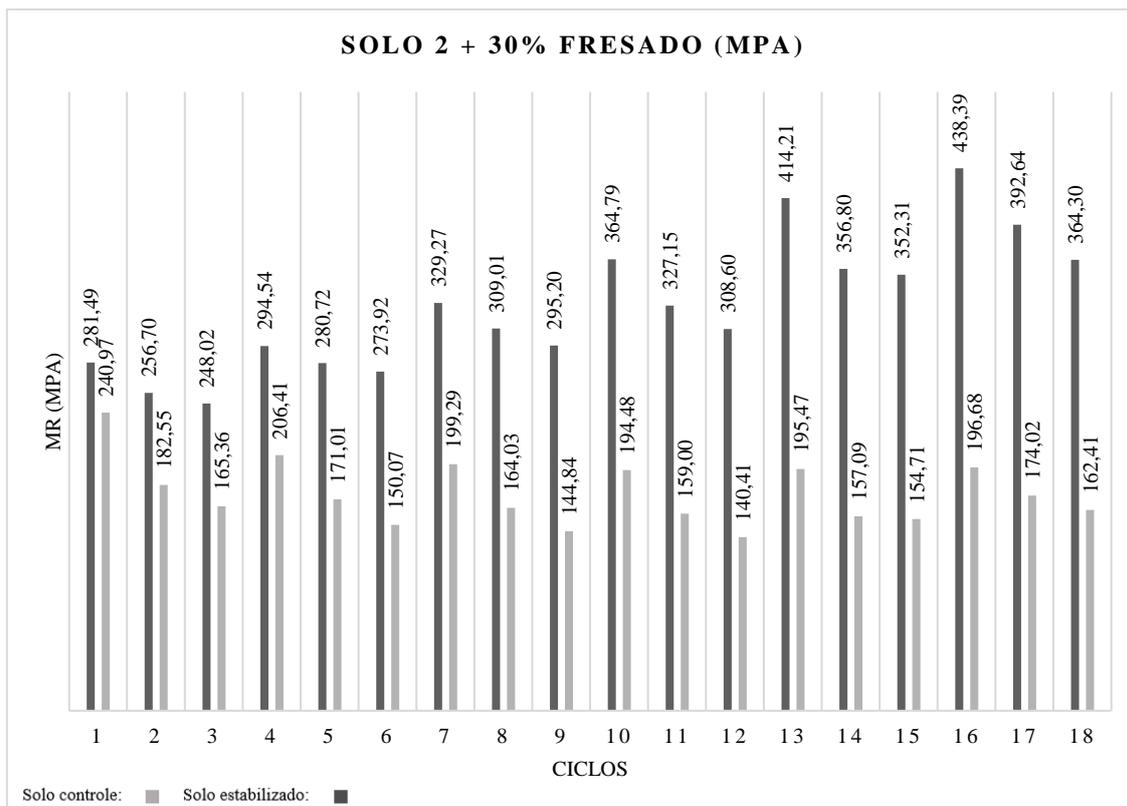


Figura 87: MR do solo 2 e do solo 2 + 30% de fresado

O solo 2 com 30% de fresado e 1% de emulsão teve o percentual de diferença entre as médias é de aproximadamente 77,25%. Isso significa que o solo estabilizado apresentou uma rigidez média 77,25% maior em comparação com o solo CTR. Uma queda em comparação ao solo 2 fresado, mas ainda, sim, um aumento significativo em comparação com solo *in natura*, conforme pode ser visto na Figura 88.

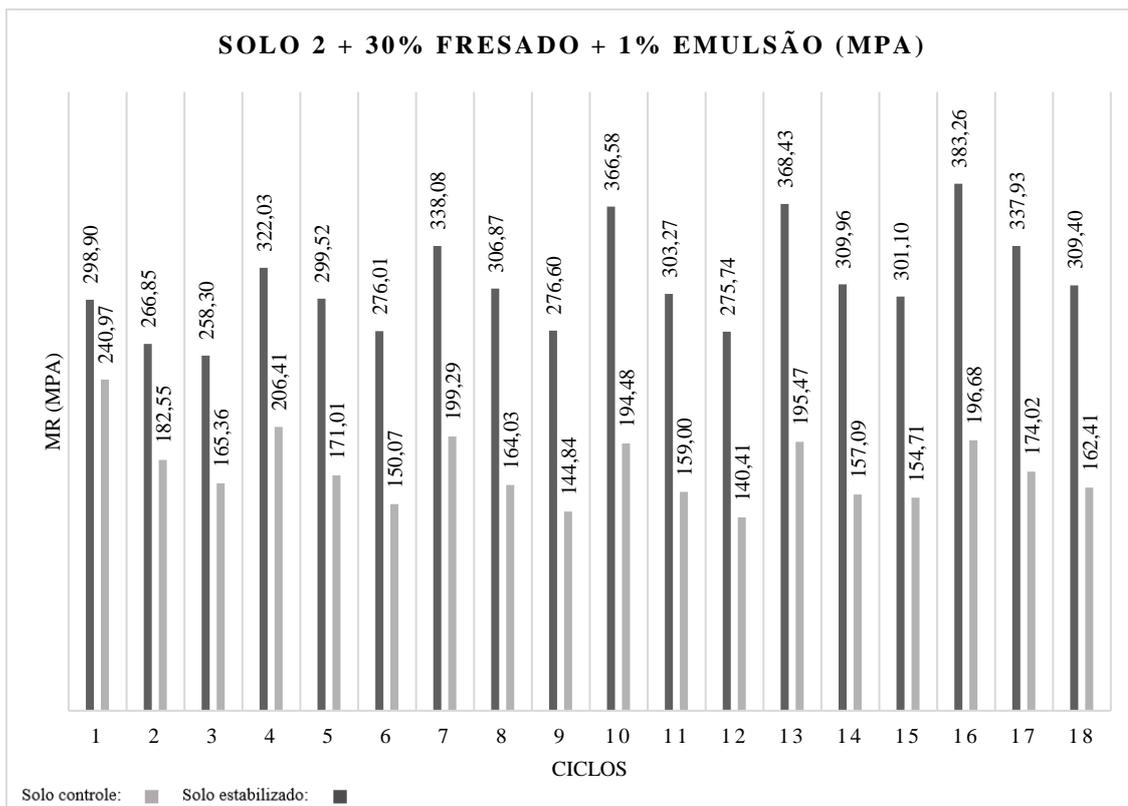


Figura 88: MR do solo 2 e do solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão

O solo 2 mais 50% de fresado teve um ganho médio de rigidez de 118,45%, conforme dados da Figura 89. Para este composto, tem-se 21% de material passante na peneira 0,075 mm. O composto passou responder bem ao aumento da TC, mas perde rigidez com o incremento da tensão desvio.

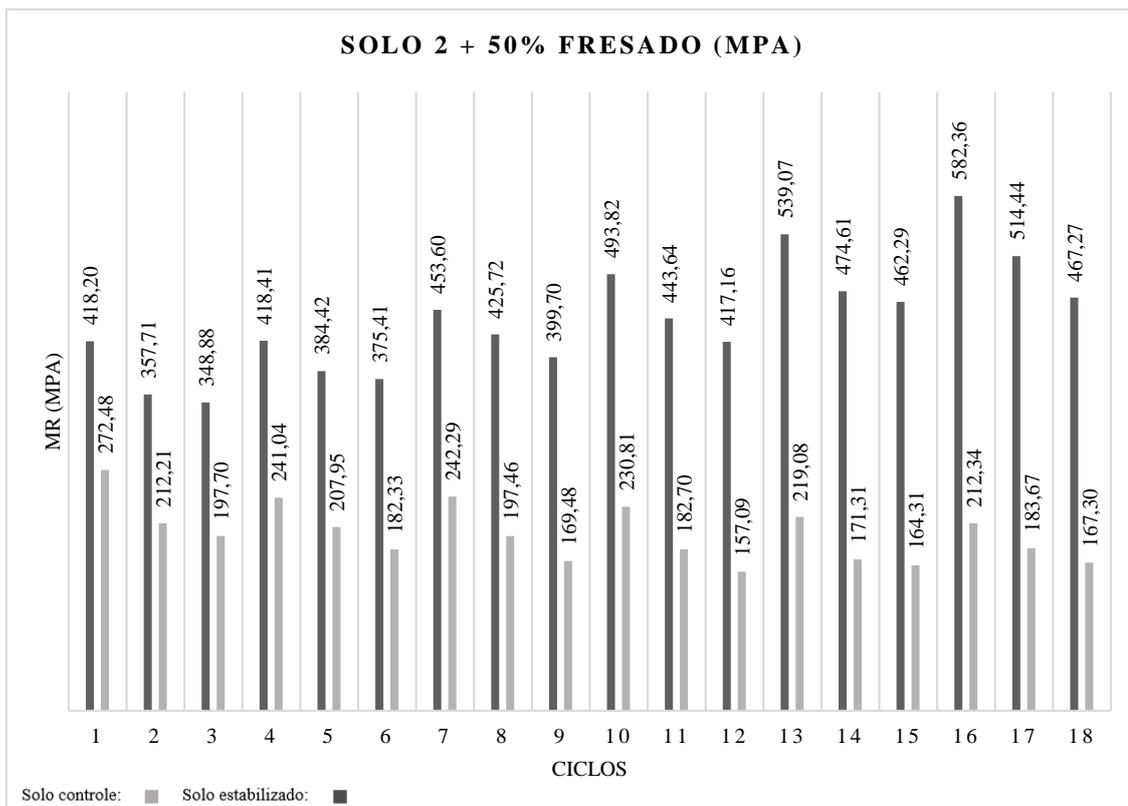


Figura 89: MR do solo 2 e do solo 2 + 50% de fresado

O solo 2 mais 50% de fresado mais 1 % de emulsão teve um ganho médio de rigidez de 63,74%. O composto passou responder bem ao aumento da TC, mas perde rigidez com o incremento da tensão desvio. Para os 3 ciclos de carregamento iniciais o ganho de rigidez foi de apenas 13,38%, conforme pode ser conferido no gráfico da Figura 90.

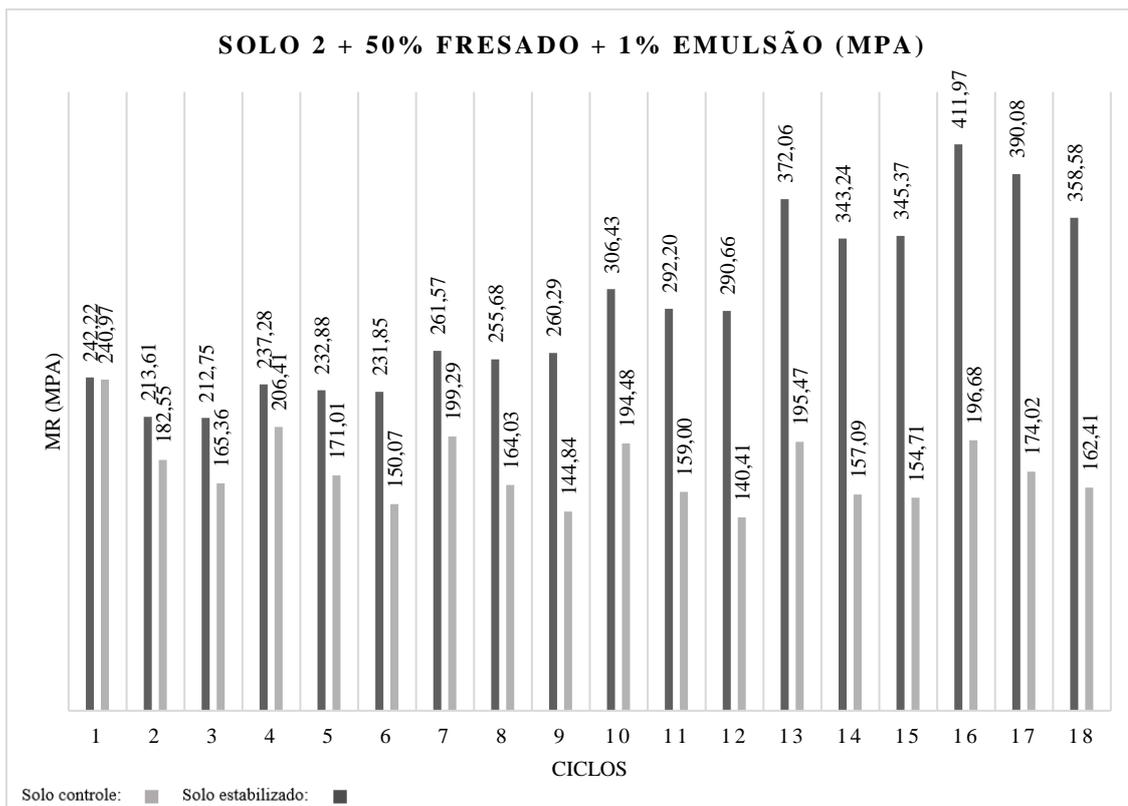


Figura 90: MR do solo 2 e do solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão

Os dados apresentados Tabela 23 demonstram o Módulo de Resiliência (MR) médio para o Solo 2 e suas variações com a adição de diferentes teores de emulsão e fresado (FRSD) ao longo de cinco estágios de carregamento. Observa-se que o solo 2 apresenta uma queda nos valores de MR ao longo dos primeiros três estágios, partindo de 304,372 MPa no estágio 1 e atingindo seu valor mais baixo de 238,891 MPa no estágio 3, com uma leve recuperação nos estágios 4 e 5, alcançando 254,882 MPa no final.

Quando se adiciona 0,5% de emulsão ao solo 2, há um comportamento relativamente estável nos dois primeiros estágios, com valores de MR próximos entre si (272,796 MPa no Estágio 1 e 271,856 MPa no Estágio 2). No entanto, a partir do estágio 3, há um aumento significativo no MR, que alcança 329,112 MPa no estágio 5. Isso indica que a adição de 0,5% de emulsão proporciona uma melhora progressiva na rigidez do solo sob carregamento repetido, especialmente nos estágios finais.

Com a adição de 1% de emulsão, o MR do solo 2 apresenta uma melhoria significativa no estágio 1, atingindo 343,834 MPa, valor superior ao solo puro e à amostra com 0,5% de emulsão. Contudo, há uma queda nos estágios seguintes, com o MR diminuindo para 263,760 MPa no estágio 3 e estabilizando nos estágios finais, com 281,050 MPa no estágio 5. Isso sugere

que a adição de 1% de emulsão melhora a rigidez inicial, mas essa vantagem não se mantém nos estágios posteriores.

A adição de 1,5% de emulsão apresenta um comportamento similar ao de 1% de emulsão, com uma melhoria inicial no MR (293,446 MPa no estágio 1) e uma tendência de estabilização nos estágios seguintes. O valor final de MR no estágio 5 é de 302,244 MPa, um aumento em relação ao solo puro, mas sem ganhos significativos em comparação às outras amostras com emulsão.

A adição de 30% de fresado ao solo 2 proporciona um aumento expressivo no MR em todos os estágios, com valores variando de 474,790 MPa no estágio 1 a 485,223 MPa no estágio 5, os mais altos entre as amostras testadas até esse ponto. Isso demonstra que a incorporação de fresado aumenta significativamente a rigidez do solo 2 sob carregamento.

Quando 1% de emulsão é adicionado à mistura de 30% de fresado, o MR permanece elevado, embora seja ligeiramente inferior ao da mistura de fresado puro, com o MR final no estágio 5 de 428,704 MPa. Isso sugere que a adição de emulsão não proporciona um ganho adicional significativo quando combinada com 30% de fresado.

A adição de 50% de fresado resulta nos maiores valores de MR entre todas as combinações, com o MR no estágio 1 atingindo 603,505 MPa e alcançando 607,599 MPa no estágio 5. Esses resultados indicam que o aumento da quantidade de fresado melhora substancialmente a rigidez do solo 2, sendo a composição com o melhor desempenho em termos de MR.

A combinação de 50% de fresado com 1% de emulsão apresenta uma tendência de melhoria ao longo dos estágios, com o MR aumentando progressivamente de 345,209 MPa no estágio 1 para 524,405 MPa no estágio 5. Embora essa combinação não tenha alcançado os valores máximos do fresado puro, ainda apresenta uma boa performance, sugerindo que a emulsão pode contribuir para uma maior estabilidade ao longo dos estágios de carregamento.

De maneira geral, a análise dos dados demonstra que a adição de fresado, particularmente em teores de 50%, melhora substancialmente o Módulo de Resiliência do Solo 2, proporcionando uma maior rigidez ao carregamento cíclico. A adição de emulsão tem um impacto positivo módico, não resultando em melhorias tão significativas quanto com o uso do fresado. Assim, o fresado se mostra mais eficaz na melhoria do comportamento mecânico do Solo 2, enquanto a emulsão pode oferecer ganhos adicionais, embora menores, em certas combinações.

Tabela 23: MR médio do solo 2

MR de cada estágio (MPa)	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
Solo 2	304,372	267,719	238,891	243,113	254,882
Solo 2 + 0,5%RL	272,796	271,856	262,826	324,334	329,112
Solo 2 + 1%RL	343,834	294,411	263,760	267,463	281,050
Solo 2 + 1,5%RL	293,446	274,524	266,887	283,991	302,244
Solo 2 + 30% FRSD	474,790	467,153	461,971	472,392	485,223
Solo 2 + 30% FRSD + 1%RL	441,440	422,698	405,299	412,464	428,704
Solo 2 + 50% FRSD	603,505	601,569	583,331	602,704	607,599
Solo 2 + 50% FRSD + 1%RL	345,209	428,991	456,416	492,023	524,405

#### 5.5.4 Ajuste do modelo composto para o solo 2

A Tabela 24 fornecida contém um modelo composto para diferentes misturas de solo,2 onde MR é dada pela equação  $MR=k1 \times S3^{k2} \times Sd^{k3}$ . Aqui, S3 é a tensão confinante, e Sd é a tensão desviadora. Os coeficientes k1, k2 e k3, juntamente com os valores de R<sup>2</sup> para o ajuste, são fornecidos para o solo 2 e cada mistura de solo.

Tabela 24: Modelo composto para o solo 2 e seus compostos

material	modelo composto			ajuste
	MR = k1 * S3^K2 * Sd^k3			R <sup>2</sup>
	k1	k2	k3	
solo 2 CTR	166,256	0,16	-0,28	0,954
Solo 2 + 0,5% RL	148,184	0,16	-0,32	0,930
Solo 2 + 1% RL	219,417	0,28	-0,32	0,955
Solo 2 + 1,5% RL	242,313	0,24	-0,24	0,931
Solo 2 + 30% FRSD	680,489	0,36	-0,12	0,977
Solo 2 + 30% FRSD + 1% RL	486,109	0,32	-0,2	0,952
Solo 2 + 50% FRSD	844,011	0,36	-0,16	0,974
Solo 2 + 50% FRSD + 1% RL	820,961	0,44	-0,08	0,954

O parâmetro k1 representa o valor inicial do módulo de resiliência quando tanto S3 quanto Sd estão em seus valores de referência (1 unidade). O valor de k1 aumenta significativamente com a adição de fresado. O maior valor de k1 é observado para a mistura com 50% de fresado (844.011), indicando um módulo inicial muito mais alto. O menor valor de k1 é para o solo controle (solo 2 + 0,5% RL) (148,184).

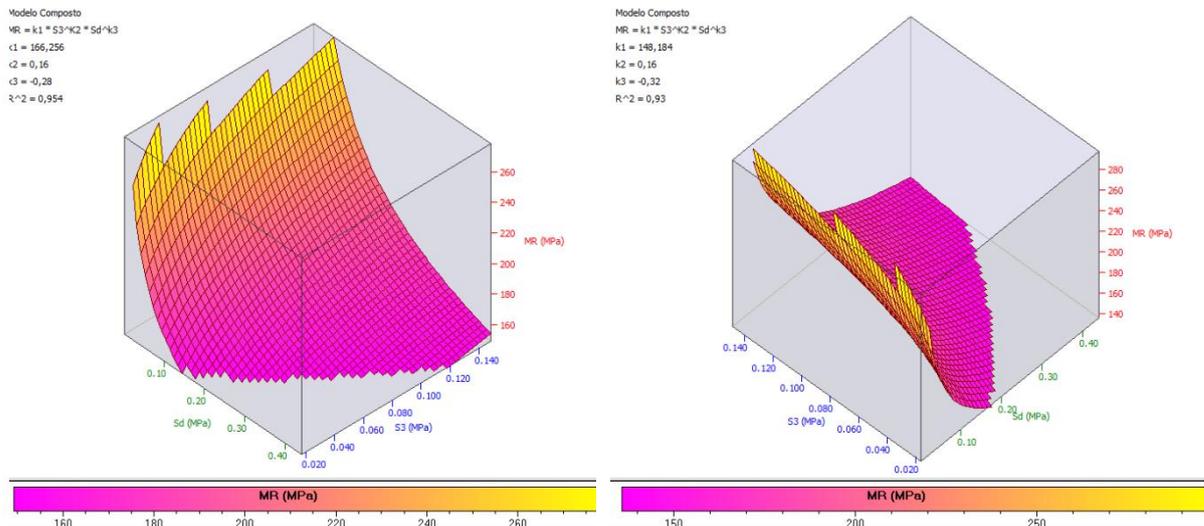
O parâmetro k2 é o expoente para a tensão confinante (S3). Os valores de k2 variam de 0.16 a 0.44, sugerindo diferentes graus de sensibilidade à tensão confinante. A maior

sensibilidade a S3 é observada na mistura com 50% de fresado e 1% de RL (0.44). A menor sensibilidade a S3 é para a mistura com 0,5% de RL (0.16) e para o solo 2 CTR.

O parâmetro k3 é o expoente para a tensão desviadora (Sd). Todos os valores de k3 são negativos, indicando uma diminuição no módulo de resiliência com o aumento da tensão desviadora. Os valores de k3 variam de: 0.08 a: 0.32, sugerindo que a mistura com 50% de fresado e 1% de RL tem a menor sensibilidade à tensão desviadora ( $k3 = -0.08$ ), enquanto a mistura com 0,5% e 1% de RL tem a maior sensibilidade ( $k3 = -0.32$ ).

Os valores de R<sup>2</sup> variam de 0.930 a 0.977, indicando um alto grau de ajuste para todos os modelos.

A adição de emulsão ou fresado aumenta significativamente o módulo inicial k1, especialmente com maiores percentuais de fresado. A sensibilidade à tensão confinante (k2) geralmente aumenta com a adição de fresado, enquanto a resposta à tensão desviadora (k3) mostra uma diminuição no módulo com o aumento de Sd para todas as amostras ensaiadas. Estas informações podem ser observadas nos gráficos 3D da Figura 91.



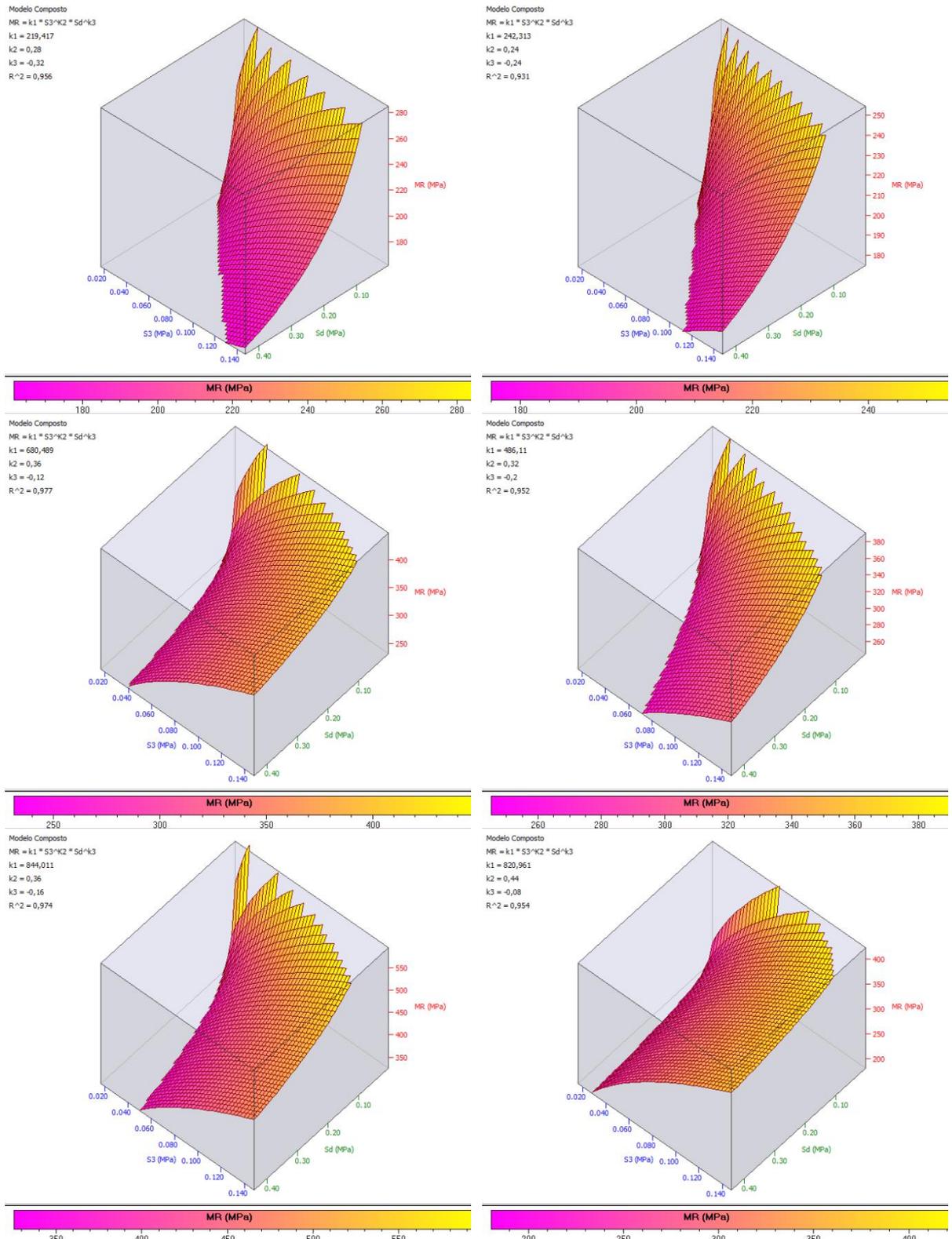


Figura 91: Gráfico 3D do modelo composto do solo 2 e seus compostos

## 5.6 Deformação permanente e resiliente em múltiplos estágios

As tabelas apresentadas no Anexo D contendo o comportamento mecânico de misturas de solos estabilizados com fresado e emulsão asfáltica fornecem informações sobre a evolução da deformação plástica e elástica ao longo de ciclos de carregamento. Observa-se que a deformação plástica aumenta com o número de ciclos, refletindo sua natureza acumulativa. Entretanto, em alguns casos, essa taxa de aumento diminui, indicando que a mistura está se estabilizando. Por outro lado, a deformação elástica tende a ser mais constante, o que demonstra o comportamento recuperável desse tipo de deformação, com variações que indicam mudanças na rigidez da mistura em função dos teores de fresado e emulsão.

A adição de fresado às misturas, especialmente em teores de 30% e 50%, parece ter uma influência positiva na redução da deformação plástica, principalmente no solo 2. Misturas com maior teor de fresado apresentam menor acúmulo de deformações permanentes, o que sugere maior estabilidade estrutural. Em termos de deformação elástica, o fresado também aumenta a rigidez da mistura, tornando-a menos suscetível à deformação sob carregamentos repetidos. Isso pode ser especialmente observado nas misturas com 30% de fresado.

A presença de emulsão asfáltica nas misturas também se revela um fator importante na melhoria do comportamento mecânico nos ciclos de carga iniciais.

A análise do comportamento das misturas ao longo de até 10.000 ciclos de carregamento revela que as misturas com fresado mantêm um bom desempenho. Essas observações confirmam que a adição de fresado melhora a rigidez das misturas, tornando-as mais adequadas para aplicações em pavimentos rodoviários.

A derivada das curvas de deformação em função do número de ciclos de carregamento fornece informações sobre o comportamento mecânico dos materiais ao longo do tempo, permitindo entender como a deformação (tanto plástica quanto elástica) evolui em resposta a um aumento de ciclos de carga. A derivada pode ser usada para identificar a taxa de variação da deformação em diferentes estágios, ou seja, a velocidade com que a deformação ocorre à medida que a carga é aplicada repetidamente.

A derivada da região plástica indica o quanto a deformação acumulada por ciclo muda ao longo do tempo. No início do carregamento, espera-se uma maior taxa de deformação (derivada mais alta), já que a mistura está se acomodando. À medida que o material se estabiliza, a taxa de deformação plástica tende a diminuir (derivada decrescente), sinalizando que o material está entrando em um estado mais estável.

A relação entre as deformações plástica e elástica também é fundamental para entender o comportamento global do material sob cargas repetidas. Quando a proporção de deformação plástica em relação à deformação elástica é alta, isso indica que o material está se deformando permanentemente em uma taxa maior do que ele consegue se recuperar elasticamente. Isso é um sinal de que o material está se desgastando rapidamente e pode não ter uma longa vida útil. Por outro lado, se a deformação elástica domina (com uma pequena porção de deformação plástica), o material tem uma boa capacidade de recuperação e pode suportar mais ciclos de carga antes de falhar.

Durante os primeiros ciclos de carregamento, a região plástica tende a ser mais dominante, mas à medida que o material estabiliza, a região elástica deve se tornar mais pronunciada. Isso seria um comportamento ideal, onde o material "aprende" a lidar com a carga e passa a acumular menos deformação plástica. Caso a proporção de deformação plástica continue a crescer, isso sugere que o material não está estabilizando adequadamente e pode levar à falha prematura.

A relação entre as deformações plástica e elástica pode ser usada para identificar transições entre comportamentos. Por exemplo, quando a proporção de deformação elástica diminui, o material pode estar próximo de uma transição para uma falha plástica completa, onde ele não mais se recupera entre os ciclos, levando ao colapso estrutural.

A relação entre a região plástica e a elástica é extremamente interessante e importante, mesmo considerando que a deformação plástica é cumulativa e a elástica não. Essa relação oferece uma visão detalhada do comportamento do material sob cargas repetidas e pode revelar importantes aspectos sobre sua durabilidade e desempenho em longo prazo.

A razão elástica/plástica para ambos os solos mostra uma performance melhor para o solo 1 controle, com uma maior rigidez ao aumento de ciclos de carga. A razão elástica/plástica diminui ao longo dos ciclos para o solo 1, indicando que, à medida que as cargas repetidas aumentam, a deformação plástica se torna mais significativa. Este é um indicativo de que o solo está ficando mais compacto com o intertravamento dos grãos, o mesmo não acontece quando se adiciona emulsão.

Para o solo 1, o solo controle foi o que obteve a melhor relação entre a região elástica e plástica, a cada ciclo de carregamento a região plástica diminuía enquanto a região elástica ia incrementando, denotando que o solo estava tendendo a se estabilizar. Para o solo 2, o material estabilizado com 30% de fresado obteve os melhores resultados.

Em estruturas de pavimento, o objetivo é minimizar a deformação plástica acumulada ao longo do tempo, de forma a manter a integridade da superfície e evitar problemas como trilhas de roda (deformação permanente no pavimento). Se a região elástica domina, isso significa que o pavimento está respondendo bem às cargas, retornando à sua condição original após cada ciclo. Por outro lado, se a região plástica é predominante, o pavimento está acumulando danos irreversíveis, o que eventualmente resultará em falhas estruturais visíveis.

No solo estabilizado, a taxa de crescimento instantânea da deformação plástica começa mais alta e diminui mais lentamente em comparação ao solo controle, o que reforça a ideia de que a emulsão, apesar de estabilizar inicialmente, pode tornar o solo mais sensível à acumulação de deformações permanentes ao longo do tempo.

Observa-se também nas tabelas do Anexo D que os solos estabilizados tiveram um desempenho superior ao solo controle, em média até o vigésimo ciclo de carregamento, logo em seguida iniciava-se uma perda de rigidez.

### ***5.6.1 Análise das deformações do solo 1***

O solo controle apresenta uma menor deformação permanente em relação ao solo estabilizado com 1,5% de emulsão. Aos 50.000 ciclos, o solo controle acumula aproximadamente 0,34 mm de deformação permanente, enquanto o solo estabilizado acumula cerca de 0,58 mm.

A deformação resiliente (diferença entre a deformação total e a permanente) é ligeiramente maior no solo estabilizado, o que sugere que o uso de 1,5% de emulsão aumenta a resposta resiliente do material. Conforme avança o incremento da tensão desvio aumenta a diferença entre a deformação total e permanente para ambos os materiais.

Em termos de resistência a ciclos de carregamento e acúmulo de DP, o solo controle apresenta um desempenho mais estável e acumula menos deformação permanente ao longo do tempo. Além dessas informações é possível verificar que existe um efeito influenciado pela inserção da emulsão, que é a mudança de comportamento da curva do gráfico que passa a ter um acúmulo de DP mais ascendente, principalmente no quarto e quinto ciclo de carregamentos. Essas informações podem ser visualizadas no gráfico da Figura 92.

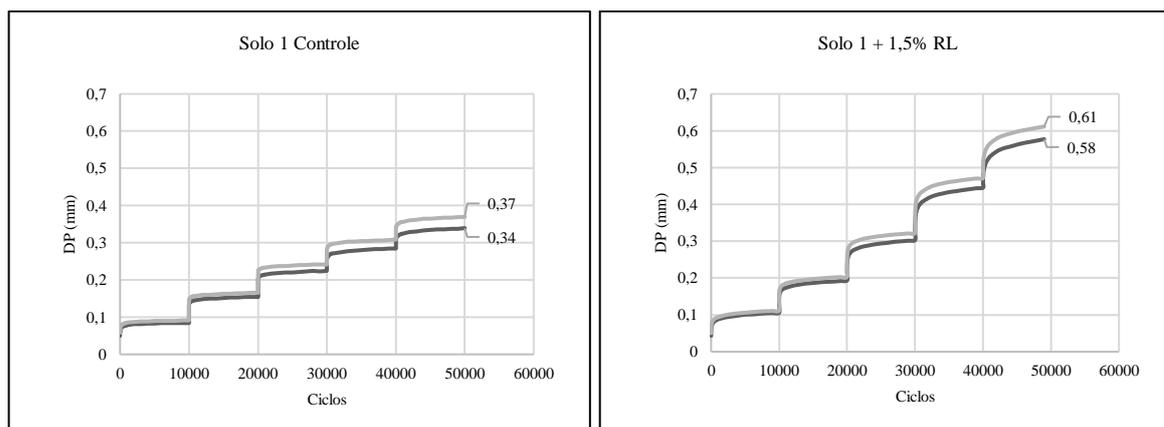


Figura 92: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e solo 1 + 1,5% RL (direita)

O solo controle apresenta uma menor deformação permanente em comparação ao solo estabilizado com 2% de emulsão. A DP no solo controle atinge 0,34 mm após 50.000 ciclos, enquanto no solo estabilizado a DP é de 0,70 mm. A deformação resiliente (a diferença entre a deformação total e a permanente) é ligeiramente maior no solo estabilizado.

O solo controle, além de acumular menos deformação plástica, apresenta uma menor deformação elástica. O solo estabilizado com 2% de emulsão apresenta uma deformação permanente muito mais elevada do que o solo controle, o que pode limitar sua durabilidade em longos períodos de carregamento repetido. Assim como acontece com a adição de 1,5% de emulsão, aqui é possível se observar o efeito da inserção de 2% de emulsão mudando o comportamento da curva, em comparação ao solo controle.

Em termos de deformação resiliente, o solo estabilizado com 2% de RL apresenta uma deformação resiliente ligeiramente maior ao longo dos ciclos, igualmente o acúmulo de deformação plástica é maior, o que sugere uma menor resistência ao longo de ciclos prolongados, conforme pode ser visto nos gráficos da Figura 93.

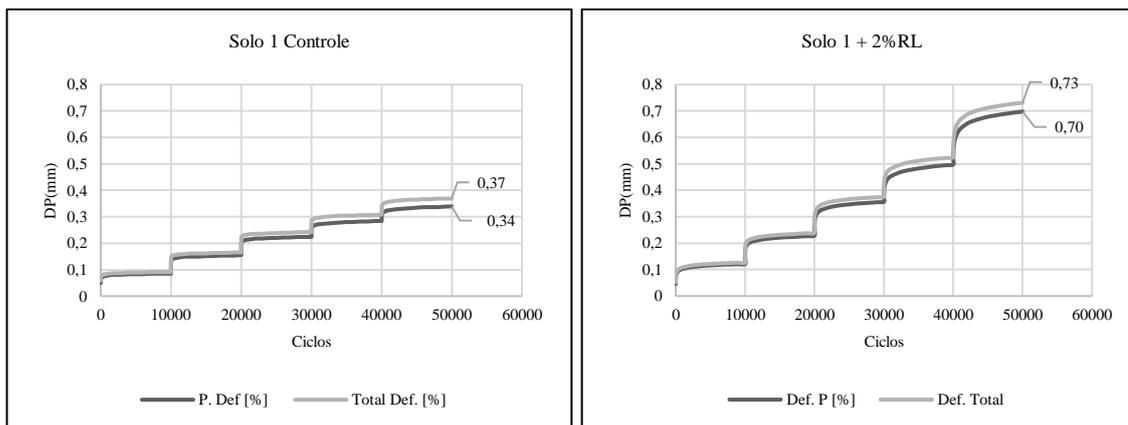


Figura 93: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e solo 1 + 2% RL (direita)

O solo estabilizado com 2,5% de emulsão mostra uma maior deformação resiliente, como indicado pela maior diferença entre a deformação total e a DP. No entanto, o acúmulo de DP ao longo dos ciclos é mais alto, o que pode prejudicar o desempenho a longo prazo sob carregamento cíclico. Similar ao ocorrido anteriormente, é possível se notar o efeito da adição de emulsão no comportamento da curva.

O solo controle tem um comportamento mais estável, acumulando menos deformação plástica. O solo controle, apresenta uma menor taxa de acumulação de deformação permanente, o que pode indicar um melhor desempenho a longo prazo sob carregamentos repetidos, conforme pode ser visto na Figura 94.

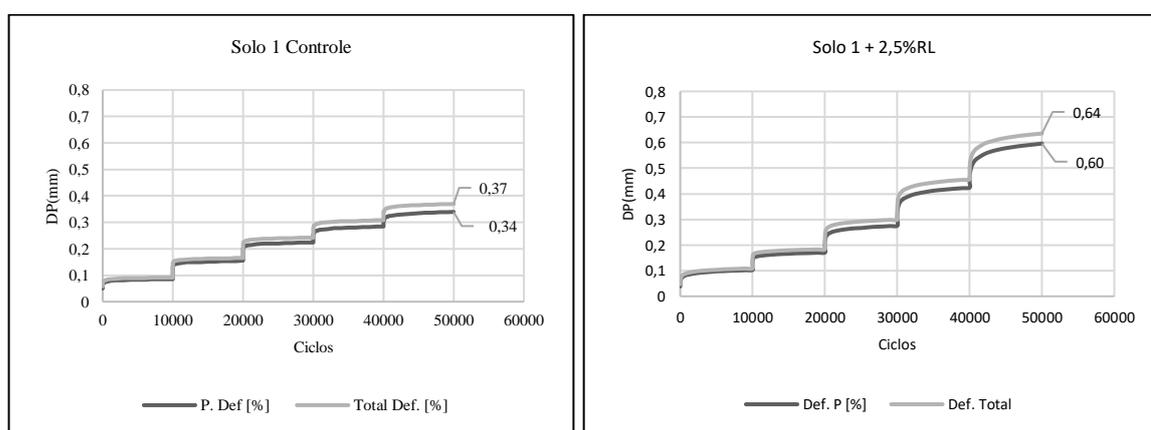


Figura 94: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e solo 1 + 2,5% RL (direita)

O solo com 30% de fresado apresenta uma deformação permanente menor em comparação ao solo controle após 50.000 ciclos. A DP do solo com fresado é de 0,31 mm, enquanto no solo controle é de 0,34 mm. A diferença entre a deformação total e a deformação permanente é muito próxima em ambos os solos, indicando que a recuperação elástica é similar.

No entanto, o solo com 30% de fresado apresenta uma leve vantagem, acumulando menos DP. A adição de fresado influencia positivamente o resultado alcançado, porém, nota-se uma mudança no comportamento da curva em especial no último ciclo de carregamento.

O solo com 30% de fresado acumula menos deformação permanente ao longo dos ciclos de carregamento, o que sugere um desempenho ligeiramente superior em termos de resistência à deformação plástica. Ambos os solos têm uma recuperação elástica semelhante, mas o solo com fresado se mostra menos suscetível ao acúmulo de DP, conforme pode ser visualizado nos gráficos da Figura 95.

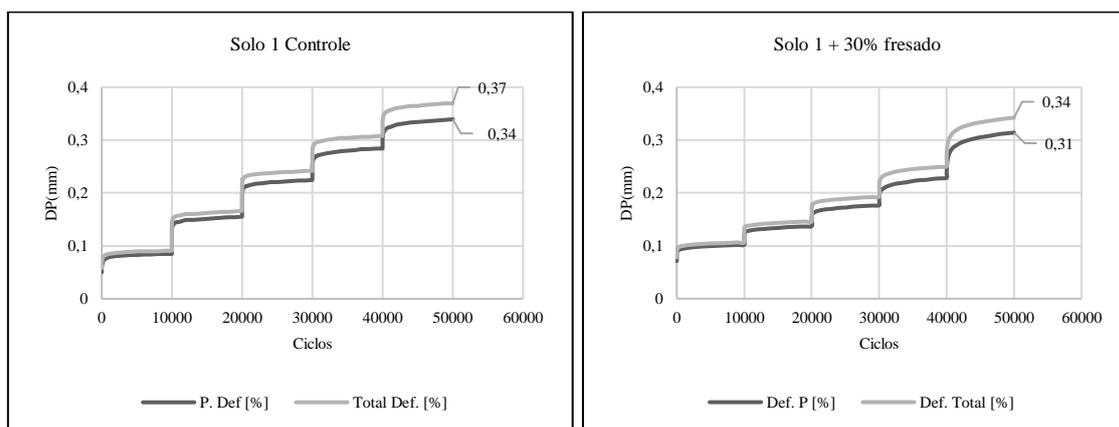


Figura 95: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e solo 1 + 30% fresado (direita)

O solo controle apresenta uma menor deformação permanente comparado ao solo estabilizado para o mesmo número de ciclos. Em 50.000 ciclos, o solo controle atinge 0,37 mm, enquanto o solo estabilizado atinge 0,53 mm.

A adição de 30% de fresado e 2% de emulsão RL ao solo estabilizado parece aumentar a DP, sugerindo que, apesar de a estabilização ter melhorado algumas propriedades do solo, esta resultou em um maior acúmulo de deformações permanentes sob carga cíclica. Especialmente nos dois últimos ciclos de carregamento, a taxa de acumulação de DP acelera mais do que o solo controle.

O solo estabilizado com 30% de fresado e 2% de emulsão RL aparenta perder resistência em dois pontos críticos: entre 30.000 e 40.000 ciclos e novamente entre 40.000 e 50.000 ciclos. Nesses intervalos, a DP aumenta de forma mais acentuada, indicando que o solo está acumulando deformações permanentes mais rapidamente e perdendo sua capacidade de resistir às cargas aplicadas.

O solo estabilizado com fresado e emulsão apresenta uma maior deflexão em cada estágio de ciclos comparado ao solo controle. Já O solo controle apresenta uma menor DP e

pode ser mais resistente a deformações permanentes sob carga cíclica, indicando que sem a estabilização, o solo mantém melhor sua forma.

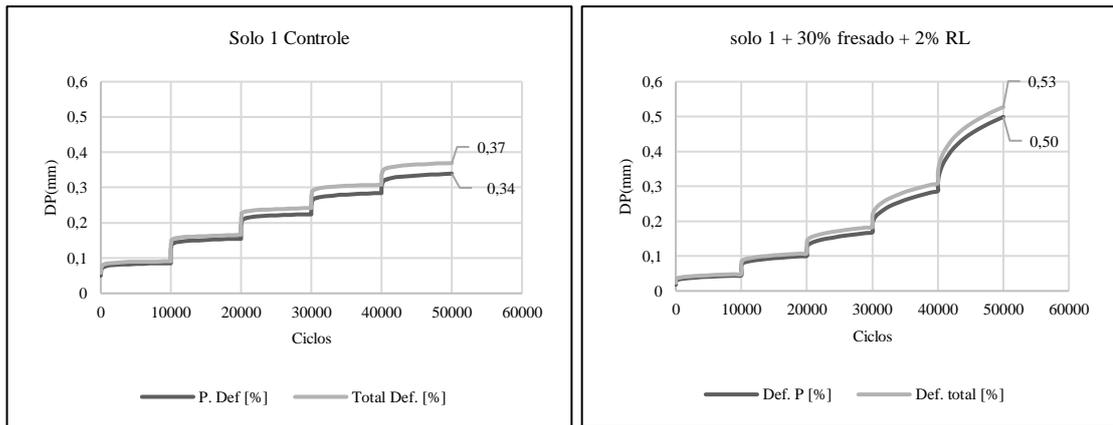


Figura 96: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e solo 1 + 30% fresado + 2% de emulsão (direita)

O solo controle apresenta uma DP final de 0,34 mm, enquanto o solo com 50% de material fresado mostra uma DP ligeiramente menor, de 0,33 mm. Isso sugere que a adição de material fresado pode reduzir a deformação permanente do solo em valores absolutos.

Ambas as amostras (controle e 50% fresado) apresentam uma deformação total final de 0,37 mm. A deformação total similar indica que, apesar da redução na DP, a inclusão do material fresado não impacta negativamente a capacidade de deformação resiliente do solo.

A mistura de solo com 50% de material fresado resulta em uma leve melhoria na resistência à deformação permanente, reduzindo a DP de 0,34 mm para 0,33 mm, sem afetar a deformação total. Todavia, observa-se no gráfico que para o terceiro e quarto estágio de carregamento, o solo estabilizado apresenta uma inclinação maior da curva de deformação permanente, apesar de numericamente ter um desempenho similar, o que indicaria uma mudança no comportamento do solo, conforme informativo gráfico da Figura 97.

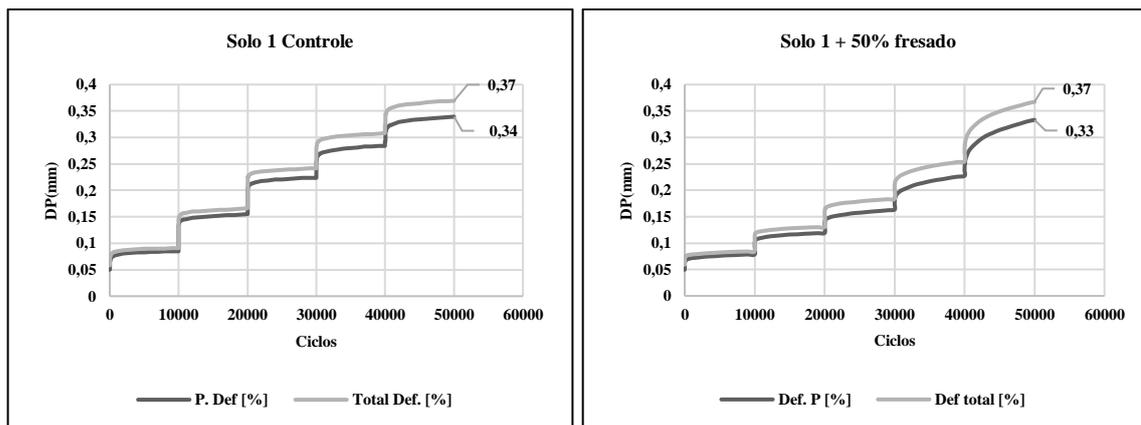


Figura 97: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e solo 1 + 50% fresado (direita)

O solo com 50% de fresado e 2% de emulsão apresenta uma deformação permanente maior em comparação ao solo controle. Enquanto o solo controle acumula 0,34 mm de DP após 50.000 ciclos, o solo com fresado e emulsão acumula 0,40 mm.

A diferença entre a deformação total e a DP é muito semelhante em ambos os solos, sugerindo que ambos os materiais têm uma recuperação elástica parecida. No entanto, o solo com fresado e emulsão acumula mais deformação plástica, o que pode impactar seu desempenho a longo prazo.

O solo controle acumula menos DP ao longo dos ciclos de carregamento, o que indica uma melhor resistência à deformação plástica em comparação ao solo com 50% de fresado e 2% de emulsão.

O solo com fresado e emulsão, apesar de ter uma recuperação resiliente semelhante ao solo controle, acumula mais deformação permanente. É possível verificar que o comportamento do solo estabilizado muda, sendo suas curvas mais ascendentes, principalmente nos dois últimos ciclos de carregamento, conforme pode ser visto nos gráficos da Figura 98.

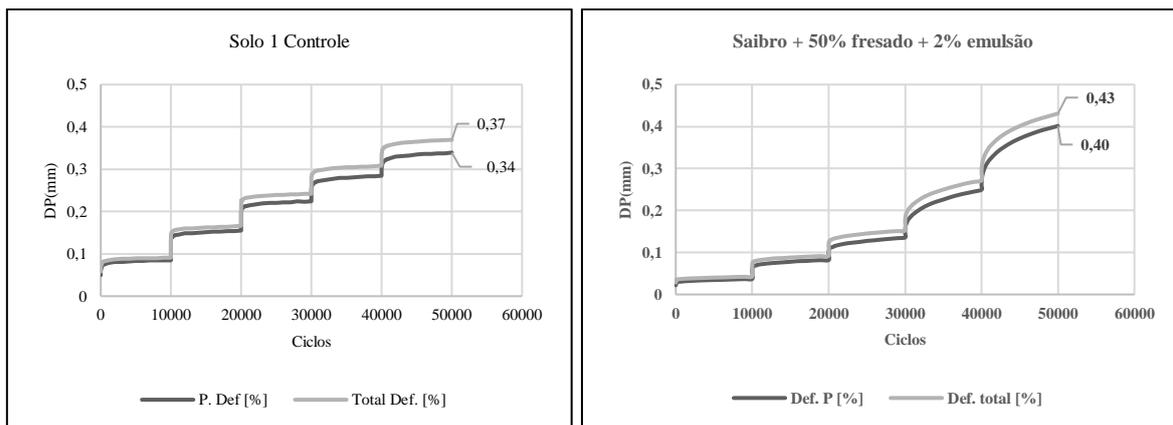


Figura 98: Carregamento em multiestágio do solo 1 controle (esquerda) e solo 1 + 50% fresado + 2% de emulsão (direita)

### 5.6.2 Análise das deformações do solo 2

O solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão apresenta uma deformação permanente significativamente maior do que o solo controle. Após 50.000 ciclos, a DP do solo estabilizado é de 1,21 mm, enquanto o solo controle apresenta 0,77 mm de DP. Em ambos os casos, a diferença entre a DP e a deformação total é muito pequena, indicando uma capacidade limitada de recuperação elástica. O solo estabilizado com emulsão tem uma leve vantagem em termos de deformação resiliente, mas acumula mais DP, o que pode comprometer seu desempenho a longo prazo.

O solo 2 controle apresenta uma menor deformação permanente ao longo dos ciclos, o que sugere uma melhor resistência à deformação plástica em comparação ao solo estabilizado. O solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão, embora apresente uma leve capacidade de recuperação elástica, acumula uma quantidade significativamente maior de deformação permanente ao longo dos ciclos, o que pode impactar sua durabilidade em longos períodos de carregamento. Observa-se a que a adição de emulsão ao solo 2 tem um efeito bastante distinto do solo 1. Não há uma mudança significativa da curvatura dos gráficos, com a exceção do último ciclo de carregamento, que indica uma perda súbita de resistência mecânica do solo 2. Estes dados podem ser visualizados no gráfico da Figura 99.

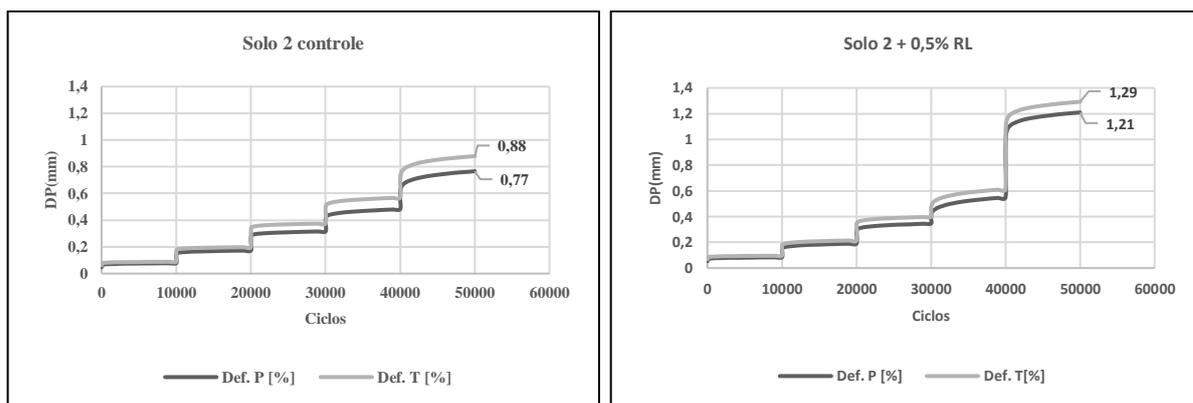


Figura 99: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e solo 2 + 0,5% de emulsão (direita)

O gráfico apresentado na Figura 100 compara o comportamento de deformação permanente (DP) e deformação total (DT) de um solo controle e de um solo estabilizado com 1% de emulsão sob carregamento multiestágio. O solo controle apresenta uma deformação permanente de 0,77 mm após 50.000 ciclos e uma deformação total de 0,88 mm, o que resulta em uma deformação resiliente de 0,11 mm.

Já o solo estabilizado com 1% de emulsão mostra uma deformação permanente de 1,02 mm após 50.000 ciclos, com uma deformação total de 1,12 mm, resultando em uma deformação resiliente de 0,10 mm. Embora a diferença entre a DT e a DP seja semelhante à do solo controle, indicando uma capacidade comparável de recuperação resiliente, o solo estabilizado acumula mais deformação permanente, o que sugere uma menor resistência à deformação plástica. Até o terceiro ciclo de carregamento o desempenho do solo controle e do solo com 1% de emulsão é muito similar, não se vê nenhum efeito efetivo da emulsão. No quarto e quinto ciclos, há uma maior perda de resistência culminando num pior desempenho ao final do carregamento multiestágio. Estas informações podem ser analisadas no gráfico da Figura 100.

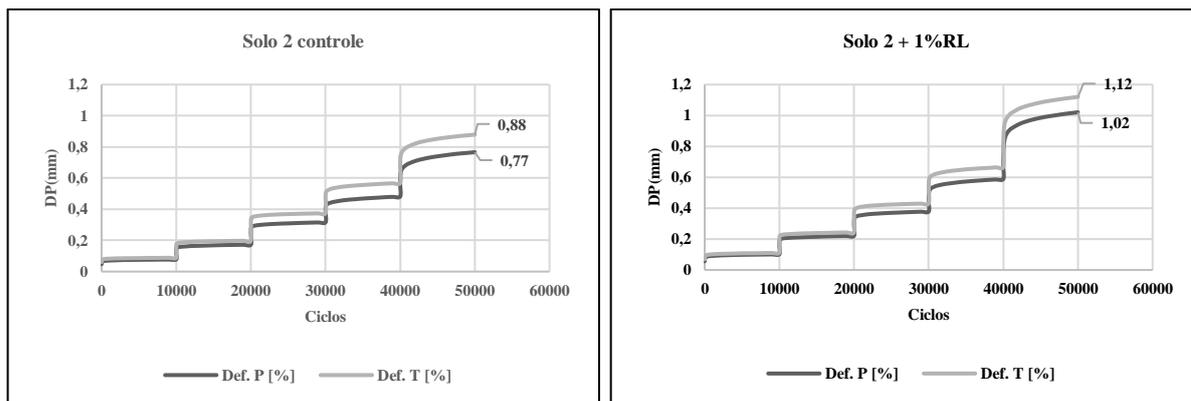


Figura 100: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e solo 2 + 1% de emulsão (direita)

O gráfico apresentado na Figura 101 compara o comportamento de deformação permanente (DP) e deformação total (DT) de um solo controle e de um solo estabilizado com 1,5% de emulsão sob carregamento multiestágio. O solo controle apresenta uma deformação permanente de 0,77 mm após 50.000 ciclos e uma deformação total de 0,88 mm, resultando em uma deformação resiliente de 0,11 mm.

O solo estabilizado com 1,5% de emulsão, por sua vez, apresenta uma deformação permanente de 0,81 mm e uma deformação total de 0,90 mm após o mesmo número de ciclos, resultando em uma deformação resiliente de 0,09 mm. Embora a diferença entre a DT e a DP no solo estabilizado seja ligeiramente menor, a DP acumulada se aproxima da do solo controle, sugerindo um desempenho semelhante em termos de resistência à deformação. A inserção de 1,5% de emulsão tem um efeito bastante similar ao solo estabilizado com 1% de emulsão.

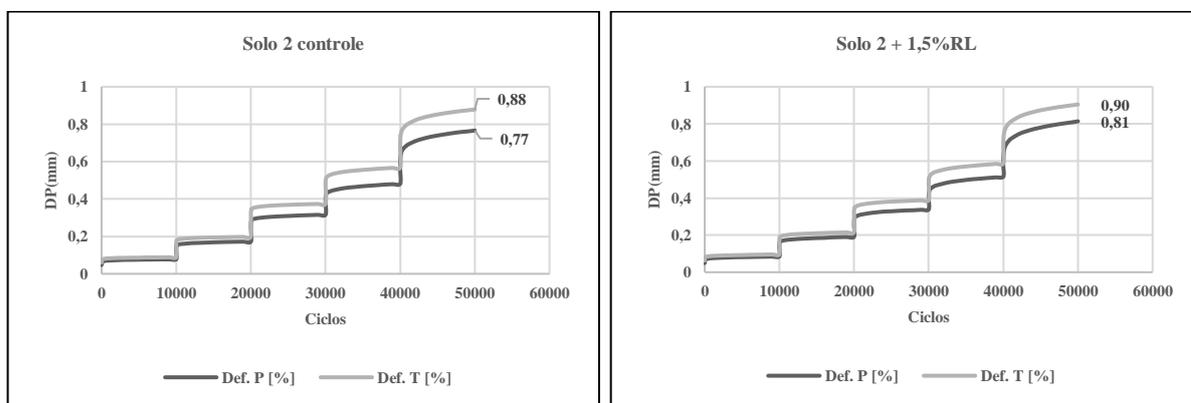


Figura 101: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e solo 2 + 1,5% de emulsão (direita)

O gráfico apresentado na Figura 102 compara o comportamento de deformação permanente (DP) e deformação total (DT) de um solo controle e de um solo estabilizado com 30% de fresado sob carregamento multiestágio. O solo controle apresenta uma deformação

permanente de 0,77 mm após 50.000 ciclos e uma deformação total de 0,88 mm, resultando em uma deformação resiliente de 0,11 mm.

Por outro lado, o solo estabilizado com 30% de fresado exibe uma deformação permanente de 0,31 mm após o mesmo número de ciclos, com uma deformação total de 0,37 mm, resultando em uma deformação resiliente de 0,06 mm. Ao se acrescentar fresado ao solo 2, este mudou significativamente seu comportamento. Esse comportamento indica uma maior resistência à deformação plástica do solo com fresado em comparação ao solo controle, acumulando menor DP ao longo dos ciclos de carregamento. Quando se muda a granulometria do material mais fino com a inclusão do fresado, o comportamento do solo 2 muda drasticamente, comparando-se ao desempenho do solo 1.

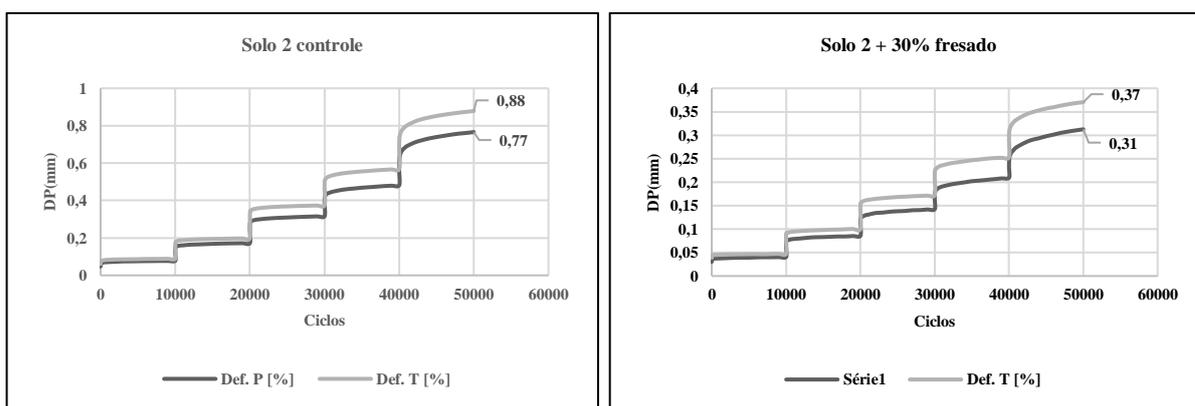


Figura 102: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e solo 2 + 30% de fresado (direita)

O gráfico apresentado na Figura 103 compara o comportamento de deformação permanente (DP) e deformação total (DT) de um solo controle e de um solo estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão sob carregamento multiestágio. O solo controle apresenta uma deformação permanente de 0,77 mm após 50.000 ciclos e uma deformação total de 0,88 mm, resultando em uma deformação resiliente de 0,11 mm.

Já o solo estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão mostra uma deformação permanente de 0,52 mm e uma deformação total de 0,59 mm após 50.000 ciclos, resultando em uma deformação resiliente de 0,07 mm. Esse comportamento indica que o solo estabilizado acumula menos deformação permanente e apresenta uma maior resistência à deformação plástica em comparação ao solo controle. Enquanto não se vê um efeito da emulsão adicionada ao solo 2, quando se muda sua granulometria a emulsão passa a suggestionar o seu resultado.

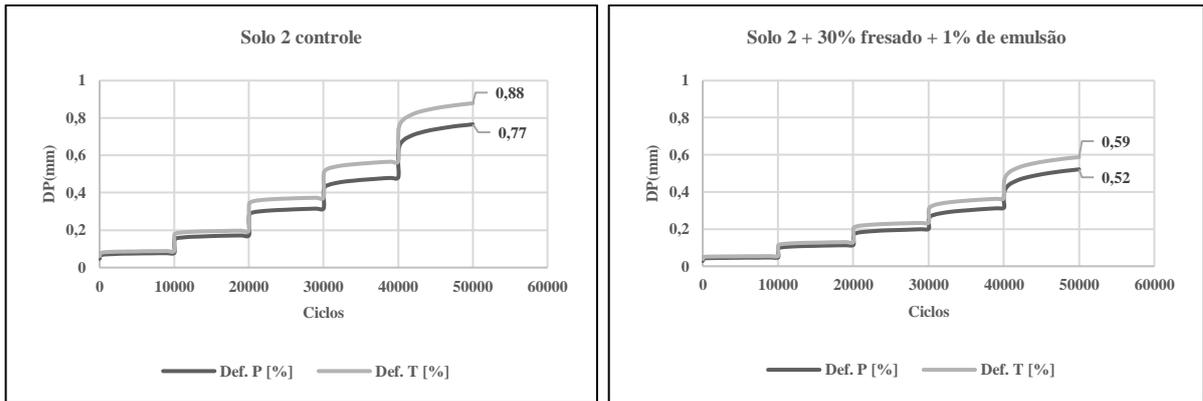


Figura 103: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (direita)

O gráfico apresentado na Figura 114 compara o comportamento de deformação permanente (DP) e deformação total (DT) de um solo controle e de um solo estabilizado com 50% de fresado sob carregamento multiestágio. O solo controle apresenta uma deformação permanente de 0,77 mm após 50.000 ciclos e uma deformação total de 0,88 mm, resultando em uma deformação resiliente de 0,11 mm.

Já o solo estabilizado com 50% de fresado mostra uma deformação permanente de 0,38 mm e uma deformação total de 0,43 mm após 50.000 ciclos, resultando em uma deformação resiliente de 0,05 mm. Esses dados indicam que o solo estabilizado com fresado acumula menos deformação permanente e apresenta uma maior resistência à deformação plástica em comparação ao solo controle. DE maneira similar ao ocorrido com a inserção de 30% de fresado, adicionar 50% de fresado muda o comportamento do solo 2, porém de forma menos significativa.

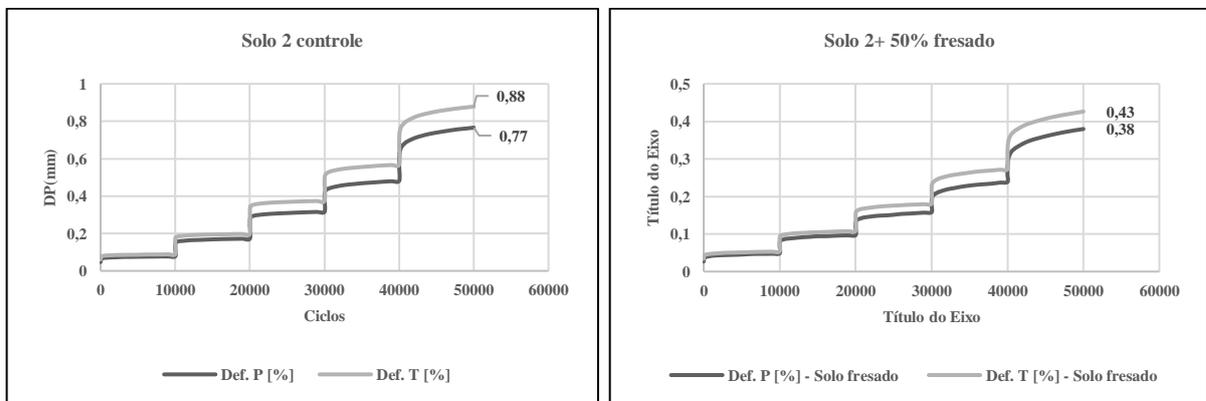


Figura 104: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e solo 2 + 50% de fresado (direita)

O gráfico apresentado na Figura 105 compara o comportamento de deformação permanente (DP) e deformação total (DT) de um solo controle e de um solo estabilizado com

50% de fresado e 1% de emulsão sob carregamento multiestágio. O solo controle apresenta uma deformação permanente de 0,77 mm após 50.000 ciclos e uma deformação total de 0,88 mm, resultando em uma deformação resiliente de 0,11 mm.

Por outro lado, o solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão apresenta uma deformação permanente de 0,63 mm e uma deformação total de 0,68 mm após 50.000 ciclos, resultando em uma deformação resiliente de 0,05 mm. Esses dados indicam que o solo estabilizado acumula menos deformação permanente e exibe maior resistência à deformação plástica em comparação ao solo controle. Após alterar a granulometria do solo 2, a inserção de emulsão passa a produzir um efeito, alterando o comportamento da curva e diminuindo a resistência do composto em relação ao composto solo 2 + 50% de fresado.

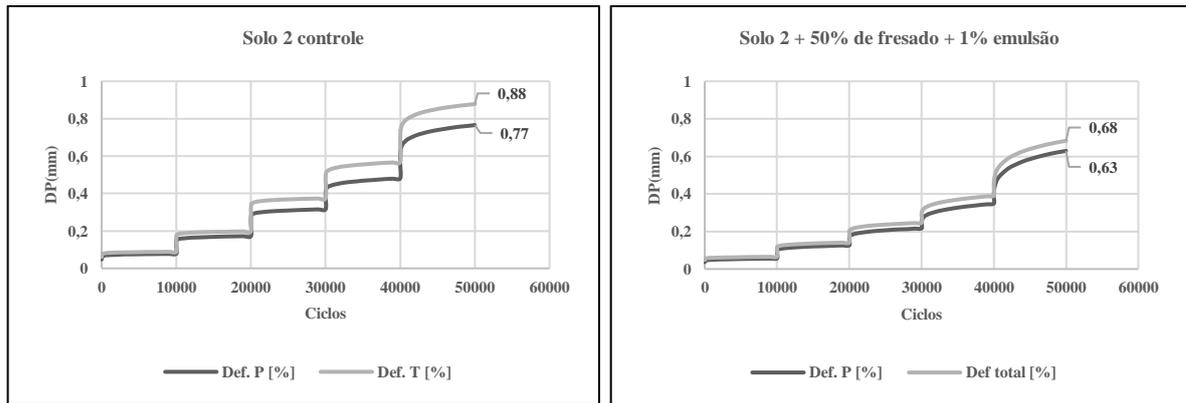


Figura 105:: Carregamento em multiestágio do solo 2 controle (esquerda) e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (direita)

## 5.7 Análise do coeficiente angular e linear da linearização da DP

O comportamento dos solos sob condições de carregamento cíclico é uma área de estudo essencial para a engenharia geotécnica, especialmente no que diz respeito à sua estabilidade e durabilidade a longo prazo. Este capítulo apresenta uma análise detalhada dos solos estudados, tanto na sua forma natural quanto estabilizado com diferentes teores de emulsão asfáltica. Os dados obtidos a partir dos experimentos realizados são fundamentais para entender as variações no desempenho mecânico desses solos quando submetidos a repetidos ciclos de carga e a influência da emulsão na estabilização.

O desempenho de cada material foi comparado ao solo controle. Todavia, é necessário lembrar que a metodologia desta pesquisa não abarca a utilização do fresado, sendo este material adicionado com variação da umidade, o que lhe impõem novas variáveis que podem influir o desempenho do solo estabilizado de maneira distinta.

Portanto, os solos estabilizados com fresado, terão seu desempenho comparados entre estes. O solo 2, que possui uma quantidade grande de finos passante na peneira 0,075 foi o que mais se beneficiou com a adição do fresado, pois este diminui a quantidade de material passante na referida peneira.

Para ajustar melhor a curva à taxa de acúmulo de deformação permanente, utilizou-se a distância do ponto à reta, Figura 106. No gráfico, a cor azul representa a taxa de acumulação de deformação permanente (DP) em regime monoestágio, enquanto a cor laranja representa a taxa de acumulação de DP em regime multiestágios. Nota-se que o regime multiestágio altera o comportamento do solo em relação ao acúmulo de DP, evidenciado pelas diferenças nas barras representativas. Os cumes são os pontos onde a taxa de acumulação muda e uma nova curva exponencial precisa ser ajustada por um modelo mais preciso.

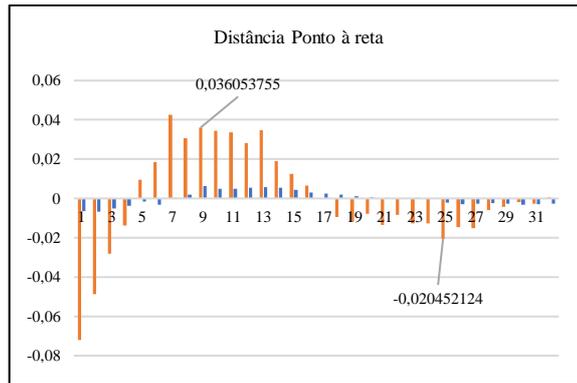
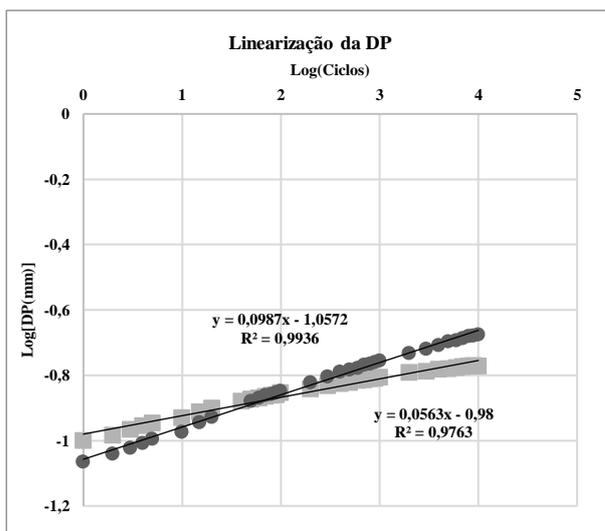


Figura 106: Distância entre ponto e reta

### 5.7.1 Solo 1 x Solo 1 + 1,5% de emulsão

O solo estabilizado com 1,5% de RL tem uma vantagem inicial, com menor DP inicial, mas sua taxa de acúmulo de DP é maior ao longo dos ciclos, o que pode comprometer seu desempenho em cargas cíclicas prolongadas. O solo controle, por outro lado, tem uma maior DP inicial, mas sua taxa de acúmulo de DP é menor, o que pode garantir uma melhor durabilidade ao longo dos ciclos. Estas informações podem ser conferidas no gráfico e legenda da Figura 107.

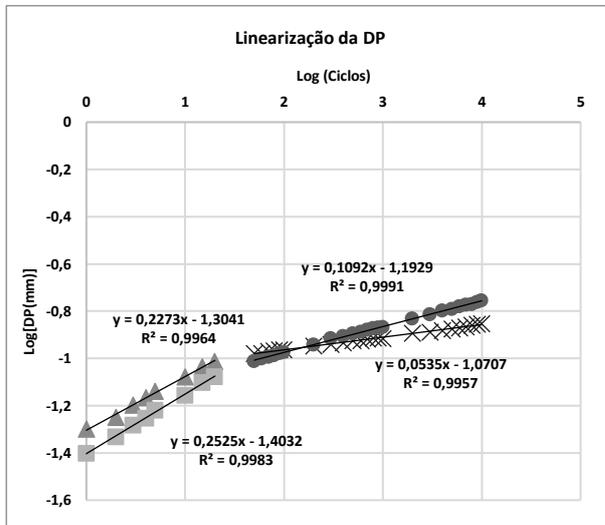


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0563	-0,98	0,977
Solo + 1,5% RL	●	0,0987	-1,0572	0,994

Figura 107: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 1)

Conforme apresentado na Figura 108, a análise dos ciclos de carregamento revela mudanças significativas nos coeficientes angulares e lineares para o solo controle e o solo estabilizado com 1,5% de emulsão. No Ciclo 2, o coeficiente angular do solo controle muda de 0,2273 para 0,0535 no ciclo 20, e do solo estabilizado de 0,2525 para 0,1092 também no ciclo

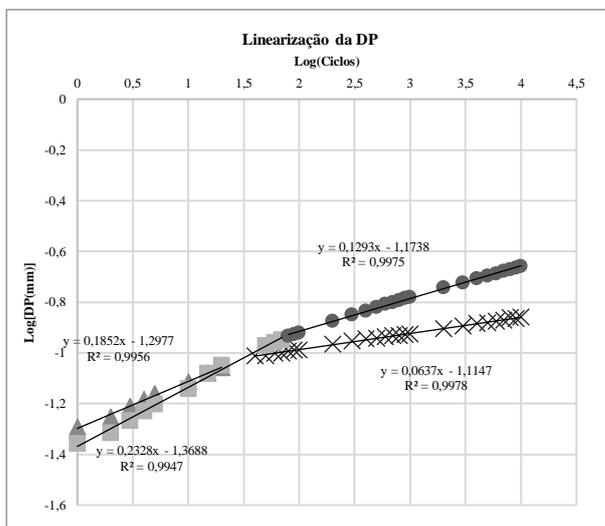
20, indicando uma variação negativa, o que significa uma diminuição na taxa de acúmulo de deformação plástica (DP). Em termos de coeficiente linear, o solo estabilizado apresentou um valor mais negativo (-1,4032 comparado a:1,3041), sugerindo uma DP inicial menor para o solo estabilizado.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,2273	-1,3041	0,996
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0535	-1,0707	0,996
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2525	-1,4032	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1092	-1,1929	0,999

Figura 108: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 2)

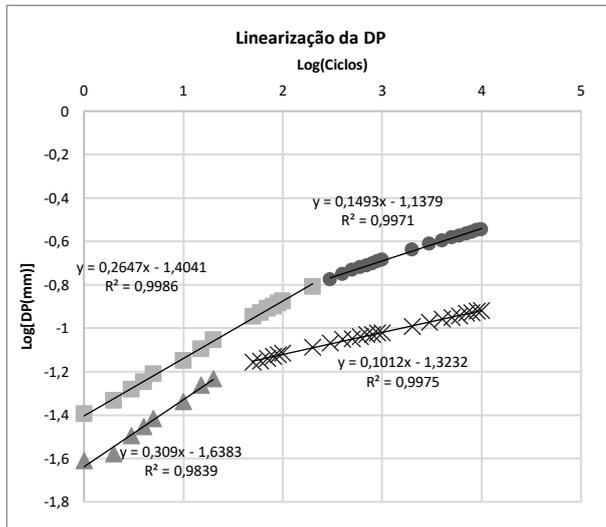
No Ciclo 3 (Figura 109), a mudança do coeficiente angular para o solo controle foi de 0,1852 para 0,0637 no ciclo 20, enquanto para o solo estabilizado, foi de 0,2328 para 0,1293 no ciclo 80, com ambas as variações sendo negativas, o que reflete novamente uma diminuição na taxa de acúmulo de DP. O coeficiente linear do solo estabilizado foi mais negativo (-1,3688), indicando uma DP inicial menor em relação ao solo controle (-1,2977).



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1852	-1,2977	0,996
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0637	-1,1147	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2328	-1,3688	0,996
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1293	-1,1738	0,997

Figura 109: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 3)

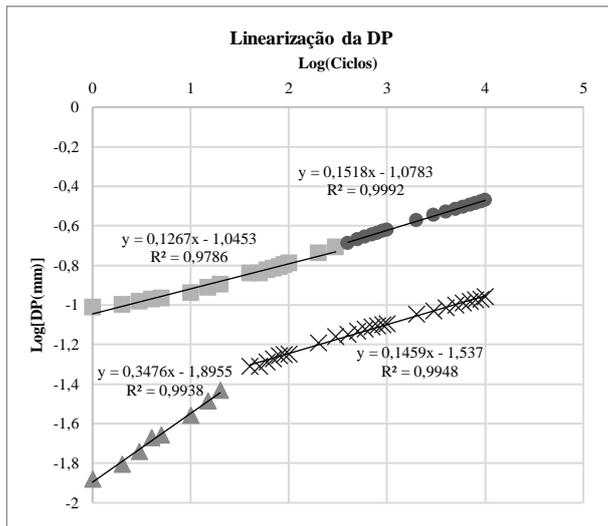
No Ciclo 4, o coeficiente angular do solo controle mudou de 0,309 para 0,1012 no ciclo 20, enquanto o solo estabilizado passou de 0,2647 para 0,1012 no ciclo 200, ambas as variações sendo negativas, conforme gráfico da Figura 110. Nesse ciclo, o coeficiente linear do solo controle (-1,6383) foi mais negativo do que o do solo estabilizado (-1,4041), indicando que o solo controle tem uma DP inicial menor.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R²
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,309	-1,6383	0,984
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1012	-1,3232	0,997
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2647	-1,4041	0,999
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1012	-1,3232	0,997

Figura 110: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 4)

No Ciclo 5 (Figura 111), o solo controle apresentou uma mudança no coeficiente angular de 0,3476 para 0,1459 no ciclo 20, com uma variação negativa, enquanto o solo estabilizado teve uma mudança de 0,1267 para 0,1518 no ciclo 300, com uma variação positiva, sugerindo um aumento na taxa de acúmulo de DP. O coeficiente linear do solo controle foi mais negativo (-1,8955), indicando uma DP inicial menor em comparação ao solo estabilizado (-1,0453).



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,3476	-1,8955	0,984
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1459	-1,537	0,997
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,1267	-1,0453	0,979
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1518	-1,0783	0,999

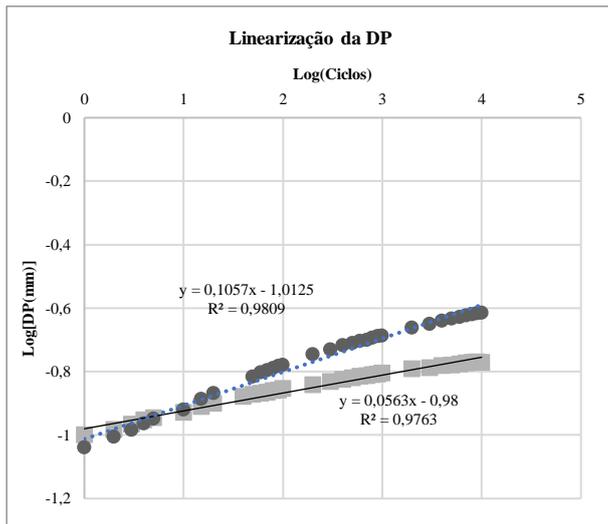
Figura 111: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 1,5% RL (ciclo 5)

Nos ciclos 2, 3 e 4, a mudança do coeficiente angular é negativa para ambos os solos, indicando uma diminuição na taxa de acúmulo de deformação plástica. No ciclo 5, a mudança do coeficiente angular é positiva para o solo estabilizado, indicando um aumento na taxa de acúmulo de DP. O coeficiente linear é mais negativo para o solo estabilizado nos ciclos 2 e 3, indicando uma DP inicial menor. Nos ciclos 4 e 5, o coeficiente linear é mais negativo para o solo controle, indicando que este tem uma DP inicial menor.

### 5.7.2 Solo 1 x Solo 1 + 2% de emulsão

O solo estabilizado com 2% de emulsão apresenta uma DP inicial menor, como indicado pelo coeficiente linear mais negativo (-1,0125), mas acumula DP de forma mais rápida, conforme indicado pelo coeficiente angular maior (0,1057). O solo controle, por outro lado, tem uma DP inicial maior, mas acumula DP de forma mais lenta ao longo do tempo, o que pode garantir uma maior durabilidade sob carregamentos repetidos.

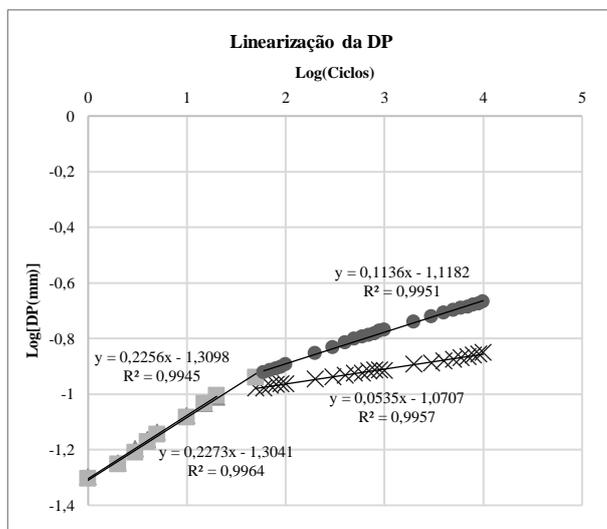
Essas informações sugerem que, embora o solo estabilizado com 2% de emulsão tenha um desempenho inicial melhor, sua maior taxa de acúmulo de DP pode torná-lo menos resistente a longo prazo, em comparação ao solo controle. A Figura 112 mostra a linearização da deformação permanente (DP) para o Solo Controle e o Solo estabilizado com 2% de emulsão no primeiro ciclo de carregamento.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0563	-0,98	0,977
Solo + 2% RL	●	0,1057	-1,0125	0,981

Figura 112: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 1)

No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para ambos os solos, indicando uma variação negativa, ou seja, a taxa de acúmulo de deformação plástica (DP) diminui após esse ponto. O coeficiente angular do solo controle passa de 0,2273 para 0,0535, enquanto o do solo estabilizado passa de 0,2256 para 0,1136. Comparando os coeficientes lineares, o solo estabilizado apresenta um valor mais negativo (-1,3098) em relação ao solo controle (-1,3041), o que sugere que o solo estabilizado tem uma DP inicial menor, mas neste caso pode se considerar que ambos possuem o mesmo ponto de partida, porém o solo estabilizado perde sua resistência ao longo do carregamento, conforme pode ser conferido na Figura 113.

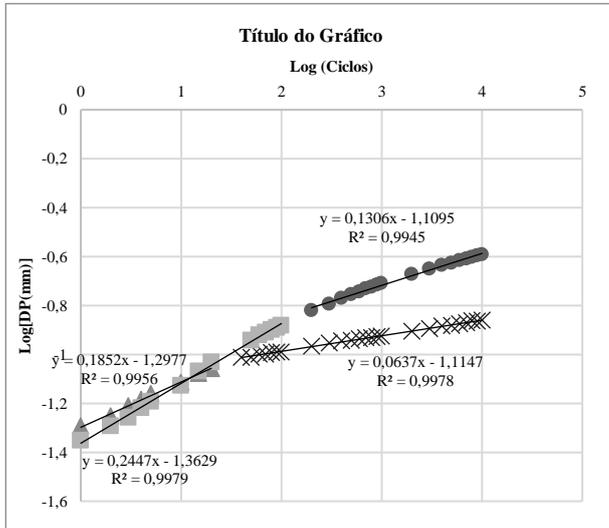


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,2273	-1,3041	0,9964
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0535	-1,0707	0,9957
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2256	-1,3098	0,994
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1136	-1,1244	0,995

Figura 113: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 100 para o solo estabilizado, com ambas as variações sendo negativas, indicando uma

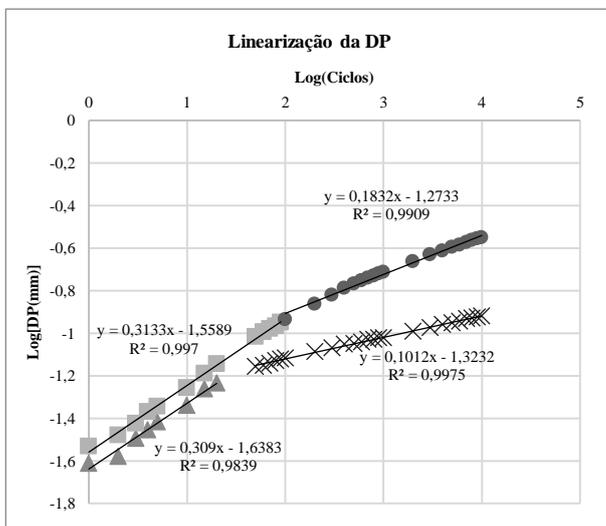
redução na taxa de acúmulo de DP. O coeficiente angular do solo controle muda de 0,1852 para 0,0637, e o do solo estabilizado de 0,2447 para 0,1306. No entanto, o solo estabilizado continua a mostrar uma DP inicial menor, já que seu coeficiente linear (-1,3688) é mais negativo que o do solo controle (-1,2977). Porém, conforme pode ser visualizado na Figura 114, esta redução do coeficiente angular é mais proeminente no solo controle.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R²
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1852	-1,2977	0,996
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0637	-1,1147	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2447	-1,3629	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1306	-1,1095	0,995

Figura 114: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 3)

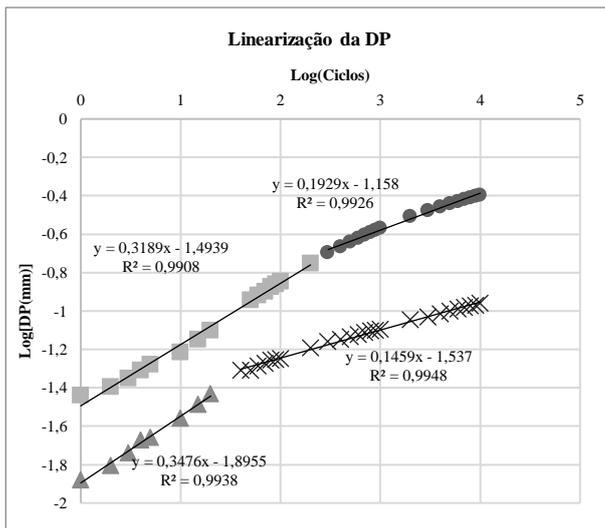
No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 80 para o solo estabilizado, com ambas as variações sendo negativas, novamente indicando uma diminuição na taxa de acúmulo de DP. O coeficiente angular do solo controle passa de 0,309 para 0,1012, enquanto o do solo estabilizado muda de 0,3133 para 0,1832. Nesse ciclo, o coeficiente linear do solo controle (-1,6383) é mais negativo do que o do solo estabilizado (-1,4041), indicando que o solo controle tem uma DP inicial menor.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R²
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,309	-1,6383	0,984
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1012	-1,3232	0,997
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,3133	-1,5589	0,997
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1832	-1,2733	0,991

Figura 115: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 200 para o solo estabilizado. A variação do solo controle continua sendo negativa (de 0,3476 para 0,1459), a variação para o solo estabilizado é também negativa (de 0,3189 para 0,1969), indicando que ambos os materiais reduzem a taxa de acúmulo da DP. Além disso, o coeficiente linear do solo controle (-1,8955) é muito mais negativo do que o do solo estabilizado (-1,158), sugerindo que o solo controle tem uma DP inicial menor. Estas informações podem ser conferidas no gráfico da Figura 116.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,3476	-1,8955	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1459	-1,537	0,995
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,3189	-1,4939	0,991
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1929	-1,158	0,993

Figura 116: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2% RL (ciclo 5)

No ciclo 2 de carregamento o solo controle e estabilizado, possuem coeficiente angulares e lineares parecidos no início do ciclo, com ambos os materiais variando negativamente o coeficiente angular, sendo esta variação mais negativa no solo controle. Nos ciclos de carregamento 3, 4 e 5 tanto o solo controle quanto o solo estabilizado apresentam uma variação negativa no coeficiente angular, o que indica uma diminuição na taxa de acúmulo de deformação plástica (DP) ao longo do tempo. Esse comportamento sugere que, conforme os ciclos de carregamento avançam, os solos se tornam mais resistentes à DP.

Em relação ao coeficiente linear, que reflete a DP inicial, observa-se que no ciclo 3, o solo estabilizado apresenta coeficiente mais negativo, sugerindo uma DP inicial menor em comparação ao solo controle. Contudo, nos Ciclos 4 e 5, o solo controle apresenta coeficientes lineares mais negativos, indicando que ele passa a ter uma DP inicial menor em comparação ao solo estabilizado. Esses resultados sugerem que, embora o solo estabilizado com emulsão tenha um desempenho inicial superior em termos de resistência à DP, com o aumento dos ciclos ele se torna mais vulnerável à deformação em relação ao solo controle.

### 5.7.3 Solo 1 x Solo 1 + 2,5% de emulsão

O solo estabilizado com 2,5% de emulsão acumula DP mais rapidamente ao longo do primeiro ciclo, indicando que este pode ser mais suscetível à deformação plástica sob carregamento cíclico. Portanto, o Solo 1 estabilizado com 2,5% de emulsão apresenta uma menor DP inicial em comparação ao solo controle, mas acumula deformação plástica de maneira mais rápida conforme o ciclo de carregamento avança.

O Solo estabilizado com 2,5% de emulsão tem uma menor DP inicial, conforme indicado pelo coeficiente linear mais negativo (-1,108). No entanto, sua taxa de acúmulo de DP é maior, o que pode impactar negativamente sua performance sob carregamento repetido. O Solo controle apresenta uma taxa de acúmulo de DP menor, mas tem uma DP inicial maior, o que pode indicar uma maior durabilidade ao longo dos ciclos de carregamento, conforme gráfico da Figura 117.

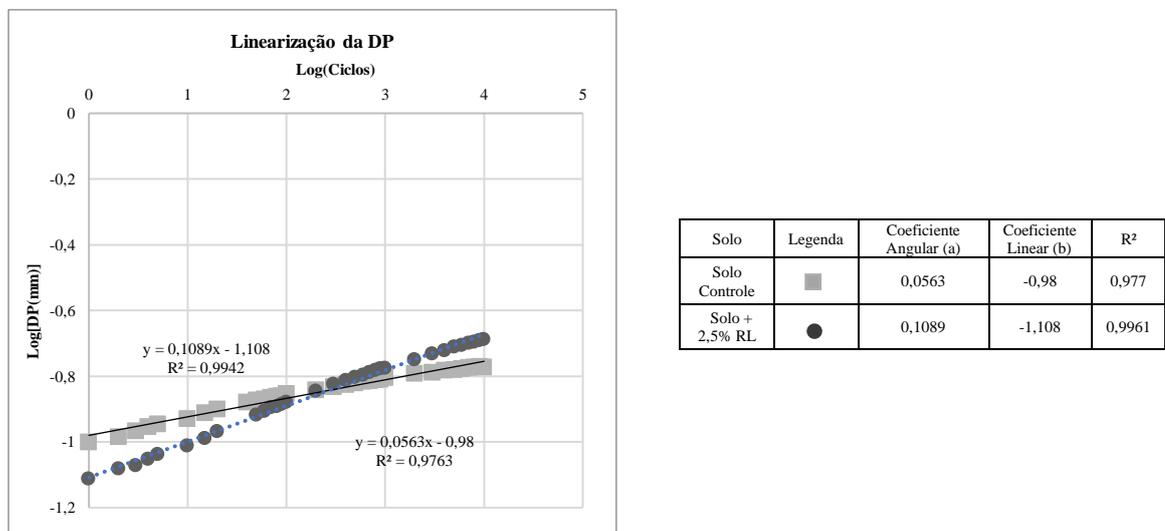
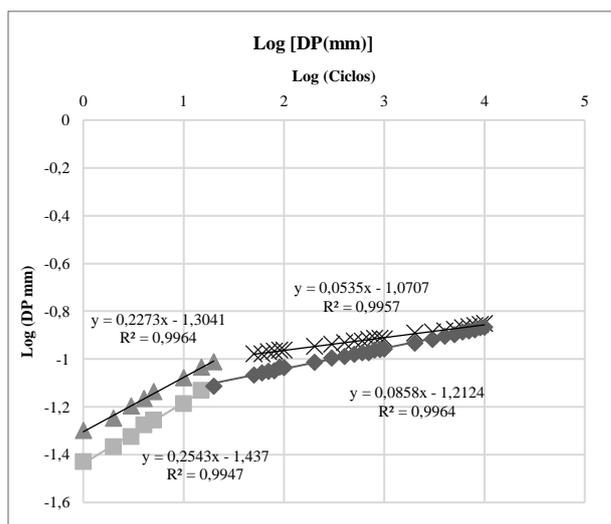


Figura 117: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 1)

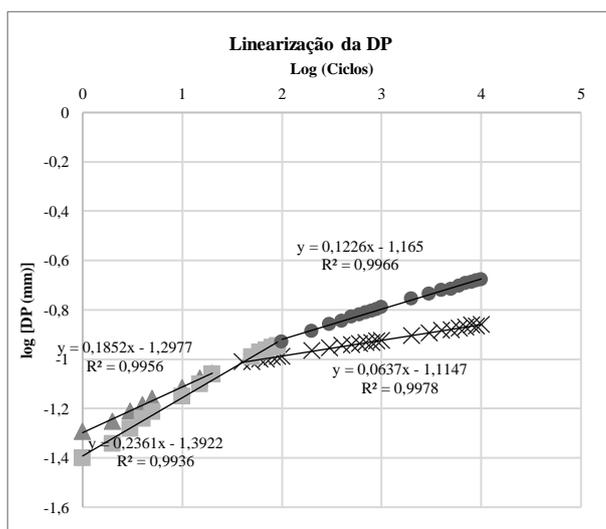
No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 15 para o solo estabilizado. A variação do coeficiente angular é negativa para ambos os solos, indicando que a taxa de acúmulo de deformação plástica (DP) diminui após essa mudança. O coeficiente angular do solo controle passa de 0,2273 para 0,0535, enquanto o coeficiente angular do solo estabilizado muda de 0,2543 para 0,0858. Comparando os coeficientes lineares, o solo estabilizado apresenta um valor mais negativo (-1,437 comparado a:1,3041 no solo controle), sugerindo uma DP inicial menor no solo estabilizado.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,2273	-1,3041	0,9964
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0535	-1,0707	0,9957
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2543	-1,437	0,9947
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,0858	-1,2124	0,9964

Figura 118: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 100 para o solo estabilizado e no ciclo 20 para o solo controle. A variação do coeficiente angular é negativa para ambos os solos, o que indica uma diminuição na taxa de acúmulo de DP. O coeficiente angular do solo controle muda de 0,1852 para 0,0637, e o coeficiente angular do solo estabilizado passa de 0,2361 para 0,1226. Quanto ao coeficiente linear, o solo estabilizado tem um valor mais negativo (-1,3922 em comparação com:1,2977), mostrando uma DP inicial menor, conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 119.

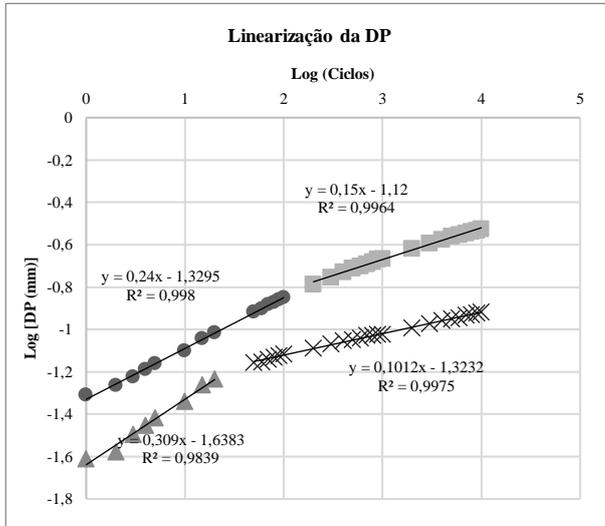


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1852	-1,2977	0,995
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0637	-1,1147	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2361	-1,3922	0,994
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1226	-1,165	0,997

Figura 119: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 100 para o solo estabilizado e no ciclo 20 para o solo controle. A variação é negativa para ambos os solos, sugerindo novamente uma redução na taxa de acúmulo de DP. O coeficiente angular do solo controle passa de 0,309 para 0,1012, e o coeficiente angular do solo estabilizado muda de 0,24

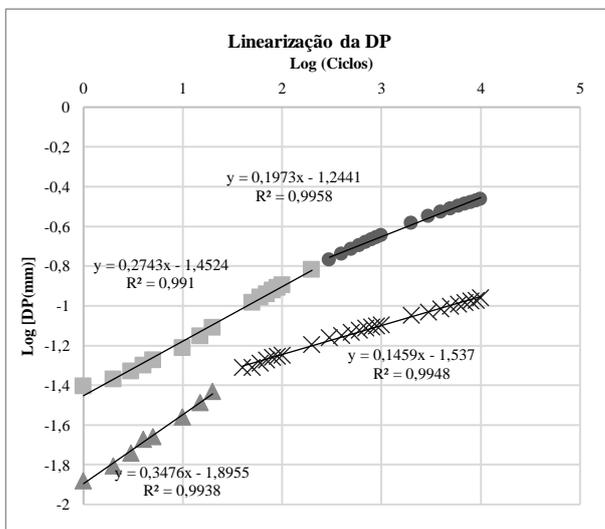
para 0,15. No que diz respeito ao coeficiente linear, o solo controle apresenta um valor mais negativo (-1,6383 comparado a:1,3295), indicando uma DP inicial menor no solo controle, conforme exibido no gráfico da Figura 120



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,309	-1,6383	0,984
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1012	-1,3232	0,997
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,24	-1,3295	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,15	-1,12	0,996

Figura 120: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 200 para o solo estabilizado e no ciclo 20 para o solo controle. A variação do coeficiente angular é negativa para o solo controle (de 0,3476 para 0,1456) e para o solo estabilizado (de 0,2743 para 0,1973), o que indica que o solo estabilizado se torna mais suscetível ao acúmulo de DP à medida que os ciclos progridem. O coeficiente linear do solo controle é mais negativo (-1,8955) em comparação ao solo estabilizado (-1,4524), sugerindo uma DP inicial menor para o solo controle.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,3476	-1,8955	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1456	-1,537	0,995
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2743	-1,4524	0,991
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1973	-1,2441	0,996

Figura 121: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 2,5% RL (ciclo 5)

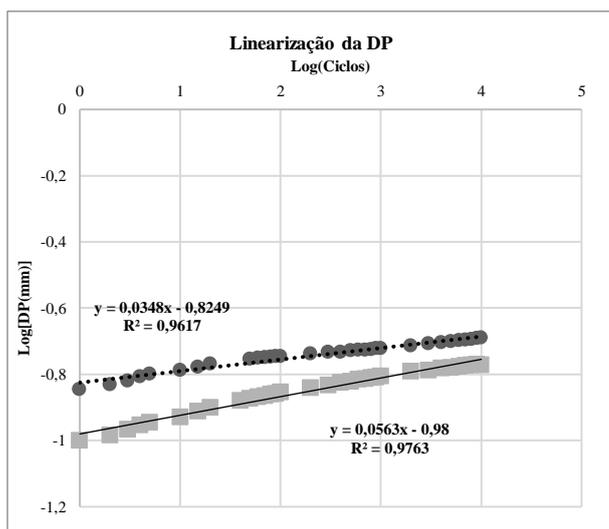
Nos ciclos de carregamento 2, 3, 4 e 5 tanto o solo controle quanto o solo estabilizado apresentam uma variação negativa no coeficiente angular, o que indica uma diminuição na taxa de acúmulo de deformação plástica (DP) ao longo do tempo, sendo esta variação mais proeminente no solo controle. Esse comportamento sugere que, conforme os ciclos de carregamento avançam, os solos se tornam mais resistentes à DP.

Em relação ao coeficiente linear, que reflete a DP inicial, observa-se que nos Ciclos 2 e 3, o solo estabilizado apresenta coeficientes mais negativos, sugerindo uma DP inicial menor em comparação ao solo controle. Contudo, nos Ciclos 4 e 5, o solo controle apresenta coeficientes lineares mais negativos, indicando que o solo controle passa a ter uma DP inicial menor em comparação ao solo estabilizado. Esses resultados sugerem que, embora o solo estabilizado com emulsão tenha um desempenho inicial superior em termos de resistência à DP, com o aumento dos ciclos ele se torna mais vulnerável à deformação em relação ao solo controle.

#### **5.7.4 Solo 1 x Solo 1 + 30% de fresado**

No Ciclo 1 o solo controle a DP aumenta mais rapidamente com o número de ciclos (maior coeficiente angular), mas começa de um ponto mais baixo (mais negativo). Já no solo estabilizado com 30% de fresado, a DP aumenta mais lentamente com o número de ciclos (menor coeficiente angular), mas começa de um ponto mais alto (menos negativo b).

O solo controle, embora tenha um aumento mais rápido da DP com os ciclos, começa de um valor inicial mais baixo de DP. Em contraste, o solo com 30% de fresado que possui uma variação mais gradual de DP, mas começa com valores iniciais de DP mais altos. Essa análise sugere que o fresado pode estar contribuindo para uma maior estabilidade do solo, com menor sensibilidade ao aumento dos ciclos em comparação com o solo controle, conforme pode ser conferido no gráfico da Figura 122.



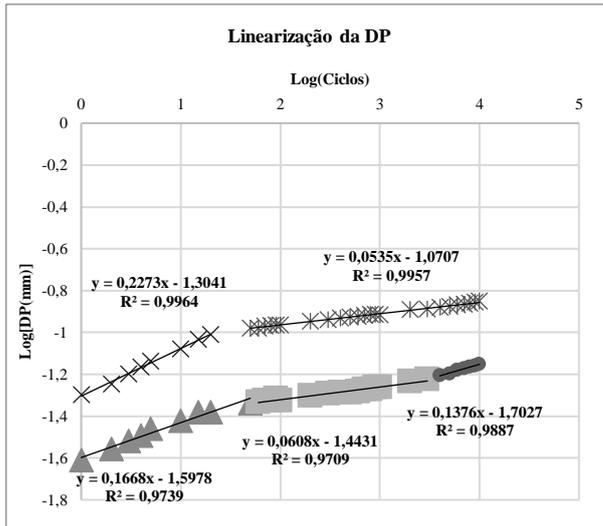
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0563	-0,98	0,977
Solo 1 + 30% FRSD	●	0,0348	-0,8249	0,981

Figura 122: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 1)

No Ciclo 2 o solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0.2273), indicando uma taxa de variação da DP com o aumento dos ciclos maior comparado às fases subsequentes. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui significativamente (0.0535), sugerindo uma diminuição da taxa de acúmulo da DP com o aumento dos ciclos.

O solo estabilizado na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0.1668, mostrando uma taxa de variação menor que o solo controle na primeira fase. O coeficiente linear mais negativo (-1.5978) indica uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui (0.0608), indicando uma taxa de aumento da DP com os ciclos mais lenta. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta novamente (0.1376), indicando uma taxa de variação intermediária.

O solo controle mostra uma variação inicial rápida da DP com os ciclos, mas estabiliza em fases subsequentes. O solo estabilizado apresenta uma variação da DP mais gradual em todas as fases comparado ao solo controle. No entanto, começa o ciclo com uma DP inicial mais baixa. Esta análise mostra que a estabilização do solo modifica o comportamento da DP ao longo dos ciclos, tornando-o mais estável inicialmente, mas com um aumento mais gradual da DP com o tempo comparado ao solo controle. Estas informações podem ser visualizadas graficamente na Figura 123.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	×	0,2273	-1,3041	0,996
Solo Controle (Segunda Fase)	*	0,0535	-1,0707	0,996
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	▲	0,1668	-1,5978	0,974
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0608	-1,4431	0,9709
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	●	0,1376	-1,7027	0,989

Figura 123: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 2)

No Ciclo 3 a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 50 para o solo estabilizado. O solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0.1852), indicando uma taxa de variação da DP com o aumento dos ciclos significativa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui significativamente (0.0637), sugerindo uma taxa de aumento da DP com os ciclos muito menor.

O solo estabilizado na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0.1582, mostrando uma taxa de variação menor que o solo controle na primeira fase. O coeficiente linear mais negativo (-1.6347) indica uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui (0.1078), indicando uma taxa de aumento da DP com os ciclos mais lenta. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta (0.1551), indicando uma taxa de variação mais significativa da DP com os ciclos.

O solo controle mostra uma variação inicial rápida da DP com os ciclos na primeira fase, mas estabiliza em fases subsequentes. O solo estabilizado apresenta uma variação da DP mais gradual em todas as fases comparado ao solo controle. No entanto, o solo controle começa com uma DP inicial mais alta. O comportamento de ambos os materiais é similar ao ocorrido nos ciclos anterior. Estas informações podem ser conferidas no gráfico da Figura 124.

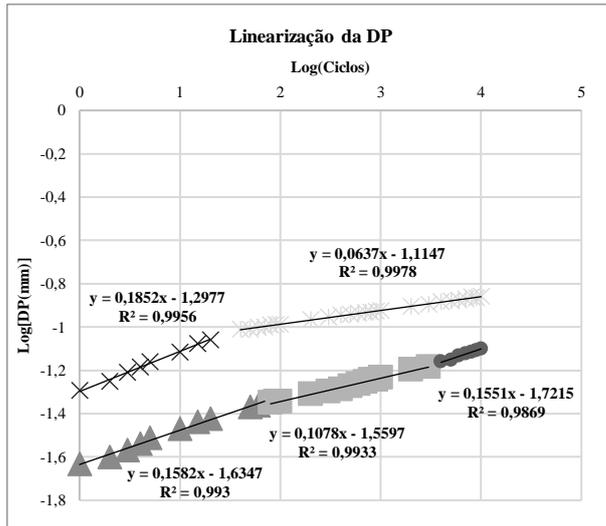
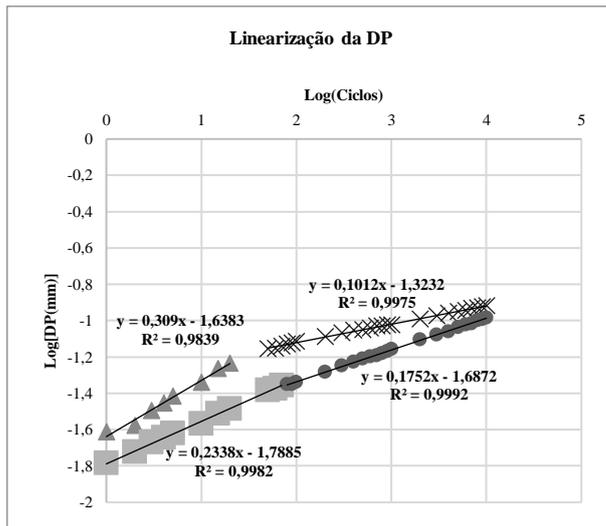


Figura 124: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 3)

No Ciclo 4 a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 50 e 3000 para o solo estabilizado. O solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0.309), indicando uma taxa de variação da DP com o aumento dos ciclos significativa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui significativamente (0.1012), sugerindo uma taxa de aumento da DP com os ciclos muito menor.

O solo estabilizado na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0.2338, mostrando uma taxa de variação menor que o solo controle na primeira fase. O coeficiente linear mais negativo (-1.7885) indica uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui (0.1752), indicando uma taxa de aumento da DP com os ciclos mais lenta. O solo controle apresenta uma variação inicial rápida da DP com os ciclos na primeira fase, mas estabiliza em fases subsequentes. Estas informações podem ser vistas no gráfico da Figura 125.

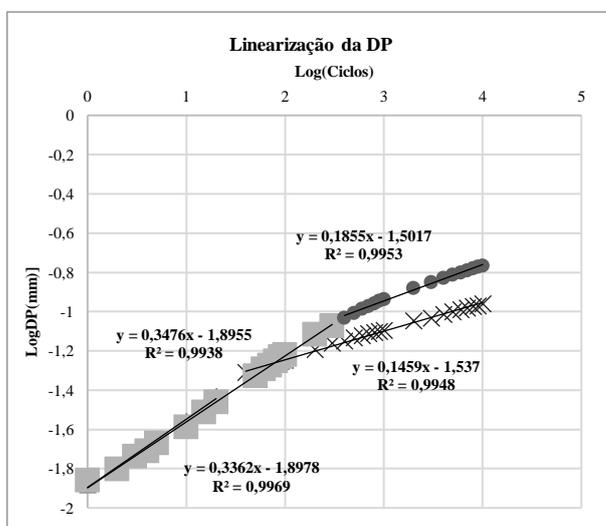


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,309	-1,6383	0,984
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1012	-1,1332	0,997
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2338	-1,7885	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1752	-1,6872	0,999

Figura 125: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 4)

No Ciclo 5 a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 300 para o solo estabilizado. O solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0.3476), indicando uma taxa de variação da DP com o aumento dos ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui (0.1459), sugerindo uma taxa de aumento da DP com os ciclos menor.

O solo estabilizado na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0.3362, mostrando uma taxa de variação similar ao solo controle na primeira fase. O coeficiente linear é ligeiramente mais negativo (-1.8978), indicando uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui (0.1855), indicando uma taxa de aumento da DP com os ciclos mais lenta, porém mais elevada do que o solo controle.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,3476	-1,8955	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1459	-1,537	0,995
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,3362	-1,8978	0,997
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1459	-1,537	0,995

Figura 126: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado (ciclo 5)

O solo controle tende a apresentar uma taxa inicial de acúmulo de DP maior, mas estabiliza mais rapidamente nas fases subsequentes. No entanto, sua deformação inicial é menor em comparação ao solo estabilizado.

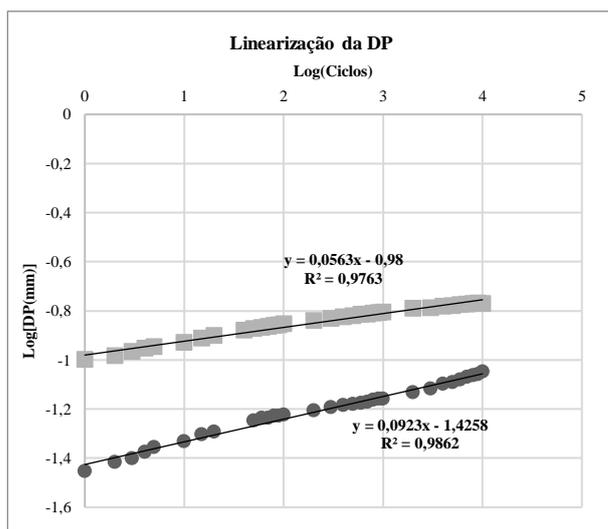
O solo estabilizado com 30% de fresado demonstra uma melhor resistência inicial à deformação plástica, começando com uma DP inicial mais baixa, mas acumula deformação de maneira mais gradual e de forma mais constante ao longo dos ciclos. Isso indica que a estabilização com fresado melhora a resistência inicial, porém com uma menor taxa de estabilização ao longo do tempo. A adição de fresado pode contribuir para uma maior estabilidade do solo e menor sensibilidade ao aumento dos ciclos, como evidenciado em todos os ciclos analisados.

#### **5.7.5 Solo 1 x Solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão**

No primeiro ciclo o composto com 30% de fresado e 2% de emulsão começa com uma DP inicial mais baixa (-1.4258) comparado ao solo controle (-0.98). Isso sugere que o solo estabilizado tem uma resistência inicial maior à deformação, mas essa resistência diminui mais rapidamente com o tempo. O composto com 30% de fresado (FRSD) e 2,5% de emulsão RL tem uma taxa de variação da DP maior (0.0923) comparado ao solo controle (0.0563). Isso indica que o solo estabilizado com fresado e emulsão acumula deformações permanentes mais rapidamente com o aumento dos ciclos.

O solo controle apresenta uma menor taxa de variação da DP, indicando uma resistência mais constante ao longo dos ciclos. No entanto, a DP inicial é mais alta. O solo 1 + 30% FRSD + 2% de emulsão apresenta uma maior taxa de variação da DP, indicando que a resistência à deformação diminui mais rapidamente com o tempo. No entanto, começa com uma DP inicial mais baixa, sugerindo uma melhor resistência inicial.

Essa análise mostra que a adição de 30% de fresado e 2% de emulsão ao solo melhora a resistência inicial à deformação, mas a taxa de aumento da DP é maior, indicando uma perda mais rápida de resistência ao longo dos ciclos, conforme pode ser visto na Figura 127.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0563	-0,98	0,976
Solo 1 + 30% FRSD + 2% RL	●	0,0923	-1,4258	0,986

Figura 127: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 1)

No Ciclo 2 a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 300 para o solo estabilizado. O solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0.2273), indicando uma taxa de variação da DP com o aumento dos ciclos significativa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui significativamente (0.0535), sugerindo uma taxa de aumento da DP com os ciclos muito menor.

O solo estabilizado na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0.1269, mostrando uma taxa de variação menor que o solo controle na primeira fase, mas ainda significativa. O coeficiente linear mais negativo (-1.4285) indica uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui (0.0897), indicando uma taxa de aumento da DP com os ciclos mais lenta. O coeficiente linear (-1.3707) é menos negativo que na primeira fase, mas ainda abaixo do solo controle. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta (0.162), indicando uma taxa de variação mais significativa da DP com os ciclos.

O solo controle mostra uma variação inicial rápida da DP com os ciclos na primeira fase, mas estabiliza em fases subsequentes. O solo estabilizado apresenta uma variação da DP mais gradual em todas as fases comparado ao solo controle. Estas informações podem ser conferidas na Figura 128.

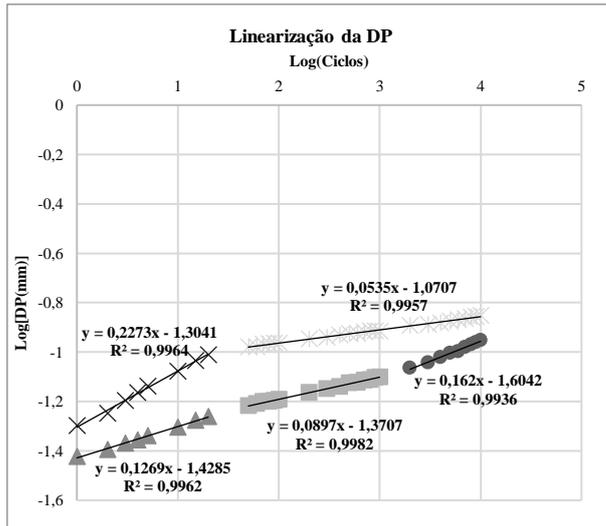
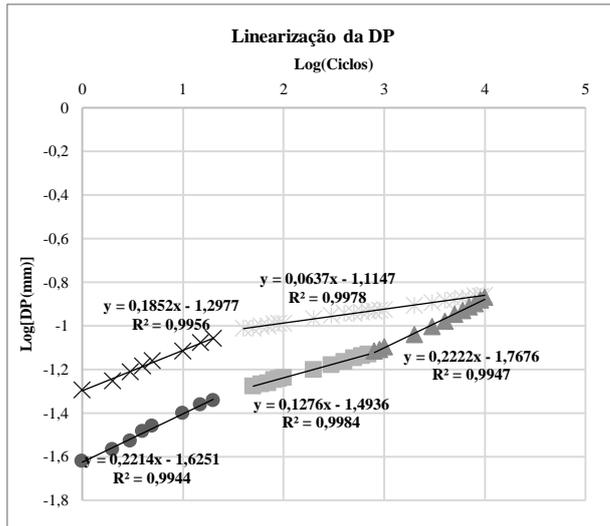


Figura 128: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 2)

No Ciclo 3 a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 600 para o solo estabilizado. O solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0.1852), indicando uma taxa de variação da DP com o aumento dos ciclos significativa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui significativamente (0.0637), sugerindo uma taxa de aumento da DP com os ciclos muito menor.

O solo estabilizado na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0.2214, mostrando uma taxa de variação maior que o solo controle na primeira fase. O coeficiente linear mais negativo (-1.6251) indica uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui (0.1276), indicando uma taxa de aumento da DP com os ciclos mais lenta. O coeficiente linear (-1.4936) é menos negativo que na primeira fase, mas ainda menor que o solo controle, indicando uma diminuição da angulação da reta. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta (0.2222), indicando uma taxa de variação mais significativa da DP com os ciclos. Estas informações podem ser visualizadas na Figura 129.

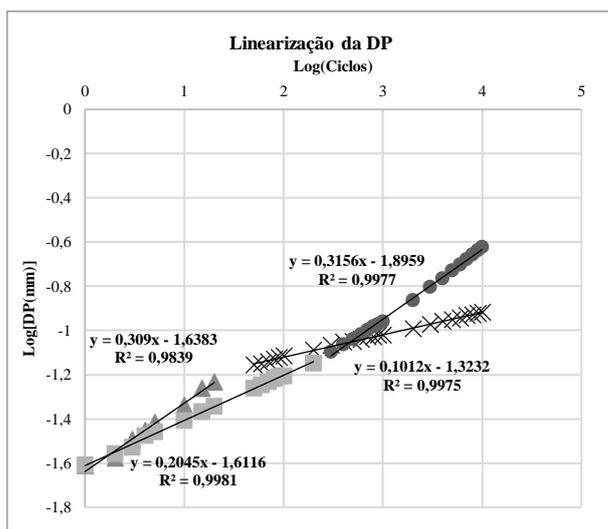


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	×	0,1852	-1,2977	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	*	0,0637	-1,1147	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,2214	-1,6251	0,994
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,1276	-1,4936	0,998
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	▲	0,2222	-1,7676	0,985

Figura 129: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 3)

No Ciclo 4 a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 200 para o solo estabilizado. O solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0.309), indicando uma taxa de variação da DP com o aumento dos ciclos significativa. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui significativamente (0.1012), sugerindo uma taxa de aumento da DP com os ciclos muito menor.

O solo estabilizado na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0.2045, mostrando uma taxa de variação menor que o solo controle na primeira fase. O coeficiente linear mais negativo (-1.6116) indica uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular aumenta (0.3156), indicando uma taxa de variação mais significativa da DP com os ciclos. Estes dados podem ser visualizados no gráfico da Figura 130.

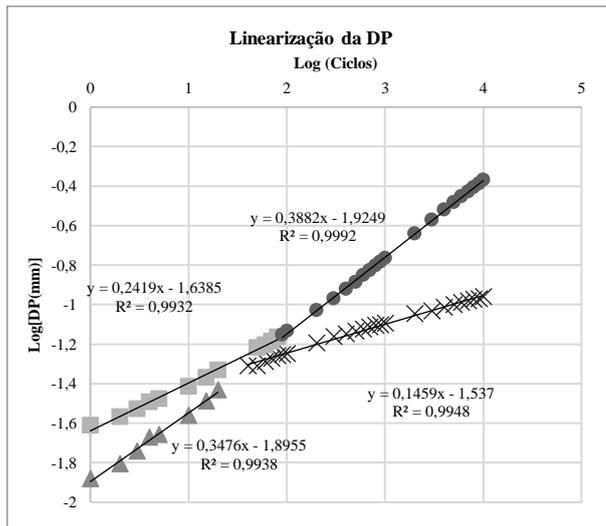


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,309	-1,6383	0,984
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1012	-1,3232	0,997
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2045	-1,6116	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,3156	-1,8959	0,998

Figura 130: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 4)

No Ciclo 5 a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 90 para o solo estabilizado. O solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0.3476), indicando uma taxa de variação da DP com o aumento dos ciclos significativa. O valor de. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui significativamente (0.1459), indicando uma taxa de aumento da DP com os ciclos mais lenta.

O solo estabilizado na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0.2419, mostrando uma taxa de variação menor que o solo controle na primeira fase. O coeficiente linear mais negativo (-1.6385) indica uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular aumenta (0.3882), indicando uma taxa de variação mais significativa da DP com os ciclos. Estes dados podem ser visualizados na Figura 131.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,3476	-1,8955	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1459	-1,537	0,995
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2419	-1,6385	0,993
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,3882	-1,9249	0,999

Figura 131: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 30% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 5)

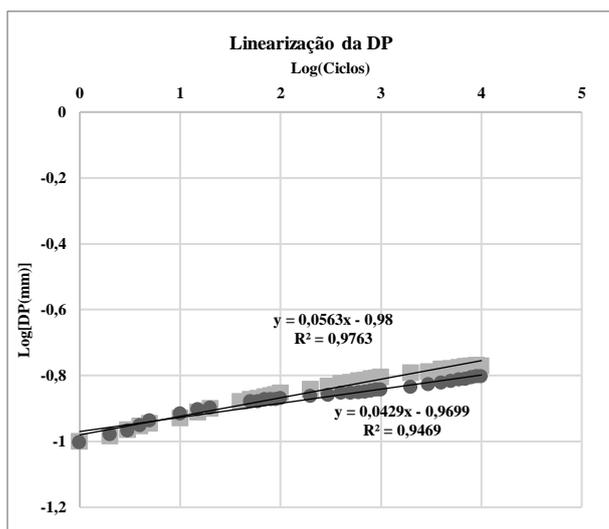
A adição de fresado e emulsão contribui para melhorar a resistência inicial do solo, mas parece reduzir a capacidade do solo de manter essa resistência ao longo do tempo, já que o acúmulo de DP é mais acelerado. Isso sugere que, embora o solo estabilizado com fresado e emulsão possa ser vantajoso em situações de carga inicial, ele pode não ter o mesmo desempenho a longo prazo sob condições de carregamento repetido.

O solo controle demonstra uma resistência mais estável ao longo do tempo, enquanto o solo estabilizado com 30% de fresado e 2% de emulsão tem uma melhor resistência inicial, mas perde essa vantagem à medida que os ciclos de carregamento se acumulam.

### 5.7.6 Solo 1 x Solo 1 + 50% de fresado

No Ciclo 1 o solo controle possui um coeficiente angular de 0,0563, enquanto o solo com 50% de FRSD apresenta um coeficiente angular menor, de 0,0429. Isso indica que a taxa de crescimento da deformação permanente em relação ao logaritmo dos ciclos é menor no solo com 50% de FRSD. Em outras palavras, o solo com FRSD apresenta uma menor tendência de deformação ao longo dos ciclos.

Os coeficientes lineares são bastante próximos entre os dois solos, com valores de:0,98 para o solo controle e:0,9699 para o solo com 50% de FRSD, conforme indica o gráfico da Figura 132. Este parâmetro indica a deformação inicial (em log), sendo ligeiramente mais alta no solo controle.

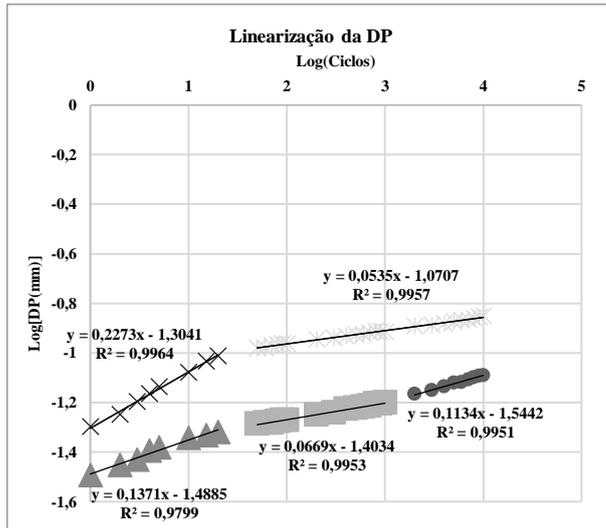


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0563	-0,98	0,976
Solo 1 + 50% FRSD	●	0,0429	-0,9699	0,947

Figura 132: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 1)

No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 3000 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular relativamente alto (0,2273), indicando uma taxa de crescimento da deformação plástica mais acentuada inicialmente. O coeficiente linear de:1,3041 reflete a interceptação no eixo y e sua DP inicial. Na segunda fase, a taxa de crescimento da deformação plástica diminui significativamente, com um coeficiente angular de 0,0535, indicando um comportamento mais estável após a primeira fase de ciclos.

Na primeira fase, o solo estabilizado tem um coeficiente angular de 0,1371, menor que o solo controle na mesma fase, indicando uma menor taxa de crescimento inicial da deformação plástica. O coeficiente linear é de:1,4885, mais negativo do que o solo controle. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui ligeiramente para 0,0669, sugerindo uma desaceleração na taxa de crescimento da deformação plástica comparada à primeira fase, maior que a taxa inicial do solo controle na segunda fase. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta para 0,1134 indica uma nova fase de aceleração na deformação plástica, maior que a segunda fase. Estas informações estão disponíveis no gráfico da Figura 133.

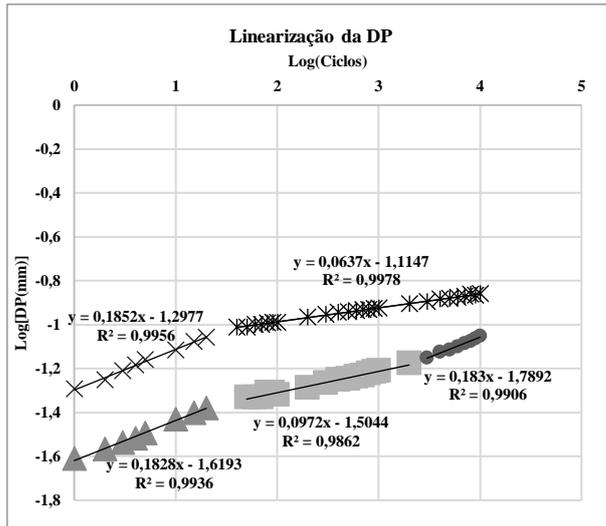


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	×	0,2273	-1,3041	0,996
Solo Controle (Segunda Fase)	*	0,0535	-1,0707	0,996
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	▲	0,1371	-1,4885	0,980
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0669	-1,4034	0,995
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	●	0,1134	-1,15442	0,995

Figura 133: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 3000 para o solo estabilizado. Na primeira fase o coeficiente angular do solo controle é de 0,1852 e o coeficiente linear de:1,2977 sugere um ponto inicial relativamente alto em comparação com solo estabilizado. Na segunda fase o coeficiente angular de 0,0637 é menor do que na primeira fase, indicando uma diminuição na taxa de crescimento da deformação plástica.

Na primeira fase o coeficiente angular de 0,1828 é muito próximo ao da primeira fase do solo controle, indicando uma taxa de crescimento da deformação plástica semelhante. O coeficiente linear de:1,6193 é menor, sugerindo um ponto inicial mais baixo. Na segunda fase o coeficiente angular de 0,0972 é maior do que na segunda fase do solo controle, indicando uma taxa de crescimento da deformação plástica um pouco maior. Na terceira fase o coeficiente angular de 0,183 é maior do que nas fases anteriores, indicando uma taxa de crescimento acelerada da deformação plástica, similar a primeira fase. Estes dados podem ser visualizados no gráfico da Figura 134.

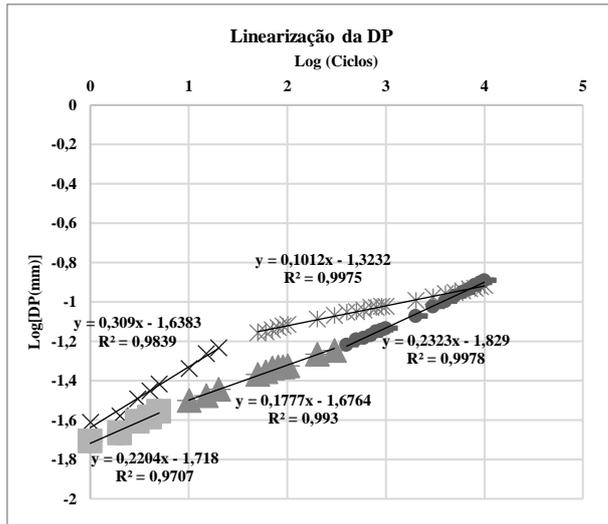


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	✱	0,1852	-1,2977	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0637	-1,1147	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1828	-1,6193	0,994
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0972	-1,5044	0,986
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	▲	0,183	-1,7892	0,991

Figura 134: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 5 e 300 para o solo estabilizado. Para o solo controle, a análise da linearização da DP apresenta duas fases distintas. Na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,309. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,1012, sugerindo uma inclinação menor e uma resposta mais estável ao aumento dos ciclos.

No caso do solo estabilizado, a análise mostra três fases distintas. Na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,2204, maior do que o da segunda fase do solo controle, indicando uma resposta inicial mais pronunciada. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,1777, mas ainda permanece maior do que o da segunda fase do solo controle, indicando uma resposta menos estável. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta novamente para 0,2323, mostrando uma resposta mais pronunciada à medida que os ciclos aumentam, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 135.

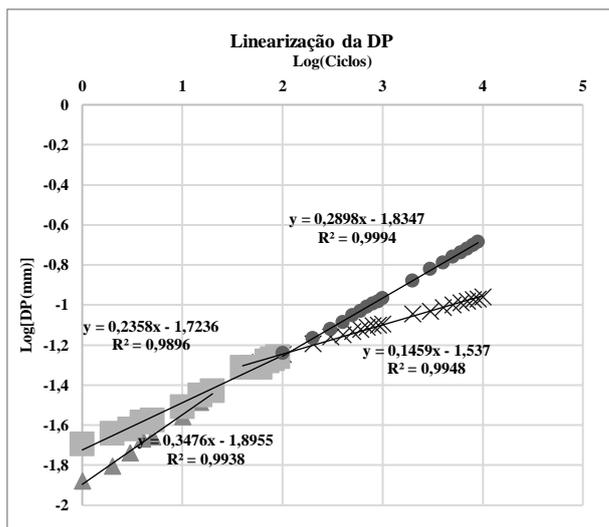


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	×	0,309	-1,6383	0,984
Solo Controle (Segunda Fase)	*	0,1012	-1,3232	0,997
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,2204	-1,718	0,971
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	▲	0,1777	-1,6764	0,993
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	■	0,2323	-1,829	0,998

Figura 135: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 1000 para o solo estabilizado. Para o solo controle, a análise da linearização da DP apresenta duas fases distintas. Na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,3476, indicando uma inclinação acentuada na relação log-log entre a deformação plástica e os ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,1459, sugerindo uma resposta mais estável.

No caso do solo estabilizado, a análise mostra duas fases distintas. Na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,2358. Na segunda fase, o coeficiente angular aumenta para 0,2898, sugerindo uma resposta ainda mais pronunciada à medida que os ciclos aumentam. Isso indica que o solo estabilizado mantém uma resposta mais pronunciada à deformação plástica ao longo do tempo em comparação com o solo controle, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 136.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,3476	-1,8955	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1459	-1,537	0,995
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2358	-1,7236	0,990
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,2898	-1,8347	0,999

Figura 136: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado (ciclo 5)

O Solo Controle apresenta uma resistência mais constante ao longo dos ciclos, com uma estabilização mais rápida após as primeiras fases de carregamento.

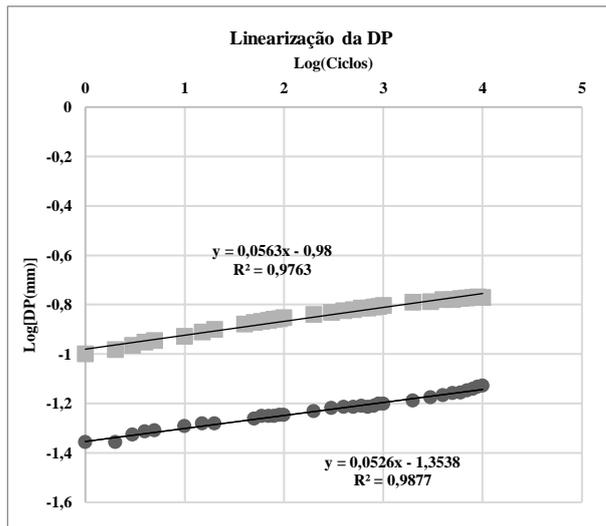
O Solo Estabilizado com 50% de fresado demonstra uma melhor resistência inicial à DP, deformando mais lentamente nas fases iniciais. No entanto, a taxa de acúmulo de DP aumenta nas fases subsequentes, indicando uma perda mais rápida de resistência à medida que os ciclos se acumulam.

Essas informações sugerem que o uso de 50% de fresado melhora a resistência inicial à deformação, mas não garante um desempenho superior a longo prazo em relação ao solo controle sob condições de carregamento repetido.

### 5.7.7 Solo 1 x Solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão

No Ciclo 1, para o solo controle, o coeficiente angular é de 0,0563, indicando uma resposta relativamente estável da deformação plástica ao longo dos ciclos. O coeficiente linear é: 0,98.

No caso do solo 1 + 50% FRSD + 2,5% RL, o coeficiente angular é de 0,0526, ligeiramente menor que o do solo controle, indicando uma resposta um pouco mais moderada da deformação plástica ao longo dos ciclos. O coeficiente linear é: 0,3538, mostrando uma que o valor inicial da DP é menor do que do solo controle. Esta informação pode ser conferida no comportamento das curvas na Figura 137.

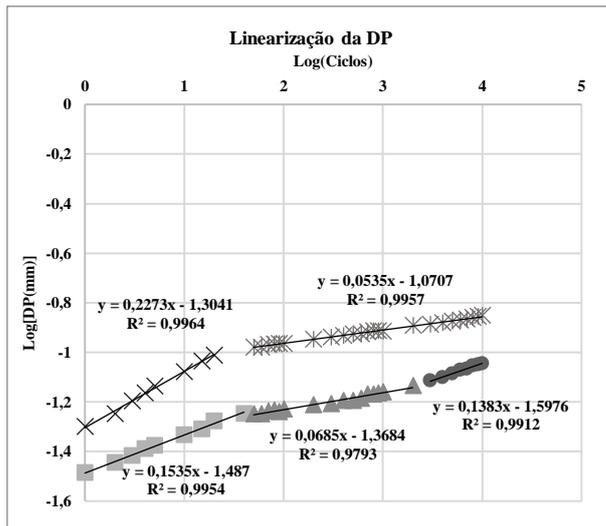


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0563	-0,98	0,976
Solo 1 + 50% FRSD + 2,5%RL	●	0,0526	-0,3538	0,988

Figura 137: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 1)

No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 40 e 3000 para o solo estabilizado. Para o solo controle na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,2273, indicando uma resposta acentuada da deformação plástica ao longo dos ciclos. O coeficiente linear é de:1,3041. Na segunda fase do solo controle, o coeficiente angular diminui para 0,0535, sugerindo uma resposta mais moderada.

Para o solo estabilizado, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,1535, indicando uma resposta moderada. Na segunda fase do solo estabilizado, o coeficiente angular é 0,0685, mostrando uma resposta mais suave. Na terceira fase do solo estabilizado, o coeficiente angular aumenta para 0,13834, indicando um leve aumento na resposta. O coeficiente linear mais negativo sugere que o solo inicia o acúmulo da DP com valores menores, conforme infográfico da Figura 138.

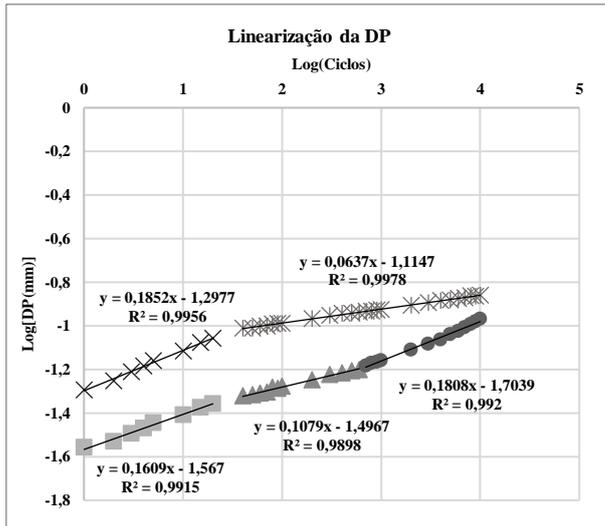


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	×	0,2273	-1,3041	0,996
Solo Controle (Segunda Fase)	✱	0,0535	-1,0707	0,996
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	▲	0,1535	-1,487	0,995
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0685	-1,3684	0,979
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	●	0,13834	-1,15976	0,991

Figura 138: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 600 para o solo estabilizado. Para o solo controle na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,1852. O coeficiente linear de:1,2977. Na segunda fase do solo controle, o coeficiente angular diminui para 0,0637, sugerindo uma resposta mais moderada.

Para o solo estabilizado, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,1609. O coeficiente linear de:1,567, que significa uma DP inicial menor do que do solo controle. Na segunda fase do solo estabilizado, o coeficiente angular é 0,1079, mostrando uma resposta mais suave. Na terceira fase do solo estabilizado, o coeficiente angular aumenta para 0,1808, indicando um leve aumento na resposta plástica. Estes dados podem ser visualizados no gráfico da Figura 139.

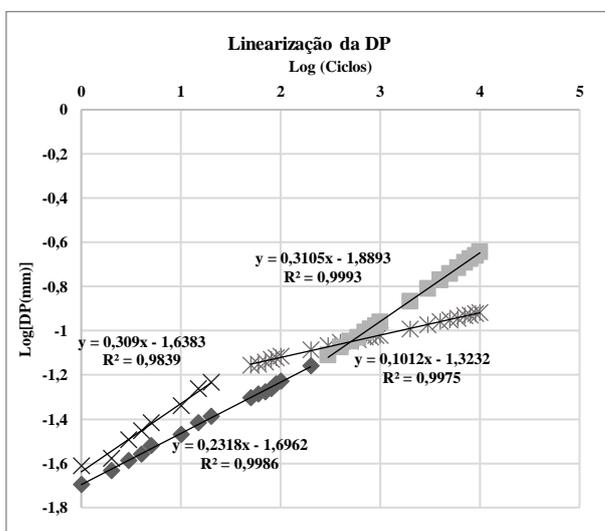


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	×	0,1852	-1,2977	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	*	0,0637	-1,1147	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1609	-1,567	0,991
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	▲	0,1079	-1,4967	0,990
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	■	0,1808	-1,7039	0,992

Figura 139: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 200 para o solo estabilizado. Para o solo controle na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,309. O coeficiente linear de:1,6383. Na segunda fase do solo controle, o coeficiente angular diminui para 0,1012, sugerindo uma resposta mais moderada.

Para o solo estabilizado, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,2318, indicando uma resposta inicial mais moderada. O coeficiente linear de:1,6962 ligeiramente menor do que o solo controle, indicando uma DP permanente menor no início do ciclo de carregamento. Na segunda fase do solo estabilizado, o coeficiente angular aumenta para 0,3105, mostrando uma resposta mais acentuada. Estes dados podem ser conferidos no gráfico da .

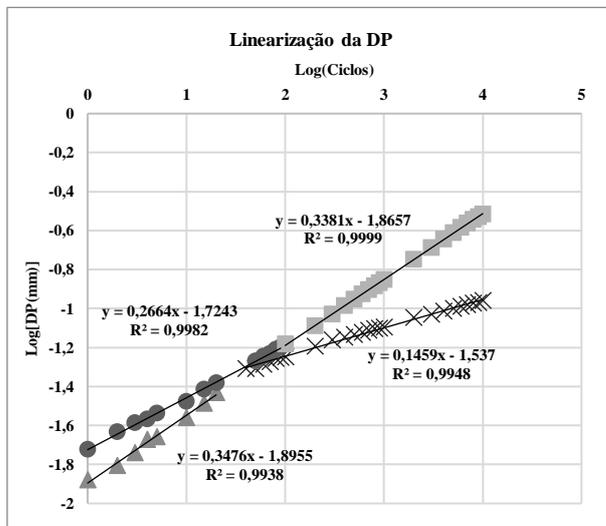


Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,309	-1,6383	0,984
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1012	-1,3232	0,997
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2204	-1,718	0,971
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1777	-1,6764	0,993

Figura 140: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 4)

Para o Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 70 para o solo estabilizado. O solo controle na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,3476. O coeficiente linear de:1,8955. Na segunda fase do solo controle, o coeficiente angular diminui para 0,1459, sugerindo uma resposta mais moderada.

Para o solo estabilizado, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,2664, indicando uma resposta moderada. O coeficiente linear de:1,7243, mais alto do que o do solo controle. Na segunda fase do solo estabilizado, o coeficiente angular aumenta para 0,3381, mostrando uma resposta mais acentuada. Apesar de um coeficiente angular menor na primeira fase, este incrementa-se e atinge um maior valor de DP na segunda fase, conforme exibido no gráfico da Figura 141.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,3476	-1,8955	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,1459	-1,537	0,995
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,2664	-1,7243	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,3381	-1,8657	0,999

Figura 141: Linearização da DP do solo 1 controle e solo 1 + 50% de fresado + 2% de emulsão (ciclo 5)

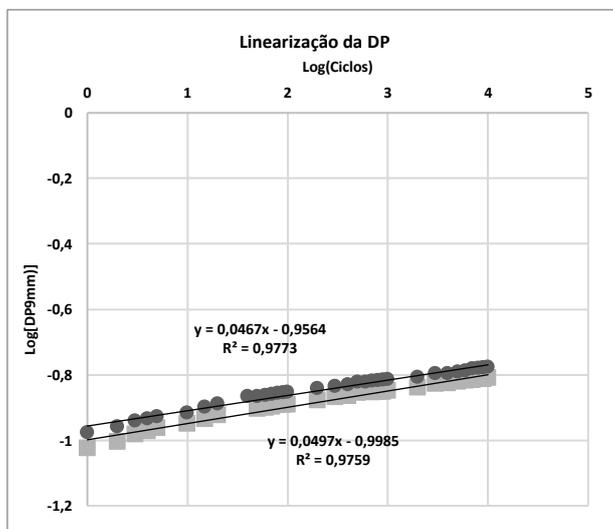
A adição de 50% de fresado e 2,5% de emulsão ao Solo 1 resulta em uma melhor resistência inicial à deformação (menor DP inicial), mas com um acúmulo de DP mais acentuado ao longo dos ciclos, especialmente nas fases subsequentes. O solo controle, por outro lado, embora apresente uma DP inicial mais alta, estabiliza-se mais rapidamente com um acúmulo de DP menor ao longo do tempo.

### 5.7.8 Solo 2 x Solo 2 + 0,5% emulsão

No Ciclo 1, para o Solo Controle, o coeficiente angular é de 0,0497, indicando uma taxa moderada de variação da DP ao longo dos ciclos. O coeficiente linear é de:0,9985, o que reflete uma deformação plástica inicial um pouco mais baixa em comparação ao solo estabilizado.

Para o Solo 1 estabilizado com 0,5% de emulsão, o coeficiente angular é de 0,0467, indicando uma resposta ligeiramente mais lenta na taxa de variação da DP. O coeficiente linear de:0,9564. Isso demonstra que, na fase inicial, o solo estabilizado apresenta uma pior resistência à deformação plástica.

Enquanto o solo controle apresenta uma DP inicial menor, o solo estabilizado com 0,5% de emulsão acumula deformação de forma um pouco mais lenta, o que pode proporcionar uma melhor resistência e um desempenho mais controlado ao longo dos ciclos, como exibido no gráfico.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0497	-0,9985	0,976
Solo 2 + 0,5%RL	●	0,0467	-0,9564	0,977

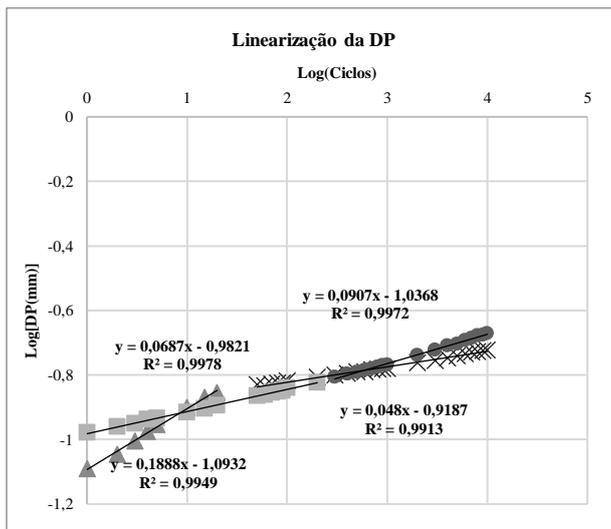
Figura 142: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 1)

No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 200 para o solo estabilizado. O comportamento de deformação permanente (DP) do solo controle na primeira fase apresenta um coeficiente angular de 0,1888, indicando uma taxa de variação relativamente acentuada da DP em função dos ciclos em comparação com o solo estabilizado. O coeficiente linear de:1,0932 sugere uma DP inicial mais baixa. Já na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,048, indicando uma desaceleração na taxa de variação da DP.

Para o solo estabilizado, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,0687, indicando uma resposta inicial mais moderada em comparação com o solo controle. O coeficiente linear

de:0,9821 sugere uma DP inicial um pouco mais alta do que no solo controle. Já na segunda fase, o coeficiente angular aumenta para 0,0907, indicando que o solo estabilizado acumula DP de forma mais rápida à medida que os ciclos avançam.

O solo controle apresenta uma variação mais acentuada da DP na primeira fase, seguida por uma desaceleração considerável na segunda fase. Já o solo estabilizado com 0,5% de emulsão tem uma resposta mais moderada na primeira fase, mas acelera o acúmulo de DP na segunda fase, mostrando um comportamento de acúmulo de deformação mais agressivo ao longo dos ciclos. Embora o solo estabilizado inicie com uma DP ligeiramente mais baixa, ele perde essa vantagem com o acúmulo de ciclos, resultando em uma taxa de deformação mais acentuada, conforme ilustrado na Figura 143.



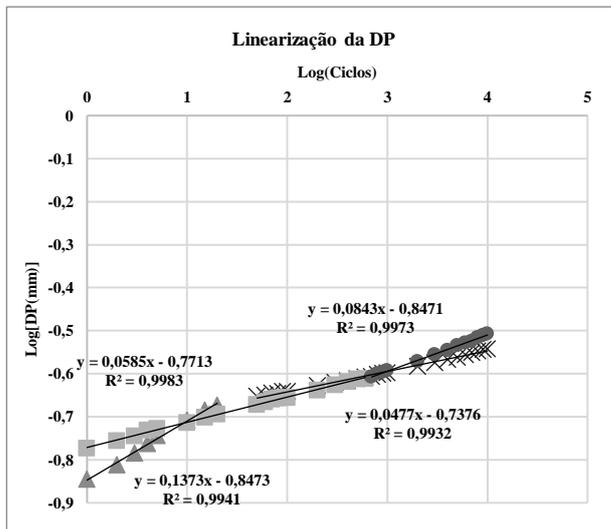
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1888	-1,0932	0,995
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,048	-0,9187	0,991
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,0687	-0,9821	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,0907	-1,0368	0,997

Figura 143: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 600 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle possui coeficiente angular é de 0,1373, indicando uma taxa de acúmulo de DP mais acentuada. O coeficiente linear é de:1,8473, o que sugere uma deformação plástica inicial menor em relação ao solo estabilizado. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,0477, indicando uma redução na taxa de acúmulo de DP ao longo dos ciclos.

Já o solo estabilizado, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,0585, o que indica uma taxa de acúmulo de DP mais moderada em comparação ao solo controle na mesma fase. O coeficiente linear é de:0,7713, o que sugere uma deformação plástica inicial maior que a do solo controle. Na segunda fase, o coeficiente angular aumenta para 0,0843, o que mostra um aumento na taxa de acúmulo de DP.

O Solo Controle apresenta uma menor DP inicial na primeira fase, mas estabiliza e acumula DP a uma taxa menor na segunda fase. O solo estabilizado com 0,5% de emulsão, por outro lado, começa com uma taxa de acúmulo de DP menor na primeira fase, mas essa taxa aumenta na segunda fase. No entanto, a deformação inicial do solo estabilizado é maior em comparação ao solo controle, sugerindo uma pior resistência inicial, embora a taxa de acúmulo de DP se torne de certa forma similar na segunda fase. Estes dados podem ser visualizados na Figura 144.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1373	-0,8473	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0477	-0,7376	0,993
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,0585	-0,7713	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,0843	-0,8471	0,993

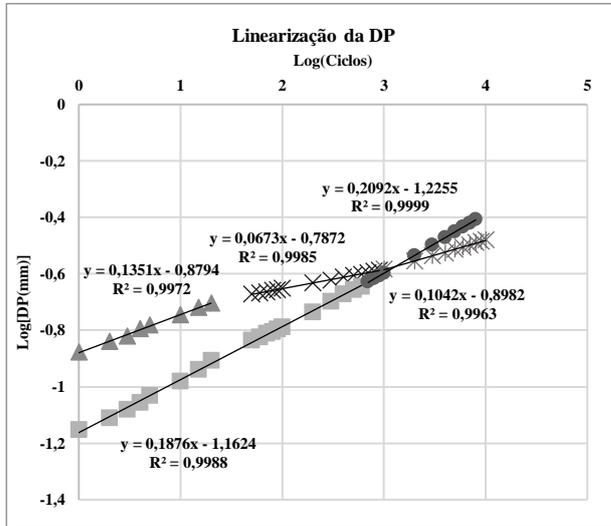
Figura 144: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre nos ciclos 20 e 1000 para o solo controle e no ciclo 600 para o solo estabilizado. O comportamento de deformação permanente (DP) do solo controle na primeira fase, apresenta um coeficiente angular de 0,1351, indicando uma taxa de variação moderada da DP em função dos ciclos. O coeficiente linear de:0,8794 sugere uma DP inicial mais elevada. Na segunda fase o coeficiente angular diminui para 0,0673, mostrando uma desaceleração da taxa de variação da DP. Na terceira fase o coeficiente angular volta a aumentar para 0,1042, sugerindo uma nova aceleração na taxa de variação da DP.

Já o solo estabilizado o coeficiente angular de 0,1876 indica uma taxa de variação mais acentuada da DP em comparação ao solo controle, e o coeficiente linear de:1,1624 sugere uma DP inicial sensivelmente menor do que o solo controle. Na segunda fase o coeficiente angular aumenta ainda mais para 0,2092, indicando que o solo estabilizado acumula DP de forma mais rápida à medida que os ciclos avançam.

O Solo Controle apresenta uma taxa de variação da DP que oscila ao longo das fases, com uma desaceleração significativa na segunda fase, seguida por uma nova aceleração na terceira fase. Em contraste, o Solo Estabilizado com 0,5% de emulsão acumula DP de forma

mais rápida e consistente em todas as fases, o que é evidenciado pelos coeficientes angulares mais elevados, de forma mais expressiva ao se comparar a segunda fase. Embora o solo estabilizado tenha uma maior resistência inicial (coeficiente linear mais negativo), este perde essa vantagem com o acúmulo de ciclos, resultando em uma taxa de deformação mais acentuada, conforme pode ser analisado no gráfico da Figura 145.



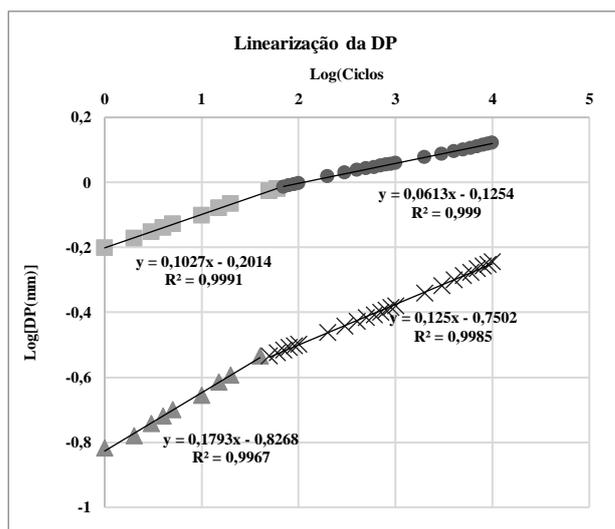
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1351	-0,08794	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0673	-0,7872	0,998
Solo Controle (Terceira Fase)	✱	0,1042	-0,8982	0,996
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,1876	-1,1624	0,999
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,2092	-1,2255	0,999

Figura 145: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 40 para o solo controle e no ciclo 70 para o solo estabilizado. O solo controle apresenta, na primeira fase, um coeficiente angular de 0,1793, o que indica uma taxa de variação relativamente alta da deformação permanente (DP) ao longo dos ciclos. O coeficiente linear de:0,8268 sugere uma DP inicial muito mais baixa em comparação com o solo estabilizado. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,125, sugerindo uma desaceleração na taxa de variação da DP.

Para o solo estabilizado com 0,5% de emulsão, o coeficiente angular na primeira fase é de 0,1027, indicando uma resposta mais moderada em relação ao solo controle. O coeficiente linear de:0,2014 indica que o solo estabilizado tem uma DP inicial significativamente maior. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,0613, indicando que o solo estabilizado acumula DP de forma mais suave à medida que os ciclos avançam.

O solo controle apresenta uma taxa de variação da DP mais alta na primeira fase, com uma desaceleração na segunda fase, enquanto o solo estabilizado com 0,5% de emulsão tem uma DP inicial muito maior e acumula DP de forma um pouco mais lenta e estável ao longo dos ciclos, conforme indicado na Figura 146.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1793	-0,8268	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,125	-0,7502	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,1027	-0,2014	0,999
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,0613	-0,1254	0,999

Figura 146: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 0,5% de emulsão (ciclo 5)

Embora o Solo Estabilizado com 0,5% de emulsão apresente uma DP inicial menor em algumas fases iniciais, sua taxa de acúmulo de deformação aumenta ao longo dos ciclos, superando o solo controle em termos de suscetibilidade à deformação plástica. O solo controle, por sua vez, mostra uma tendência mais estável e previsível de acumulação de DP, especialmente em ciclos mais avançados. Portanto, o solo estabilizado parece perder sua vantagem inicial de resistência à medida que os ciclos de carregamento aumentam, resultando em um comportamento menos favorável a longo prazo.

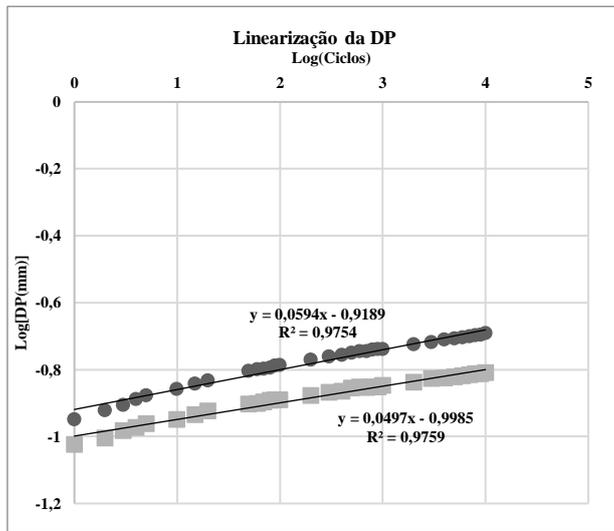
### 5.7.9 Solo 2 x Solo 2 + 1% emulsão

No Ciclo 1, ao comparar o solo controle com o solo 2 estabilizado com 1% de emulsão, observa-se que o solo estabilizado apresenta uma taxa de acúmulo de deformação permanente (DP) ligeiramente maior ao longo dos ciclos. Isso é evidenciado pelo coeficiente angular de 0,0594 para o solo estabilizado, que é superior ao coeficiente angular de 0,0497 do solo controle, indicando que a DP no solo estabilizado cresce de forma mais rápida em comparação com o solo controle.

O coeficiente linear, que reflete a DP inicial, é mais negativo para o solo controle (-0,9985) do que para o solo estabilizado (-0,9189). Isso sugere que o solo controle começa com uma DP inicial menor, ou seja, apresenta maior resistência à deformação no início do carregamento, mas acumula DP de forma mais estável ao longo dos ciclos.

Portanto, o solo estabilizado com 1% de emulsão, além de possuir uma DP inicial mais elevada, demonstra uma taxa de variação de DP maior ao longo dos ciclos, indicando que

acumula deformação de maneira mais rápida em comparação ao Solo Controle. Esta diferença no comportamento pode ser visualizada no gráfico da Figura 147.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0497	-0,9985	0,976
Solo 2 + 1%RL	●	0,05947	-0,189	0,975

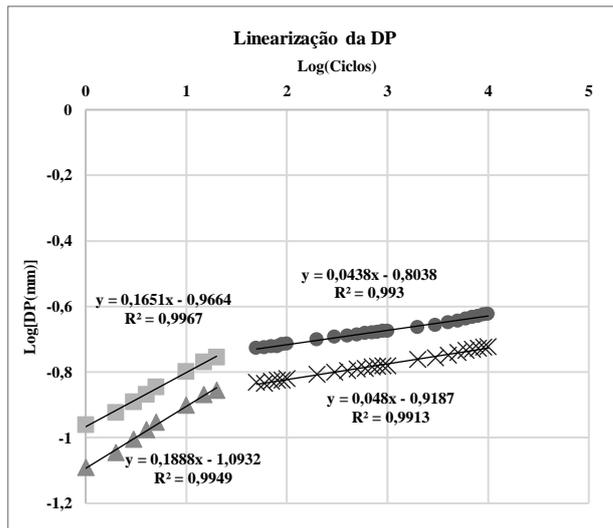
Figura 147: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 1)

No Ciclo 2, tanto o solo controle quanto o solo estabilizado com 1% de emulsão apresentam uma mudança de fase em seu comportamento de deformação permanente (DP) no ciclo 20.

Na primeira fase do solo controle, o coeficiente angular é de 0,1888, enquanto o coeficiente linear de:1,0932 reflete uma DP inicial mais baixa. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,048, mostrando uma desaceleração significativa na taxa de variação da DP.

Para o solo estabilizado, o coeficiente angular na primeira fase é de 0,1651, indicando uma resposta também acentuada, mas ligeiramente menor em comparação ao solo controle. O coeficiente linear de:0,9664 sugere que a DP inicial do solo estabilizado é maior do que a do solo controle. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui significativamente para 0,0438, indicando uma desaceleração ainda maior na taxa de variação da DP em comparação ao solo controle.

O solo controle acumula DP de forma mais rápida na primeira fase, mas desacelera de forma mais expressiva na segunda fase. Já o solo estabilizado com 1% de emulsão também desacelera significativamente a taxa de variação da DP na segunda fase, porém sua DP inicial é maior, resultando em um acúmulo de deformação mais pronunciado em comparação ao solo controle. Isso indica que, apesar da estabilização melhorar o desempenho inicial, o acúmulo de DP ao longo dos ciclos continua a ser mais significativo no solo estabilizado, conforme indicado no gráfico da Figura 148.



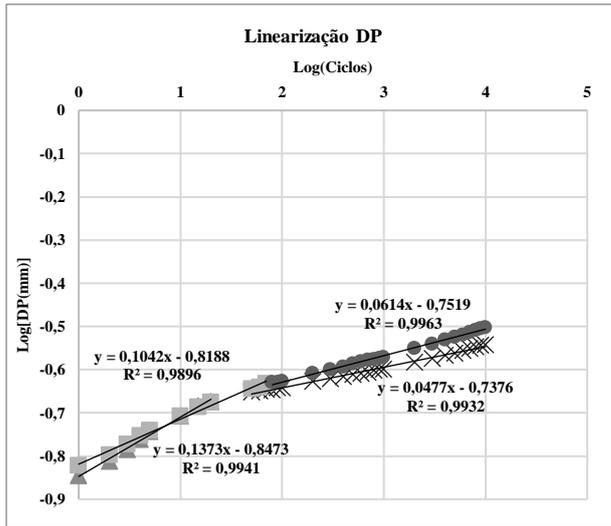
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1888	-1,0932	0,995
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,048	-0,9187	0,991
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,1651	-0,9664	0,997
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,0438	-0,8038	0,997

Figura 148: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e no ciclo 80 para o solo estabilizado. Na primeira fase do solo controle, o coeficiente angular é de 0,1373, o que indica uma taxa acúmulo de deformação de forma mais acelerada. O coeficiente linear de:0,8473 sugere que o solo controle inicia o ciclo com uma DP um pouco mais baixa.

No caso do solo estabilizado com 1% de emulsão, o coeficiente angular na primeira fase é de 0,1042, o que indica uma taxa de acúmulo de DP um pouco mais lenta em comparação ao solo controle. O coeficiente linear de:0,8188 reflete uma DP inicial maior.

Embora o solo controle apresenta uma taxa de acúmulo de DP maior na primeira fase, além de apresentar uma melhor resistência inicial à deformação, como evidenciado pelo coeficiente linear mais negativo. O solo estabilizado acumula DP de forma mais lenta ao longo dos primeiros ciclos, perdendo essa característica na segunda fase., o que pode ser visualizado no gráfico da Figura 105.



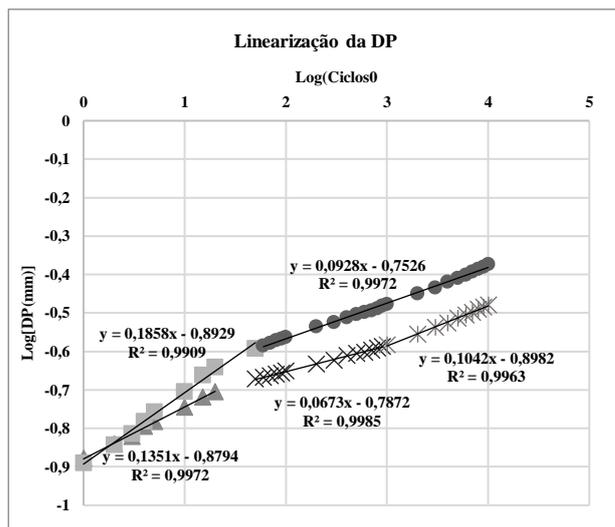
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R²
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1373	-0,8473	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0477	-0,7376	0,993
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,1042	-0,8188	0,989
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,0843	-0,8471	0,996

Figura 149: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre nos ciclos 20 e 1000 para o solo controle e no ciclo 50 para o solo estabilizado. Para o solo controle, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,1351, indicando uma taxa de variação moderada da DP ao longo dos ciclos. O coeficiente linear de:0,8794 sugere uma DP inicial mais baixa, o que reflete uma resistência moderada do solo à deformação inicial. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,0673, indicando uma desaceleração no acúmulo de DP. Já na terceira fase, o coeficiente angular aumenta novamente para 0,1042, sugerindo uma nova aceleração na taxa de variação da DP.

Para o Solo Estabilizado com 1% de emulsão, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,1858, o que indica uma taxa de acúmulo de DP mais elevada em comparação com o solo controle, sugerindo que o solo estabilizado acumula deformação de maneira mais rápida. O coeficiente linear de:0,8929 sugere uma DP inicial um pouco maior. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,0928, mostrando uma leve desaceleração na taxa de acúmulo de DP ao longo dos ciclos, mas ainda assim superior ao solo controle.

O solo controle apresenta uma variação mais estável ao longo das fases, com uma desaceleração significativa no acúmulo de DP na segunda fase e uma nova aceleração na terceira fase. O Solo Estabilizado com 1% de emulsão, por outro lado, acumula deformação de maneira mais rápida na primeira fase, mas desacelera de forma mais controlada na segunda fase. Isso indica que o solo estabilizado tem uma maior taxa de acúmulo de DP inicialmente, mas com uma resistência relativamente menor ao longo dos ciclos quando comparado ao solo controle



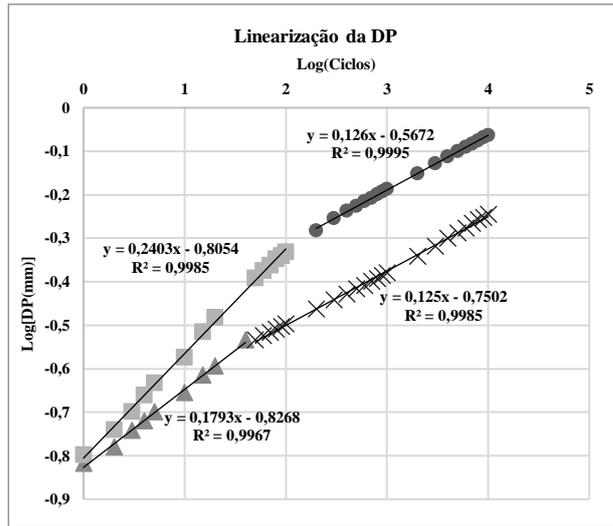
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1351	-0,08794	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0673	-0,7872	0,998
Solo Controle (Terceira Fase)	*	0,1042	-0,8982	0,996
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1858	-0,8929	0,999
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0928	-0,7526	0,999

Figura 150: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 50 para o solo controle e no ciclo 1000 para o solo estabilizado. Para o solo controle na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,1793, indicando uma taxa de variação moderada da DP ao longo dos ciclos. O coeficiente linear de:0,8268 reflete uma DP inicial um pouco mais baixa, sugerindo uma resistência inicial significativa à deformação. Na segunda fase, o coeficiente angular é de 0,125, o que sugere uma desaceleração na taxa de acúmulo de DP ao longo dos ciclos.

Para o solo estabilizado com 1% de emulsão, na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,2403, indicando uma taxa de acúmulo de DP mais rápida do que no solo controle. O coeficiente linear de:0,8054 indica uma DP inicial maior que a do solo controle, sugerindo uma resistência inicial ligeiramente pior com uma tendência maior ao acúmulo de DP ao longo do tempo. Na segunda fase, o coeficiente angular é de 0,126, muito próximo do coeficiente do solo controle, indicando uma taxa de acúmulo de DP mais estabilizada e uma desaceleração no comportamento do solo estabilizado.

O solo controle apresenta uma variação mais estável e previsível da DP, com uma desaceleração ao longo das fases, enquanto o solo estabilizado com 1% de emulsão acumula DP de maneira mais rápida inicialmente, mas desacelera na segunda fase, alcançando um comportamento semelhante ao solo controle. Isso sugere que o solo estabilizado com emulsão tem uma resistência inicial um pouco menor, apresentando uma taxa de acúmulo de deformação mais pronunciada durante os ciclos, conforme pode ser analisado no gráfico da Figura 151.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R²
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1793	-0,8268	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,125	-0,7502	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2403	-0,8054	0,998
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,126	-0,5672	0,999

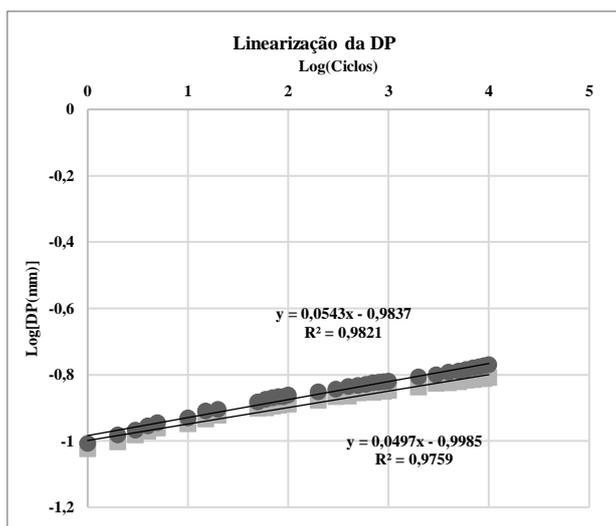
Figura 151: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1% de emulsão (ciclo 5)

### 5.7.10 Solo 2 x Solo 2 + 1,5% emulsão

A análise da linearização da deformação permanente (DP) no Ciclo 1 para o solo controle e o solo estabilizado com 1,5% de emulsão. Para o solo controle, o coeficiente angular é de 0,0497, indicando uma taxa de variação moderada da DP ao longo dos ciclos. O coeficiente linear de:0,9985 reflete uma DP inicial levemente mais baixa.

Para o Solo estabilizado com 1,5% de RL, o coeficiente angular é de 0,0543, o que indica uma taxa de variação um pouco mais rápida da DP ao longo dos ciclos em comparação com o solo controle. O coeficiente linear de:0,9837 sugere uma DP inicial um pouco maior que a do solo controle, indicando uma leve melhora na resistência inicial à deformação.

O solo controle apresenta uma DP inicial mais baixa, acumulando deformação a uma taxa um pouco mais lenta ao longo dos ciclos. O solo estabilizado com 1,5% de emulsão tem uma DP inicial levemente maior, acumulando deformação a uma taxa ligeiramente mais rápida, conforme pode ser conferido no gráfico da Figura 152.



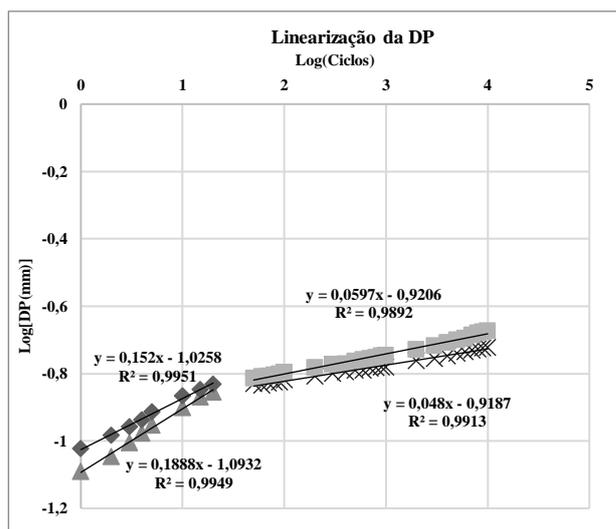
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0497	-0,9985	0,976
Solo 2 + 1,5%RL	●	0,0543	-0,9837	0,982

Figura 152: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 1)

A análise do Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e o solo estabilizado. Para o Solo Controle (Primeira Fase), o coeficiente angular é de 0,1888, indicando uma taxa relativamente alta de variação da DP. O coeficiente linear de:1,0932 sugere uma menor deformação plástica inicial. Já na Segunda Fase, o coeficiente angular cai para 0,048, o que indica uma desaceleração significativa na taxa de variação da DP, refletindo um comportamento mais estável à medida que os ciclos se acumulam.

Para o Solo Estabilizado com 1,5% de emulsão (Primeira Fase), o coeficiente angular é de 0,1520, um valor ligeiramente menor que o do solo controle, o que indica uma taxa de variação da DP um pouco mais moderada. O coeficiente linear de:1,0258 sugere uma deformação plástica inicial maior que a do solo controle. Na Segunda Fase, o coeficiente angular tem uma variação negativa para 0,0597.

O Solo Controle mostra uma maior desaceleração na taxa de acumulação de DP na segunda fase. Essa análise sugere que, enquanto o solo controle mantém um desempenho mais constante, o solo estabilizado tem uma melhor resistência inicial, mas perde essa vantagem à medida que os ciclos aumentam, como pode ser observado no gráfico da Figura 153.



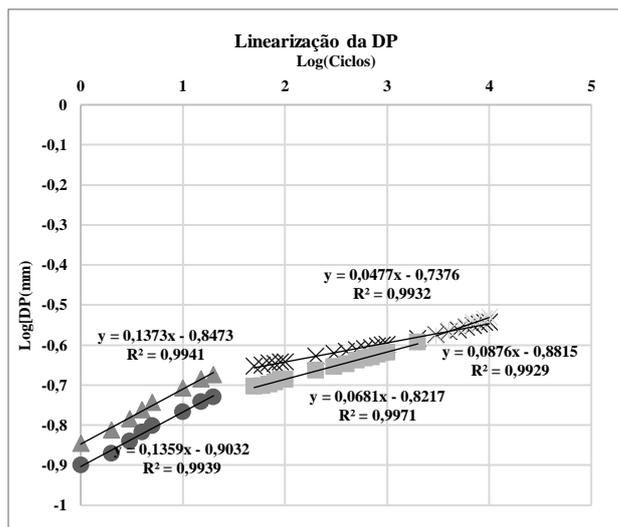
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1888	-1,0932	0,995
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,048	-0,9187	0,991
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,152	-1,0258	0,995
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,0597	-0,9206	0,989

Figura 153: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 2)

No Ciclo 3 a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 2000 para o solo estabilizado. Para o Solo Controle (Primeira Fase), o coeficiente angular é de 0,1373, o que indica uma taxa moderada de variação da DP ao longo dos ciclos. O coeficiente linear de:0,8473 sugere uma deformação plástica inicial um pouco maior em comparação com o solo estabilizado. Na Segunda Fase, o coeficiente angular cai para 0,0477, mostrando uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP ao longo dos ciclos, sugerindo um comportamento mais estável.

Para o Solo Estabilizado com 1,5% de emulsão (Primeira Fase), o coeficiente angular é de 0,1359, um valor semelhante ao do solo controle, indicando uma taxa de variação da DP igualmente moderada. O coeficiente linear de:0,9032 sugere uma menor DP inicial em comparação ao solo controle. Na Segunda Fase, o coeficiente angular diminui para 0,0681, indicando uma desaceleração na taxa de acumulação de DP. Já na Terceira Fase, o coeficiente angular aumenta para 0,0876, evidenciando uma progressiva aceleração na taxa de variação da DP à medida que os ciclos avançam.

No Solo Controle, há uma desaceleração na taxa de acumulação de DP ao longo das fases, especialmente na segunda fase, com um comportamento mais estável em termos de deformação ao longo dos ciclos. Em contrapartida, o Solo Estabilizado com 1,5% de emulsão apresenta uma tendência de aceleração na taxa de acumulação de DP conforme os ciclos aumentam na última fase. Isso sugere que, apesar da melhor resistência inicial (coeficiente linear mais negativo), o solo estabilizado tende a acumular DP de maneira mais acelerada nas fases posteriores. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 154.



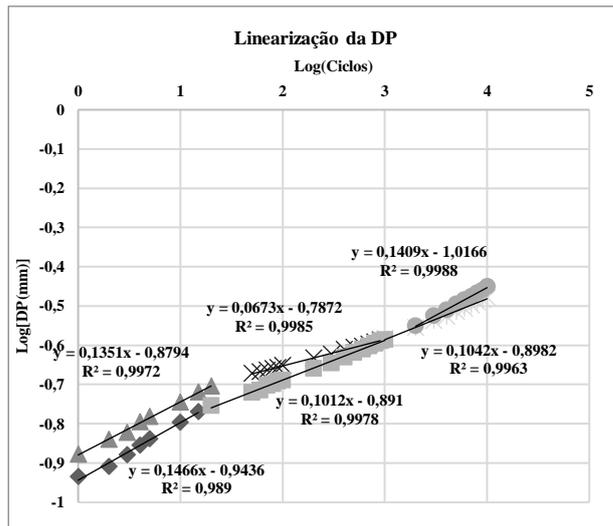
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1373	-0,8473	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0477	-0,7376	0,993
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1359	-0,9032	0,994
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0681	-0,8471	0,996
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	✱	0,0876	-0,8815	0,993

Figura 154: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 3)

Na análise do Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre nos ciclos 20 e 3000 para o solo controle e nos ciclos 15 e 3000 para o solo estabilizado. Para o solo controle, o coeficiente angular na primeira fase é de 0,1351, indicando uma taxa moderada de variação da DP. O coeficiente linear de:0,8794 indica que o solo controle apresenta uma deformação plástica inicial mais elevada do que o solo estabilizado. Conforme o solo avança para a segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,0673, mostrando uma desaceleração na taxa de variação da DP. Já na terceira fase, o coeficiente angular sobe para 0,1042, o que indica uma retomada na acumulação de DP, um pouco menor que a primeira fase.

Para o solo estabilizado com 1,5% de emulsão, o coeficiente angular na primeira fase é de 0,1466, sugerindo uma taxa de variação um pouco mais acentuada da DP em comparação ao solo controle. O coeficiente linear de:0,9436 sugere uma deformação inicial menor. À medida que o solo estabilizado avança para a segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,1012, e na terceira fase, sobe para 0,1409, indicando uma aceleração da taxa de variação da DP nas fases subsequentes.

O solo estabilizado com 1,5% de emulsão apresenta uma melhor resistência inicial, com uma DP inicial mais baixa (coeficiente linear mais negativo), mas ao longo dos ciclos, a taxa de acumulação de DP se intensifica, conforme evidenciado pelos coeficientes angulares crescentes nas fases subsequentes. Em contrapartida, o solo controle, apesar de ter uma maior DP inicial, mostra uma desaceleração mais acentuada ao longo dos ciclos, especialmente na segunda fase, antes de retomar o acúmulo de DP. Isso pode ser observado claramente na Figura 155.



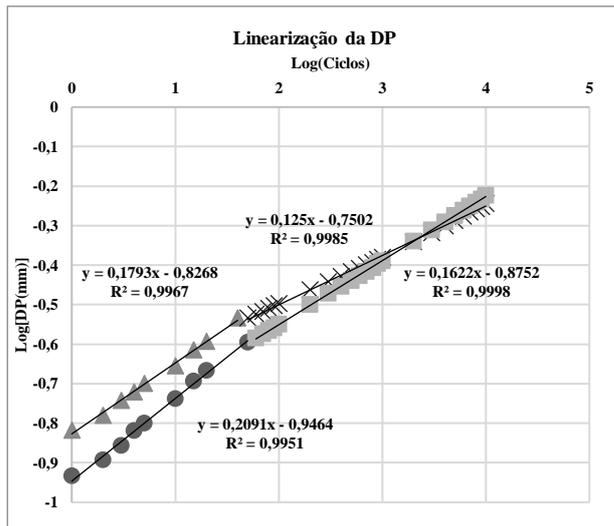
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R²
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1351	-0,08794	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0673	-0,7872	0,998
Solo Controle (Terceira Fase)	*	0,1042	-0,8982	0,996
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	◆	0,1466	-0,9436	0,989
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,1012	-0,891	0,998
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	●	0,1409	-1,0166	0,999

Figura 155: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular tanto para o solo controle quanto para o solo estabilizado acontece no ciclo 50. O solo controle, na primeira fase, apresenta um coeficiente angular de 0,1793. O coeficiente linear de:0,8268 demonstra uma DP inicial maior em comparação ao solo estabilizado. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,125, indicando uma desaceleração no acúmulo da DP com o aumento dos ciclos.

O solo estabilizado com 1,5% de emulsão, na primeira fase, exibe um coeficiente angular mais alto, de 0,2091, sugerindo uma taxa de acúmulo de DP mais acentuada. O coeficiente linear de:0,9464 mostra que, o solo estabilizado tem uma DP inicial mais baixa em relação ao solo controle. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,1622, revelando uma desaceleração, mas ainda com uma taxa de acúmulo de DP mais rápida do que a do solo controle.

O solo estabilizado com 1,5% de emulsão tem uma deformação plástica inicial mais baixa, o que é benéfico, mas acumula DP a uma taxa mais elevada ao longo dos ciclos, especialmente na primeira fase. No entanto, essa taxa diminui na segunda fase, ainda que de forma menos acentuada do que no solo controle. O solo controle, por sua vez, apresenta uma maior estabilidade na taxa de variação da DP nas duas fases. Estas informações podem ser observadas no gráfico da Figura 156.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1793	-0,8268	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,125	-0,7502	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	■	0,2091	-0,9464	0,995
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,1622	-0,8752	0,999

Figura 156: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 1,5% de emulsão (ciclo 5)

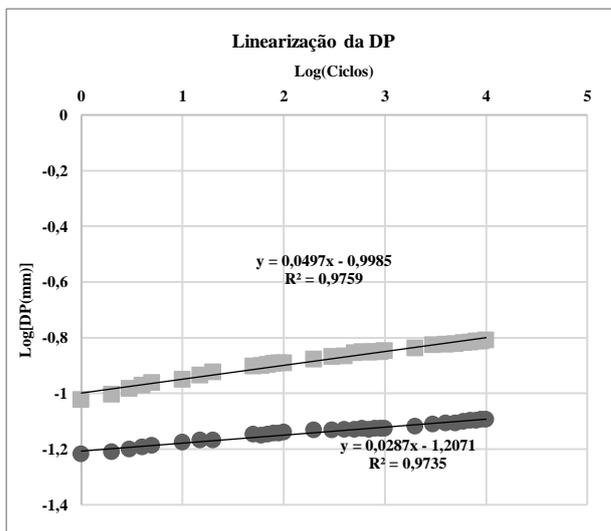
A análise dos dados sugere que o solo estabilizado com 1,5% de emulsão apresenta uma resistência inicial à deformação permanente (DP) superior em comparação ao solo controle. Nos primeiros ciclos de carga, o solo estabilizado mostra uma menor deformação plástica inicial, indicada pelos coeficientes lineares mais negativos, o que reflete um melhor comportamento na fase inicial de carregamento. Isso significa que, em termos de resistência imediata à deformação, o solo com emulsão é mais eficiente, sendo capaz de suportar cargas com menor acúmulo de deformação nas fases iniciais. No entanto, conforme os ciclos aumentam, o solo estabilizado começa a acumular DP a uma taxa mais elevada, sugerindo que, embora tenha um bom desempenho inicial, a sua resistência se deteriora mais rapidamente.

Em contrapartida, o solo controle, apesar de apresentar uma DP inicial maior, demonstra uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de deformação ao longo dos ciclos. Isso indica que o solo controle tem um comportamento mais estável e previsível em situações de carga prolongada. Assim, embora o solo controle inicialmente acumule mais DP, sua deformação se estabiliza com o tempo.

### 5.7.11 Solo 2 x Solo 2 + 30% de fresado

A comparação entre o solo controle e o solo estabilizado com 30% de fresado revela diferenças significativas em termos de deformação permanente (DP). O solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,0497, o que indica uma taxa de acumulação de DP mais rápida ao longo dos ciclos. Isso sugere que, sem a adição de fresado, o solo acumula deformação de forma mais acelerada quando submetido a ciclos repetidos de carga.

Por outro lado, o solo estabilizado com 30% de fresado tem um coeficiente angular menor, de 0,0287, mostrando uma taxa de acumulação de DP mais lenta. Além disso, o coeficiente linear do solo com fresado é mais negativo (-1,2071), o que indica uma DP inicial menor. Assim, a adição de 30% de fresado ao solo melhora sua resistência inicial à deformação e retarda o acúmulo de DP ao longo dos ciclos, sugerindo um desempenho superior em termos de durabilidade e resistência a longo prazo, conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 157.



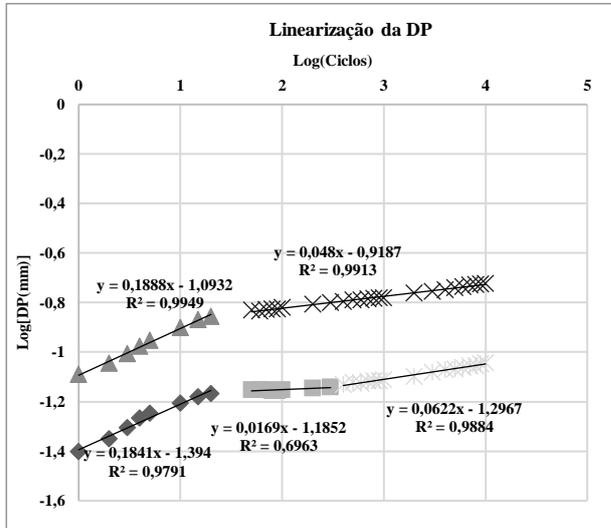
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R²
Solo Controle	■	0,0497	-0,9985	0,976
Solo 2 + 30% FRSD	●	0,0287	-1,2071	0,973

Figura 157: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 1)

No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre nos ciclos 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 400 para o solo estabilizado. O solo controle apresenta uma taxa de acumulação de deformação permanente (DP) relativamente alta, com um coeficiente angular de 0,1888 na primeira fase e uma desaceleração significativa na segunda fase, onde o coeficiente angular cai para 0,048. Apesar dessa desaceleração, o solo controle acumula DP em valores absolutos maiores ao longo dos ciclos. O coeficiente linear de: 1,0932 indica uma DP inicial relativamente elevada, sugerindo que o solo controle tem uma menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Mesmo com a desaceleração da DP nas fases subsequentes, o solo controle continua acumulando deformação em níveis maiores.

O solo estabilizado com 30% de fresado demonstra um desempenho significativamente superior ao solo controle. Com um coeficiente linear mais negativo (-1,394) na primeira fase, este apresenta uma DP inicial muito menor, o que indica uma maior resistência à deformação nos primeiros ciclos. Ao longo dos ciclos, o solo estabilizado acumula DP de forma mais lenta, com coeficientes angulares menores, como evidenciado na segunda fase (coeficiente angular de 0,0169). Mesmo na terceira fase, onde ocorre uma leve aceleração da taxa de acumulação de

DP (coeficiente angular de 0,0622), os valores absolutos de DP permanecem inferiores aos do solo controle. Esse comportamento sugere que a adição de fresado não só melhora a resistência inicial, mas também reduz a deformação acumulada ao longo do tempo, tornando o solo estabilizado uma opção mais eficiente e durável em termos de resistência à DP, conforme gráfico da Figura 158.



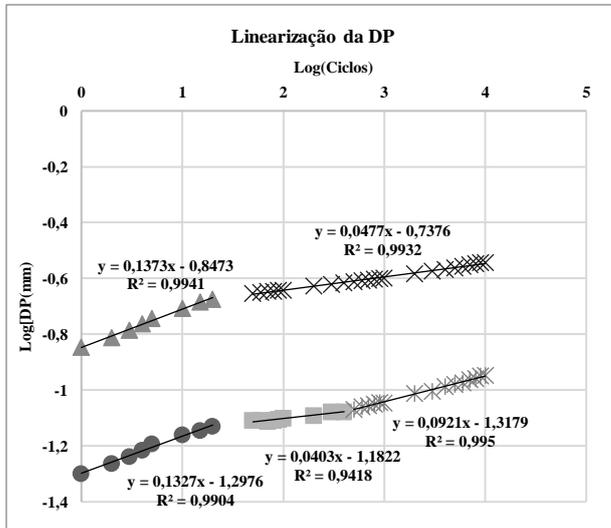
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1888	-1,0932	0,995
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,048	-0,9187	0,991
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1841	-1,394	0,979
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0169	-1,1852	0,696
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	*	0,0622	-1,2967	0,988

Figura 158: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 400 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1373, indicando uma taxa moderada de acumulação de deformação permanente (DP). O coeficiente linear de:0,8473 reflete uma DP inicial mais elevada, o que sugere que o solo controle tem uma resistência inicial menor, acumulando mais deformação logo nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o solo controle desacelera a acumulação de DP, com o coeficiente angular reduzido para 0,0477, indicando que, embora a DP continue a se acumular, o ritmo é mais lento.

O solo estabilizado com 30% de fresado, na primeira fase, apresenta um coeficiente angular de 0,1327, muito próximo ao do solo controle. Contudo, o coeficiente linear de:1,2976, sendo mais negativo, indica uma DP inicial significativamente menor, o que sugere uma maior resistência à deformação desde o início. Na segunda fase, o solo estabilizado desacelera ainda mais a taxa de acumulação de DP, com um coeficiente angular de 0,0403, mostrando um comportamento mais estável em comparação ao solo controle. Mesmo na terceira fase, onde o coeficiente angular sobe para 0,0921, a taxa de acumulação de DP permanece controlada, com valores de DP absolutos inferiores ao solo controle.

O solo estabilizado com 30% de fresado continua apresentando uma maior resistência à deformação permanente em comparação ao solo controle, acumulando menos DP ao longo dos ciclos. A estabilização com fresado reduz significativamente a DP inicial e mantém a taxa de acumulação de DP mais baixa, mesmo com uma leve aceleração nas fases posteriores. Isso confirma que o solo estabilizado oferece um desempenho superior em termos de resistência, de acordo com os dados do gráfico da Figura 159.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1373	-0,8473	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0477	-0,7376	0,993
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	*	0,1327	-1,2976	0,990
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0403	-1,1822	0,942
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	●	0,0921	-1,3179	0,995

Figura 159: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre nos ciclos 20 e 1000 para o solo controle e nos ciclos 20 e 1000 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle exibe um coeficiente angular de 0,1351, o que indica uma taxa moderada de acumulação de DP. Na segunda fase, essa taxa desacelera para 0,0673, mostrando que a deformação está ocorrendo de forma mais lenta conforme os ciclos avançam. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta para 0,1042, sugerindo uma retomada no ritmo de acumulação de DP. Isso indica que, após a desaceleração na segunda fase, o solo controle volta a acumular DP de forma mais acelerada nos ciclos subsequentes.

O solo estabilizado, na primeira fase, apresenta um coeficiente angular de 0,1592, o que indica uma taxa de acumulação de DP ligeiramente superior à do solo controle no início. No entanto, na segunda fase, o solo estabilizado desacelera consideravelmente, com um coeficiente angular de 0,0867, demonstrando uma taxa de acumulação de DP mais lenta que a do solo controle nessa fase. Na terceira fase, há uma leve aceleração, com o coeficiente angular subindo para 0,1418, mas os valores absolutos de DP permanecem menores quando comparados ao solo controle.

O solo estabilizado com 30% de fresado tem um comportamento semelhante ao solo controle no início, mas apresenta uma desaceleração mais significativa na taxa de acumulação de DP ao longo dos ciclos e valores absolutos de acumulo de DP bastante inferiores ao do solo controle. Mesmo com uma leve aceleração na fase final, o solo estabilizado mantém uma menor taxa de deformação acumulada em comparação ao solo controle. Isso indica que o fresado contribui para uma maior resistência à deformação, com o solo estabilizado acumulando DP de forma mais controlada ao longo do tempo, conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 160.

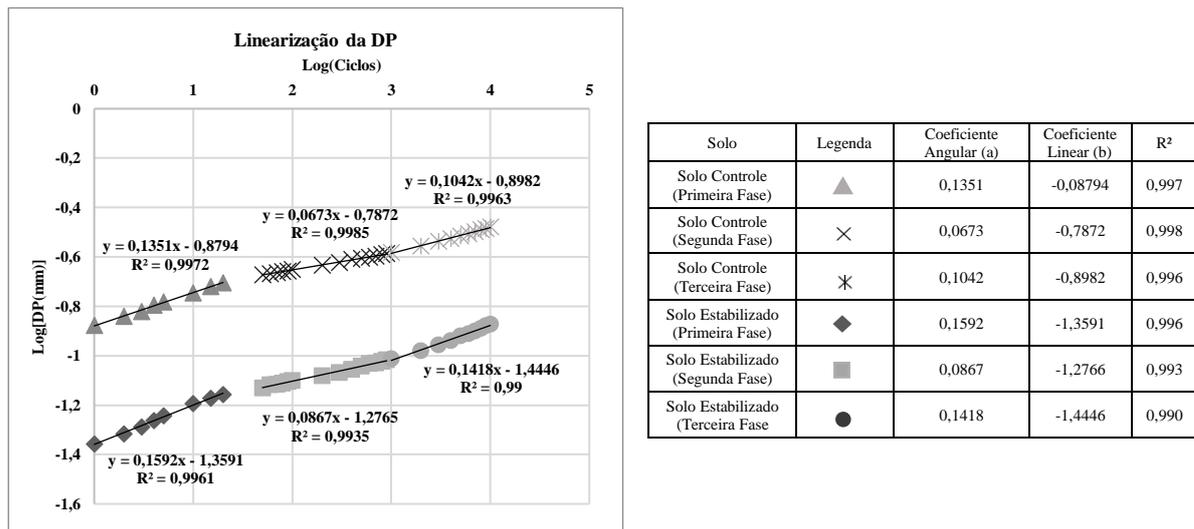


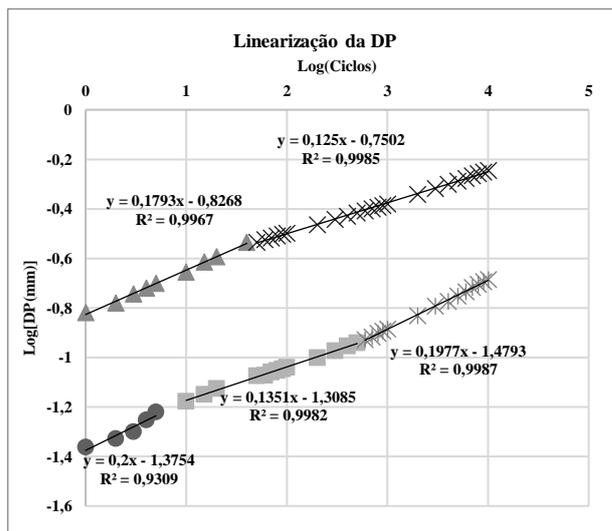
Figura 160: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 50 para o solo controle e nos ciclos 5 e 600 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1793, indicando uma taxa de acumulação de DP relativamente alta, o que é reforçado pelo valor do coeficiente linear de:0,8268. Isso demonstra que o solo controle tem uma resistência inicial à DP menor. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,125, refletindo uma desaceleração na taxa de deformação, embora o solo continue a acumular DP de forma significativa.

O solo estabilizado com 30% de fresado, na primeira fase, apresenta um coeficiente angular de 0,2, o que indica uma taxa inicial de acumulação de DP um pouco mais elevada que a do solo controle. No entanto, o coeficiente linear de:1,3754 reflete uma menor DP inicial, sugerindo uma melhor resistência à deformação desde o início. Na segunda fase, o coeficiente angular de 0,1351 mostra uma desaceleração moderada na taxa de acumulação de DP, ainda mais controlada do que no solo controle. Na terceira fase, o coeficiente angular de 0,1977 indica

uma leve aceleração na taxa de acumulação de DP, porém os valores de DP ainda permanecem menores que os do solo controle.

Embora o solo estabilizado com 30% de fresado apresente uma taxa de acumulação de DP ligeiramente maior na fase inicial, seus valores absolutos de DP são consistentemente menores em comparação ao solo controle, conforme indicado pelo coeficiente linear mais negativo. O solo estabilizado demonstra uma desaceleração mais eficaz na acumulação de DP ao longo dos ciclos e, mesmo com uma leve aceleração na última fase, ainda apresenta um desempenho superior em termos de resistência à deformação permanente quando comparado ao solo controle, conforme pode ser conferido no gráfico da Figura 161.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1793	-0,8268	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,125	-0,7502	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,2	-1,3754	0,931
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,1351	-1,3085	0,998
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	*	0,1977	-1,4793	0,999

Figura 161: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado (ciclo 5)

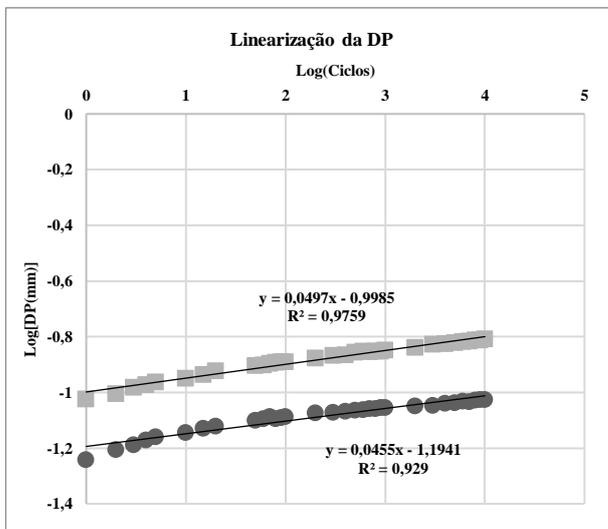
No geral, o solo estabilizado com fresado apresenta menores valores de DP inicial, o que é evidenciado pelos coeficientes lineares mais negativos em todos os ciclos analisados. Além disso, a taxa de acumulação de DP, representada pelos coeficientes angulares, tende a ser mais lenta no solo estabilizado ao longo dos ciclos, indicando uma menor deformação acumulada.

O solo controle, por outro lado, acumula DP de maneira mais acelerada, especialmente nas primeiras fases dos ciclos. Mesmo quando há desaceleração na acumulação de DP nas fases subsequentes, os valores absolutos de DP ainda são maiores do que no solo estabilizado. Isso sugere que o solo controle tem uma menor capacidade de resistência à deformação ao longo do tempo, enquanto o solo estabilizado com 30% de fresado mantém uma performance mais estável e eficaz, com uma menor taxa de deformação acumulada.

### 5.7.12 Solo 2 x Solo 2 + 30% de fresado + 1% emulsão

O solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,0497. O coeficiente linear de:0,9985 reflete uma DP inicial mais alta, o que sugere que o solo controle tem uma menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Ao longo dos ciclos, a DP continua a se acumular de forma consistente, resultando em uma maior deformação em relação ao solo estabilizado.

O solo estabilizado, com a adição de 30% de fresado e 1% de emulsão, apresenta um coeficiente angular de 0,0455, um pouco menor que o do solo controle. Isso indica uma taxa de acumulação de DP mais lenta ao longo dos ciclos. Além disso, o coeficiente linear de:1,1941, mais negativo em comparação ao solo controle, sugere uma DP inicial significativamente menor. Isso demonstra que o composto com fresado e emulsão oferece maior resistência à deformação logo nos primeiros ciclos e, ao longo do tempo, acumula menos DP, conforme pode ser visto na Figura 162.



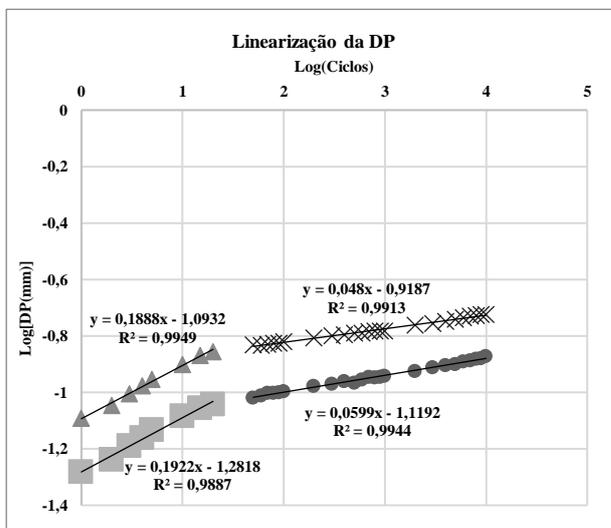
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0497	-0,9985	0,976
Solo 1 + 30%FSD + 2%RL	●	0,0455	-1,1941	0,929

Figura 162: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 1)

No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para ambos os solos. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1888. O coeficiente linear de:1,0932 reflete uma DP inicial consideravelmente maior, sugerindo que o solo controle tem uma menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,048, o que indica uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP, embora o solo controle continue a acumular deformação em valores absolutos maiores que o solo estabilizado.

O solo estabilizado apresenta um coeficiente angular de 0,1922 na primeira fase, o que é ligeiramente superior ao do solo controle, indicando uma taxa de acumulação de DP inicial um pouco maior. No entanto, o coeficiente linear de:1,2818, mais negativo, sugere que o solo estabilizado tem uma DP inicial muito menor, o que reflete maior resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,0599, demonstrando uma desaceleração na taxa de acumulação de DP, o que resulta em uma deformação acumulada menor ao longo dos ciclos quando comparado ao solo controle.

O solo estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão, apesar de apresentar uma taxa inicial de acumulação de DP ligeiramente maior na primeira fase, demonstra uma resistência inicial superior, com menor DP inicial. Ao longo dos ciclos, o solo estabilizado acumula DP a uma taxa mais lenta em comparação ao solo controle, conforme evidenciado pela desaceleração na segunda fase. O uso de fresado e emulsão melhora significativamente o comportamento do solo, conforme pode ser analisado no gráfico da Figura 163.



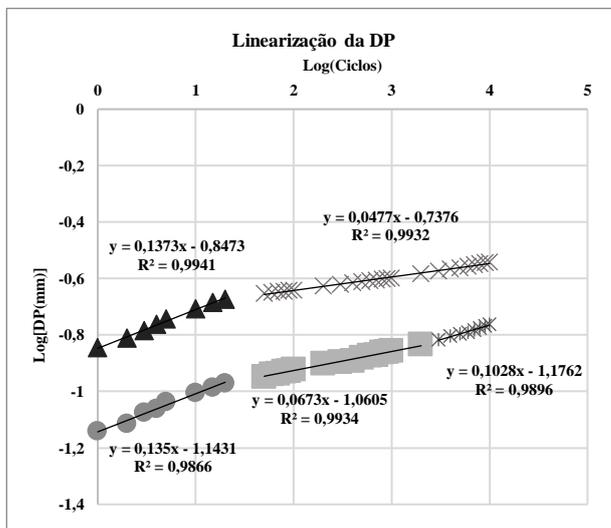
Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1888	-1,0932	0,995
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,048	-0,9187	0,991
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1922	-1,2818	0,988
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0599	-1,1192	0,994

Figura 163: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 20 e 2000 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1373. O coeficiente linear de:1,8473 reflete uma DP inicial relativamente alta, sugerindo uma menor resistência à deformação desde os primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular de 0,0477 demonstra uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP, mostrando que a deformação continua, mas de maneira mais controlada. Mesmo com essa desaceleração, o solo controle acumula DP em valores maiores em comparação ao solo estabilizado.

O solo estabilizado apresenta um coeficiente angular de 0,135 na primeira fase, indicando uma taxa de acumulação de DP muito próxima à do solo controle. No entanto, o coeficiente linear de:1,1431, mais negativo, sugere que a DP inicial do solo estabilizado é significativamente menor, o que reflete uma maior resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,0673, indicando uma desaceleração na taxa de acumulação de DP, o que resulta em uma menor acumulação de deformação ao longo do tempo. Na fase subsequente, o coeficiente angular de 0,1028 sugere uma leve aceleração, mas os valores absolutos de DP ainda permanecem menores em comparação ao solo controle.

O solo estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão demonstra um desempenho superior ao solo controle no ciclo 3. O solo estabilizado apresenta uma DP inicial significativamente menor e uma taxa de acumulação de DP mais controlada ao longo dos ciclos. Mesmo com uma leve aceleração na terceira fase, os valores absolutos de DP permanecem menores, o que indica um comportamento mais estável e eficiente ao longo dos ciclos de carga. Estes dados podem ser conferidos no gráfico da Figura 164.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R²
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1373	-1,8473	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0477	-0,7376	0,993
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,135	-1,1431	0,987
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0673	-1,0605	0,993
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	*	0,1028	-1,1762	0,989

Figura 164: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre nos ciclos 20 e 1000 para o solo controle e nos ciclos 20 e 800 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1351. O coeficiente linear de:0,8794 reflete uma DP inicial relativamente alta. Na segunda fase, a taxa de acumulação de DP desacelera, com o coeficiente angular caindo para 0,0673. Apesar dessa desaceleração, o solo controle ainda acumula DP em valores mais altos do que o solo estabilizado. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta novamente para 0,1042, indicando uma retomada na acumulação de DP.

O solo estabilizado, na primeira fase, apresenta um coeficiente angular de 0,1373, muito próximo ao do solo controle, mas com uma DP inicial menor, conforme o coeficiente linear de:1,165 demonstra. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,1068, mostrando uma desaceleração na taxa de acumulação de DP. Na terceira fase, o coeficiente angular sobe para 0,1511, indicando uma leve aceleração, mas, mesmo assim, o solo estabilizado continua com valores absolutos de DP menores em comparação ao solo controle.

No ciclo 4, o solo estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão continua a demonstrar uma performance superior ao solo controle. O solo estabilizado apresenta uma DP inicial menor e acumula DP de forma mais lenta ao longo dos ciclos. Mesmo com uma leve aceleração na terceira fase, o solo estabilizado mantém um comportamento mais estável, com valores absolutos de DP significativamente menores em comparação ao solo controle. Estas informações estão exibidas no gráfico da Figura 165.

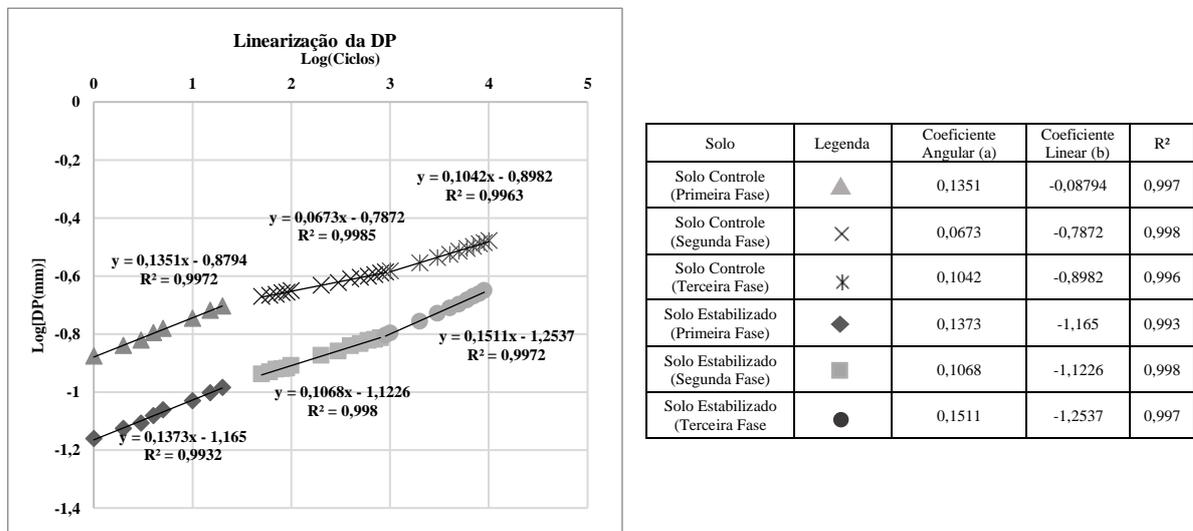


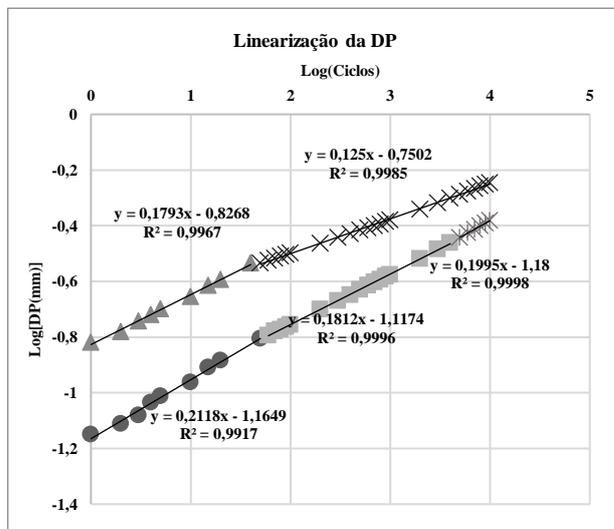
Figura 165: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 50 para o solo controle e nos ciclos 50 e 5000 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1793. O coeficiente linear de:1,8268 reflete uma DP inicial elevada, indicando uma menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular de 0,125 sugere uma desaceleração moderada na taxa de acumulação de DP.

O solo estabilizado, na primeira fase, apresenta um coeficiente angular de 0,2118, indicando uma taxa de acumulação de DP inicial um pouco maior em comparação ao solo controle. No entanto, o coeficiente linear de:1,1649, mais negativo que o do solo controle,

sugere uma DP inicial menor, refletindo maior resistência à deformação nas primeiras etapas do carregamento. Na segunda fase, o solo estabilizado desacelera sua taxa de acumulação de DP, com um coeficiente angular de 0,1812. Na terceira fase, o coeficiente angular de 0,1995 indica uma leve aceleração, mas os valores absolutos de DP ainda permanecem menores em comparação ao solo controle.

No ciclo 5, o solo estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão demonstra um comportamento superior ao solo controle em termos de resistência à DP. Embora o solo estabilizado apresente uma taxa de acumulação de DP ligeiramente maior na primeira fase, ele apresenta uma menor DP inicial e desacelera de maneira mais eficaz ao longo dos ciclos, acumulando menos deformação que o solo controle. Mesmo com uma leve aceleração na terceira fase, o solo estabilizado mantém valores absolutos de DP menores, conforme pode ser visto na Figura 166.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1793	-1,8268	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,125	-0,7502	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,2118	-1,1649	0,992
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,1812	-1,1174	0,999
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	✱	0,1995	-118	0,999

Figura 166: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 5)

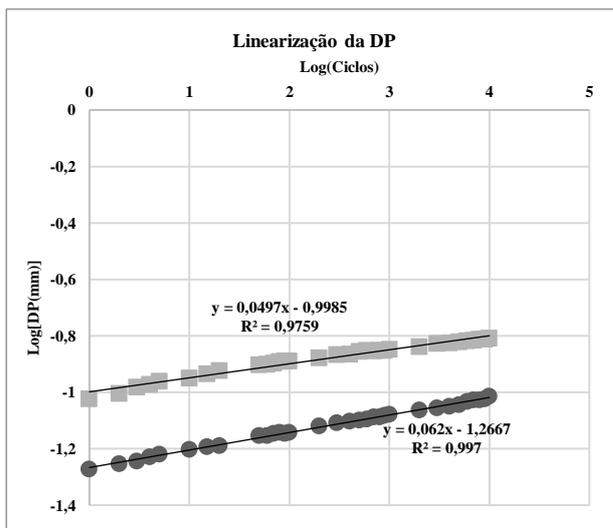
O solo estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão apresenta uma resistência significativamente maior à deformação permanente em comparação ao solo controle. Ao longo dos ciclos, o solo estabilizado acumula menos DP, refletindo uma desaceleração mais eficaz na taxa de deformação, mesmo nas fases finais. Portanto, a adição de fresado e emulsão melhora a resistência e a durabilidade do solo.

### 5.7.13 Solo 2 x Solo 2 + 50% de fresado

O solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,0497, indicando uma taxa de acumulação de DP moderada ao longo dos ciclos. O coeficiente linear de:0,9985 reflete uma DP inicial relativamente alta, sugerindo que o solo controle tem uma menor resistência à deformação nas fases iniciais dos ciclos.

O solo estabilizado com 50% de fresado apresenta um coeficiente angular de 0,062, indicando uma taxa de acumulação de DP um pouco maior em comparação ao solo controle. No entanto, o coeficiente linear de:1,2667, mais negativo que o do solo controle, reflete uma DP inicial significativamente menor, o que sugere uma maior resistência à deformação logo nos primeiros ciclos. Isso mostra que, apesar da maior taxa de acumulação de DP ao longo do tempo, o solo estabilizado começa com uma DP inicial mais baixa, resultando em um melhor desempenho inicial.

No ciclo 1, o solo estabilizado com 50% de fresado apresenta uma DP inicial menor em comparação ao solo controle, sugerindo uma maior resistência à deformação nos primeiros ciclos. Embora a taxa de acumulação de DP ao longo dos ciclos seja ligeiramente maior no solo estabilizado, o desempenho geral, medido pela DP inicial, indica que o uso de fresado melhora a resistência à deformação permanente, conforme exibido na Figura 167.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0497	-0,9985	0,976
Solo 2 + 50%FRSD	●	0,062	-1,2667	0,997

Figura 167: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 1)

No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para ambos os solos. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1888, o que indica uma taxa relativamente alta de acumulação de DP. O coeficiente linear de:1,0932 sugere uma DP inicial elevada, indicando que o solo controle tem uma menor resistência à deformação nos

primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,048, refletindo uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP. Mesmo com essa desaceleração, o solo controle acumula mais DP em termos absolutos do que o solo estabilizado.

O solo estabilizado apresenta um desempenho superior em termos de resistência à deformação. Na primeira fase, com um coeficiente angular de 0,1754, o solo estabilizado acumula DP a uma taxa ligeiramente menor do que o solo controle. O coeficiente linear de:1,428 mostra uma DP inicial muito menor, indicando que o solo estabilizado oferece uma maior resistência à deformação logo nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui ainda mais para 0,0597, indicando uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta ligeiramente para 0,1008, sugerindo uma leve aceleração, mas os valores absolutos de DP continuam menores em comparação ao solo controle.

No ciclo 2, o solo estabilizado com 50% de fresado continua a demonstrar uma resistência superior à DP em relação ao solo controle. A DP inicial significativamente menor do solo estabilizado, combinada com uma desaceleração mais controlada na taxa de acumulação de DP ao longo dos ciclos, reflete um comportamento mais estável e durável. Mesmo com uma leve aceleração na terceira fase, o solo estabilizado mantém valores de DP absolutos menores, de acordo com o gráfico da Figura 168.

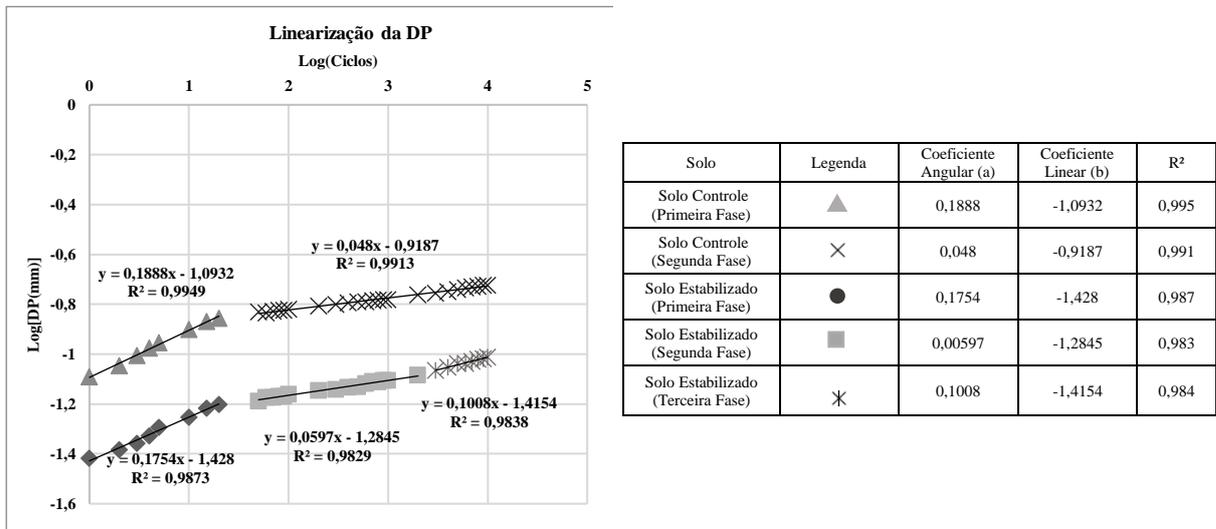


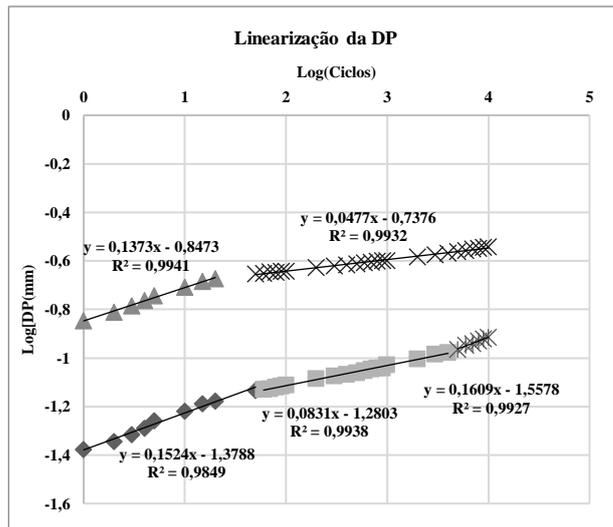
Figura 168: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 50 e 5000 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1373. O coeficiente linear de:1,8473 sugere uma DP inicial elevada, indicando uma menor resistência à deformação desde os primeiros ciclos. Na segunda fase, o

coeficiente angular de 0,0477 mostra uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP. No entanto, o solo controle ainda acumula mais DP em termos absolutos do que o solo estabilizado.

O solo estabilizado apresenta um coeficiente angular de 0,1524 na primeira fase, indicando uma taxa inicial de acumulação de DP um pouco maior que a do solo controle. O coeficiente linear de:1,3788, mais negativo, sugere que o solo estabilizado tem uma DP inicial menor, refletindo uma maior resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,0831, refletindo uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta para 0,1609, sugerindo uma leve aceleração, mas, mesmo assim, o solo estabilizado continua apresentando menores valores absolutos de DP em comparação ao solo controle.

No ciclo 3, o solo estabilizado com 50% de fresado mantém um desempenho superior ao solo controle. Embora o solo estabilizado apresente uma leve aceleração na taxa de acumulação de DP na terceira fase, este ainda mostra uma DP inicial significativamente menor e uma taxa de acumulação mais controlada ao longo dos ciclos, conforme gráfico da Figura 169.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1373	-1,8473	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0477	-0,7376	0,993
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1524	-1,3788	0,985
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0831	-1,2803	0,994
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	*	0,1609	-1,5578	0,993

Figura 169: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre nos ciclos 20 e 1000 para o solo controle e nos ciclos 20 e 800 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,135. O coeficiente linear de:0,8794 reflete uma DP inicial elevada, sugerindo menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular de 0,0673 mostra uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta para 0,1042, indicando uma retomada

na acumulação de DP, embora o solo controle ainda acumule maiores valores de DP em comparação ao solo estabilizado.

O solo estabilizado apresenta uma melhor performance ao longo dos ciclos. Na primeira fase, com um coeficiente angular de 0,1373, o solo estabilizado acumula DP a uma taxa ligeiramente maior que a do solo controle. O coeficiente linear de:1,165, mais negativo, reflete uma DP inicial menor, sugerindo maior resistência à deformação desde o início. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,1068, indicando uma desaceleração na taxa de acumulação de DP. Na terceira fase, o coeficiente angular aumenta para 0,1511, sugerindo uma leve aceleração na taxa de acumulação de DP, mas, ainda assim, os valores absolutos de DP são menores que os do solo controle.

No ciclo 4, o solo estabilizado com 50% de fresado continua a apresentar uma resistência superior à DP em comparação ao solo controle. Embora o solo estabilizado mostre uma leve aceleração na terceira fase, este ainda mantém uma DP inicial menor e uma taxa de acumulação mais controlada ao longo dos ciclos, conforme gráfico da Figura 170.

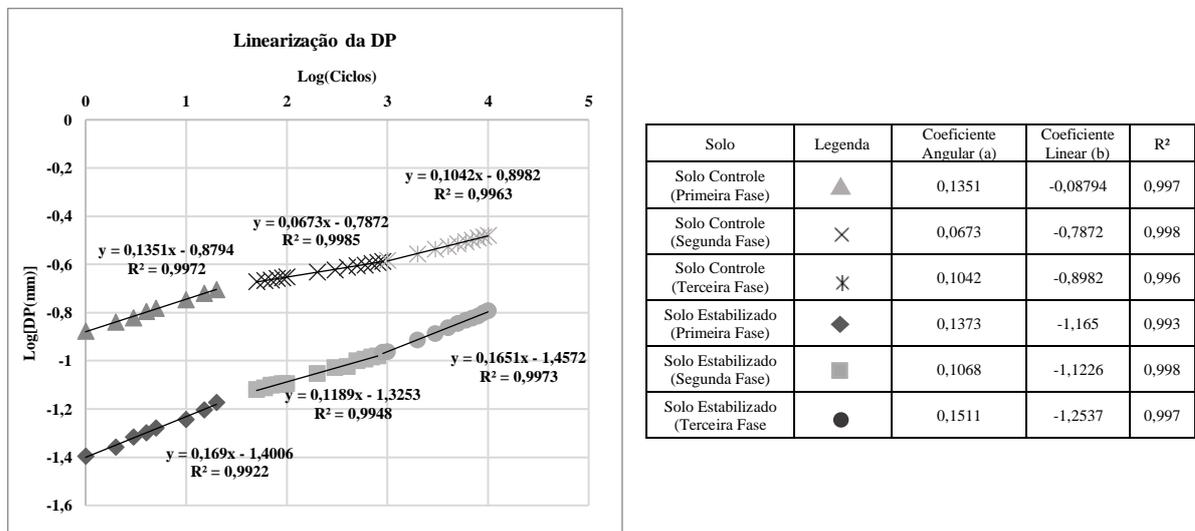
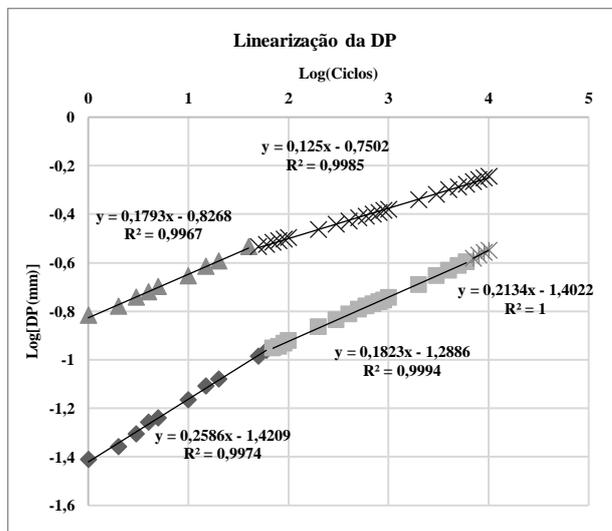


Figura 170: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 50 para o solo controle e nos ciclos 50 e 7000 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1793. O coeficiente linear de:1,8268 reflete uma DP inicial elevada, sugerindo que o solo controle tem uma menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular de 0,125 mostra uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP, embora o solo controle continue acumulando deformação em níveis maiores em relação ao solo estabilizado.

O solo estabilizado com 50% de fresado mostra um comportamento diferente. Na primeira fase, o coeficiente angular de 0,2586 sugere uma maior taxa inicial de acumulação de DP, mas o coeficiente linear de:1,4206, mais negativo, indica uma DP inicial menor em comparação ao solo controle, o que sugere uma maior resistência à deformação. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,1823, refletindo uma desaceleração significativa na taxa de acumulação de DP. Na terceira fase, o coeficiente angular diminui para 0,2134, indicando uma leve aceleração, mas os valores absolutos de DP ainda permanecem menores do que os do solo controle.

No ciclo 5, o solo estabilizado com 50% de fresado continua apresentando uma melhor resistência à deformação permanente em comparação ao solo controle. Embora o solo estabilizado tenha uma maior taxa de acumulação de DP na fase inicial, ele apresenta uma DP inicial menor e desacelera de forma mais eficaz ao longo dos ciclos. Mesmo com uma leve aceleração na terceira fase, o solo estabilizado ainda acumula menos DP do que o solo controle, conforme gráfico da Figura 171.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1793	-1,8268	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,125	-0,7502	0,998
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	◆	0,2586	-1,4206	0,997
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,1823	-1,2886	0,999
Solo Estabilizado (Terceira Fase)	✱	0,2134	-1,4022	0,100

Figura 171: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado (ciclo 5)

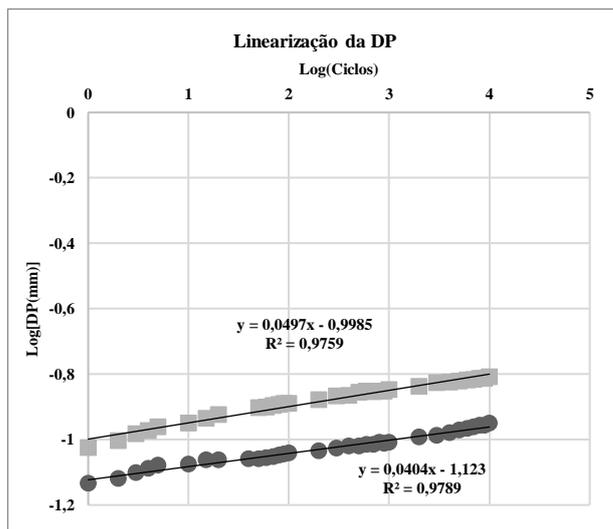
O Solo 2 estabilizado com 50% de fresado apresenta um melhor desempenho em termos de resistência à deformação permanente, especialmente nas fases iniciais de cada ciclo. Embora a taxa de acumulação de DP seja levemente maior ao longo do tempo, o solo estabilizado tem uma DP inicial significativamente menor, o que melhora a durabilidade e o comportamento geral em termos de resistência à deformação. A estabilização com fresado, portanto, proporciona uma melhoria substancial na resistência à DP em comparação ao solo controle.

### 5.7.14 Solo 2 x Solo 2 + 50% de fresado + 1% emulsão

O solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,0497. O coeficiente linear de:0,9985 reflete uma DP inicial relativamente elevada, sugerindo uma menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. À medida que os ciclos se acumulam, o solo controle continua a acumular DP de forma significativa, conforme demonstrado pelo gráfico.

O solo estabilizado, por outro lado, mostra um coeficiente angular de 0,0404, indicando uma taxa de acumulação de DP mais lenta do que o solo controle. Além disso, o coeficiente linear de:1,123, mais negativo, sugere uma DP inicial menor, o que significa que o solo estabilizado apresenta maior resistência à deformação logo nos primeiros ciclos. Com isso, o solo estabilizado acumula menos DP ao longo dos ciclos, conforme indicado pela curva do gráfico.

No ciclo 1, o solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão mostra um desempenho superior em relação ao solo controle. A taxa de acumulação de DP é mais baixa, e a DP inicial é significativamente menor, refletindo uma resistência maior à deformação desde os primeiros ciclos, conforme pode ser visualizado na Figura 172.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle	■	0,0497	-0,9985	0,976
Solo 1 + 50%FRSD + 1% RL	●	0,0404	-1,123	0,979

Figura 172: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 1)

No Ciclo 2, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 15 e 1000 para o solo estabilizado. Na primeira fase, o solo controle tem um coeficiente angular de 0,1888. O coeficiente linear de:1,0932 sugere uma DP inicial maior, refletindo uma menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,048, mostrando uma desaceleração significativa na taxa de

acumulação de DP. No entanto, o solo controle ainda acumula DP em valores mais elevados em comparação ao solo estabilizado.

O solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão apresenta uma performance superior. Na primeira fase, o coeficiente angular é de 0,1734, um pouco menor que o do solo controle, o que indica uma taxa de acumulação de DP mais lenta. O coeficiente linear de: 1,2509, mais negativo, demonstra uma DP inicial significativamente menor, o que reflete maior resistência à deformação. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,0545, reforçando a desaceleração na acumulação de DP. Na terceira fase, o coeficiente angular de 0,1119 sugere uma leve aceleração, mas a DP acumulada continua inferior em relação ao solo controle.

No ciclo 2, o solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão continua a demonstrar melhor desempenho em relação ao solo controle. O solo estabilizado tem uma DP inicial menor e desacelera sua taxa de acumulação de DP de maneira mais eficaz ao longo dos ciclos. Mesmo com uma leve aceleração na terceira fase, os valores absolutos de DP permanecem menores que os do solo controle, de acordo com as informações gráficas da Figura 173.

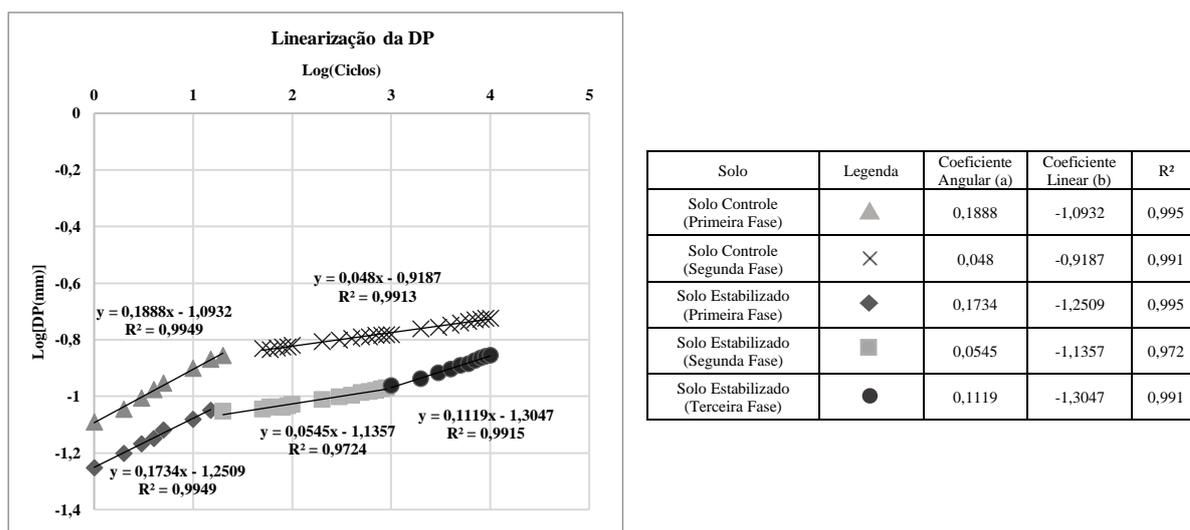


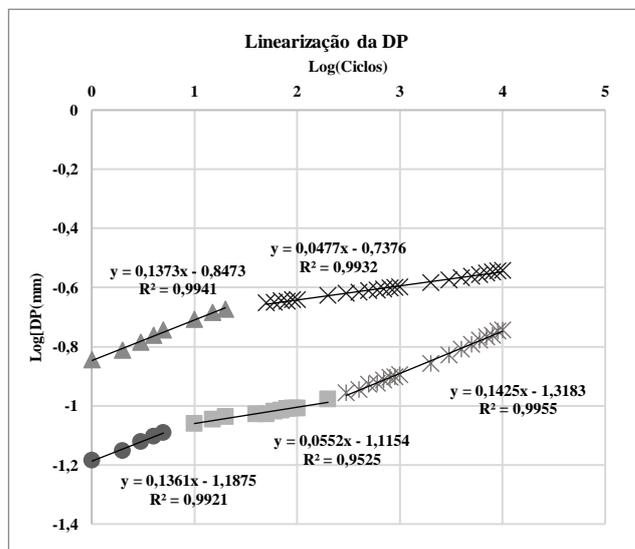
Figura 173: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 2)

No Ciclo 3, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 20 para o solo controle e nos ciclos 15 e 200 para o solo estabilizado. O solo controle exibe um coeficiente angular de 0,1373 na primeira fase, o que indica uma taxa de acumulação de DP moderada. O coeficiente linear de:0,8473 sugere uma deformação inicial relativamente alta. Na segunda fase, o coeficiente angular diminui para 0,0477, demonstrando uma desaceleração na taxa de

acumulação de DP. Apesar dessa desaceleração, o solo controle continua acumulando DP de forma significativa.

O solo estabilizado, na primeira fase, apresenta um coeficiente angular de 0,1361, muito próximo ao do solo controle. No entanto, o coeficiente linear de:1,1875, mais negativo, indica uma deformação inicial significativamente menor, o que sugere uma maior resistência à DP nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,0552, revelando uma desaceleração mais pronunciada na acumulação de DP. Na terceira fase, o coeficiente angular sobe para 0,1425, refletindo uma leve aceleração na taxa de acumulação de DP, mas os valores absolutos ainda são inferiores ao do solo controle.

O solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão apresenta melhor desempenho que o solo controle, acumulando menos DP ao longo dos ciclos e mostrando uma resistência inicial superior. Mesmo com uma leve aceleração na terceira fase, os valores absolutos de DP do solo estabilizado são menores, conforme exibido no gráfico da Figura 174.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1373	-0,8473	0,994
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0477	-0,7376	0,993
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1361	-1,1875	0,992
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,0552	-1,1154	0,9525
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	*	0,1425	-1,31838	0,995

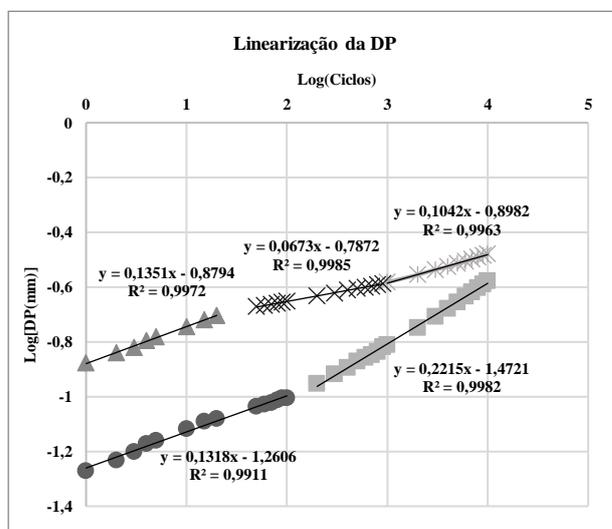
Figura 174: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 3)

No Ciclo 4, a mudança do coeficiente angular ocorre nos ciclo 20 e 800 para o solo controle e no ciclo 100 para o solo estabilizado. O solo controle mostra um coeficiente angular de 0,1351 na primeira fase, sugerindo uma taxa moderada de acumulação de DP. O coeficiente linear de:0,8794 reflete uma DP inicial elevada, indicando menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Nas fases subsequentes, há uma desaceleração na taxa de acumulação de DP, como observado na segunda fase, onde o coeficiente angular cai para 0,0673, e na terceira fase,

com um coeficiente angular de 0,1042, que indica uma retomada no acúmulo de DP. O solo controle, portanto, continua a acumular deformação, mesmo que de forma mais controlada.

O solo estabilizado apresenta, na primeira fase, um coeficiente angular de 0,1318, bastante próximo ao do solo controle. No entanto, o coeficiente linear de:1,2606, mais negativo, demonstra uma DP inicial significativamente menor, sugerindo maior resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular aumenta para 0,2215, indicando uma aceleração na taxa de acumulação de DP, mas os valores absolutos de DP permanecem menores que os do solo controle.

O solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão apresenta melhor desempenho em termos de resistência inicial à deformação, com uma DP inicial menor e um acúmulo de DP mais controlado ao longo dos ciclos. Mesmo com uma aceleração da taxa de DP na segunda fase, o solo estabilizado continua acumulando menos DP que o solo controle, conforme pode ser visto na Figura 175.



Solo	Legenda	Coefficiente Angular (a)	Coefficiente Linear (b)	R <sup>2</sup>
Solo Controle (Primeira Fase)	▲	0,1351	-0,8794	0,997
Solo Controle (Segunda Fase)	×	0,0673	-0,7872	0,998
Solo Controle (Terceira Fase)	*	0,1042	-0,8982	0,996
Solo Estabilizado (Primeira Fase)	●	0,1318	-1,2606	0,991
Solo Estabilizado (Segunda Fase)	■	0,2215	-1,4721	0,998

Figura 175: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 4)

No Ciclo 5, a mudança do coeficiente angular ocorre no ciclo 50 para o solo controle e no ciclo 800 para o solo estabilizado. O solo controle apresenta um coeficiente angular de 0,1793 na primeira fase, indicando uma taxa de acumulação de DP relativamente alta. O coeficiente linear de:0,8268 sugere uma DP inicial mais elevada, o que reflete uma menor resistência à deformação nos primeiros ciclos. Na segunda fase, o coeficiente angular cai para 0,125, demonstrando uma desaceleração na taxa de acumulação de DP, mas o solo ainda acumula deformação de maneira significativa ao longo dos ciclos.

O solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão exibe um coeficiente angular de 0,2282 na primeira fase, indicando uma taxa de acumulação de DP ligeiramente maior que a do solo controle. Contudo, o coeficiente linear de:1,2168, mais negativo que o do solo controle, sugere uma DP inicial menor, indicando uma melhor resistência à deformação logo no início. Na segunda fase, o coeficiente angular de 0,261 mostra uma aceleração na acumulação de DP, mas os valores absolutos de DP permanecem menores que os do solo controle, conforme o coeficiente linear de:1,2907 revela. Porém, a taxa de acumulação de DP acelera tanto que o desempenho é quase similar ao final do ciclo.

O solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão apresenta uma DP inicial menor e acumula DP de forma mais acelerada em comparação ao solo controle, conforme Figura 176.

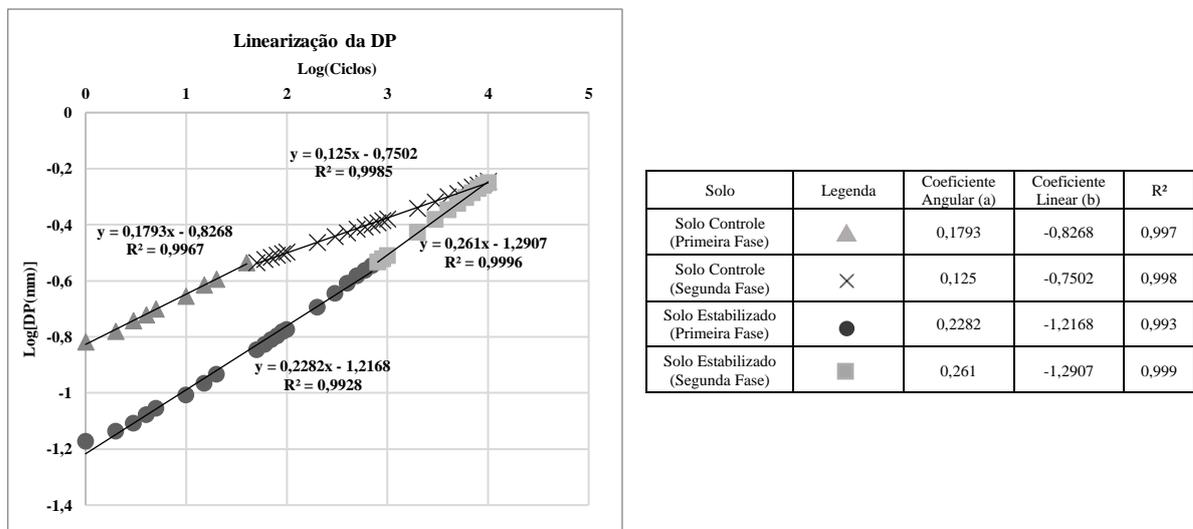


Figura 176: Linearização da DP do solo 2 controle e solo 2 + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 5)

Ao longo dos ciclos, o solo estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão apresenta, em geral, um desempenho superior ao solo controle, especialmente nos primeiros ciclos, com menor DP inicial e uma taxa de acumulação de DP mais controlada. Apesar de uma leve aceleração na taxa de acumulação de DP nas fases posteriores, o solo estabilizado ainda mantém valores de DP menores em comparação ao solo controle, o que demonstra uma maior resistência à deformação e um comportamento mais estável ao longo do tempo.

## 5.7 Shakedown

É importante mencionar que essa variação de deformação permanente (DP) ao longo dos ciclos de carga está diretamente relacionada com a taxa de acúmulo de deformação permanente. Em materiais no domínio A, essa taxa de acúmulo de DP é muito baixa, indicando que o material atingiu uma condição estável com predominância de deformações resilientes. À medida que o material migra para o domínio B, a taxa de acúmulo de DP aumenta, sugerindo uma instabilidade crescente, especialmente sob ciclos de carga mais prolongados. No domínio C a capacidade do material de suportar as solicitações mecânicas vai diminuindo com o tempo, o que pode levar ao colapso. Portanto, o *shakedown* é fundamental para entender o comportamento plástico dos solos e prever sua durabilidade sob carregamentos repetidos.

### 5.7.1 Avaliação do shakedown pela norma CEN EN 13286-7

Os solos com emulsão (1,5%, 2% e 2,5% RL) apresentaram predominância no domínio B nos estágios finais (Estágio 4 e Estágio 5), com exceção do solo estabilizado com 1,5% e 2% de emulsão, que entraram no domínio B já no Estágio 1. Isso demonstra que a adição de emulsão não foi suficiente para manter esses solos no domínio A sob maiores níveis de carregamento, revelando uma menor capacidade de acomodação plástica quando comparado ao solo controle. O solo com 2% de emulsão foi o que se manteve em mais estágios no domínio A.

Os compostos com fresado (30% e 50% FRSD) apresentaram bom desempenho em termos de shakedown até os estágios finais. Ambos os compostos se mantiveram no domínio A até o Estágio 4, com o composto com 30% de fresado mantendo-se mais tempo no domínio A em relação ao solo controle. Isso indica que a adição de fresado melhora a capacidade de acomodação plástica, especialmente nos primeiros estágios de carregamento.

Os compostos que combinam fresado e emulsão (30% FRSD + 2% RL, 50% FRSD + 2% RL) também apresentaram bom desempenho inicial, mantendo-se no domínio A até o Estágio 2, mas entraram no domínio B nos estágios mais avançados, sugerindo que a combinação de fresado e emulsão pode melhorar a resistência plástica, mas a adição de emulsão não oferece uma vantagem significativa nas fases mais críticas de carregamento em relação ao fresado puro. Estas informações estão disponíveis na Tabela 25.

Tabela 25: Análise do *shakedown* pelo desempenho plástico do solo 1

Shakedown	Ep5000-Ep3000(10 <sup>-3</sup> )					Domínio				
	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
solo CTR	0,018785	0,01573	0,018855	0,028265	0,03455	A	A	A	A	A
solo 1 + 1,5%RL	0,05017	0,04396	0,05951	0,08469	0,10039	B	A	B	B	B
solo 1 + 2%RL	0,04730	0,02841	0,04428	0,09747	0,12893	B	A	A	B	B
solo 1 + 2,5%RL	0,04389	0,05024	0,06285	0,09421	0,14456	A	B	B	B	B
solo 1 + 30% FRSD	0,015695	0,018855	0,02507	0,040765	0,06278	A	A	A	A	B
solo 1 + 30% FRSD + 2%RL	0,025139	0,040835	0,065975	0,14768	0,298344	A	A	B	B	B
solo 1 + 50% FRSD	0,015695	0,02514	0,03139	0,062746	0,116254	A	A	A	B	B
solo 1 + 50% FRSD + 2%RL	0,012535	0,02514	0,04403	0,12907	0,198276	A	A	B	B	B

A classificação para o enquadramento do domínio de Shakedown pode apresentar variações dependendo das condições de estudo. A análise gráfica facilita a visualização dessas variações, oferecendo uma perspectiva clara das mudanças nas deformações permanentes (DP) ao longo dos ciclos de carregamento. Quanto maior for a variação da DP nos valores analisados, maior será o ângulo da curva de acúmulo de DP em relação ao ciclo de carregamento, indicando um comportamento de maior acúmulo de deformações ao longo do tempo. É possível se verificar um forte efeito da emulsão e dos compostos nos ciclos 4 e 5. Nos demais ciclos este efeito é bastante atenuado.

Na análise dos solos estabilizados com emulsão, os materiais mostraram uma menor variação de deformação permanente (DP) nos estágios iniciais, mas essa variação aumentou de forma significativa nos estágios posteriores. Isso indica que, apesar de um bom desempenho inicial, a estabilidade do solo sob cargas mais prolongadas é comprometida à medida que o ciclo avança.

Os compostos com fresado apresentaram um comportamento mais estável ao longo dos ciclos de carga. O solo com 30% de fresado foi o que teve a menor variação de DP em todos os estágios, demonstrando um desempenho superior em relação ao solo controle. Já o solo com 50% de fresado, embora tenha mantido boa estabilidade até o estágio 3, apresentou maior variação de DP no Estágio 5, evidenciando uma limitação em ciclos mais avançados.

Para os compostos que combinam fresado e emulsão, o comportamento foi inicialmente positivo, com uma menor variação de DP nos estágios iniciais. No entanto, nos estágios mais avançados, especialmente a partir do estágio 3, houve um aumento considerável na variação da DP, sugerindo que, sob ciclos mais prolongados, a combinação de fresado com emulsão tem

uma tendência à perda de estabilidade. Estes dados podem ser analisados no gráfico da Figura 177.

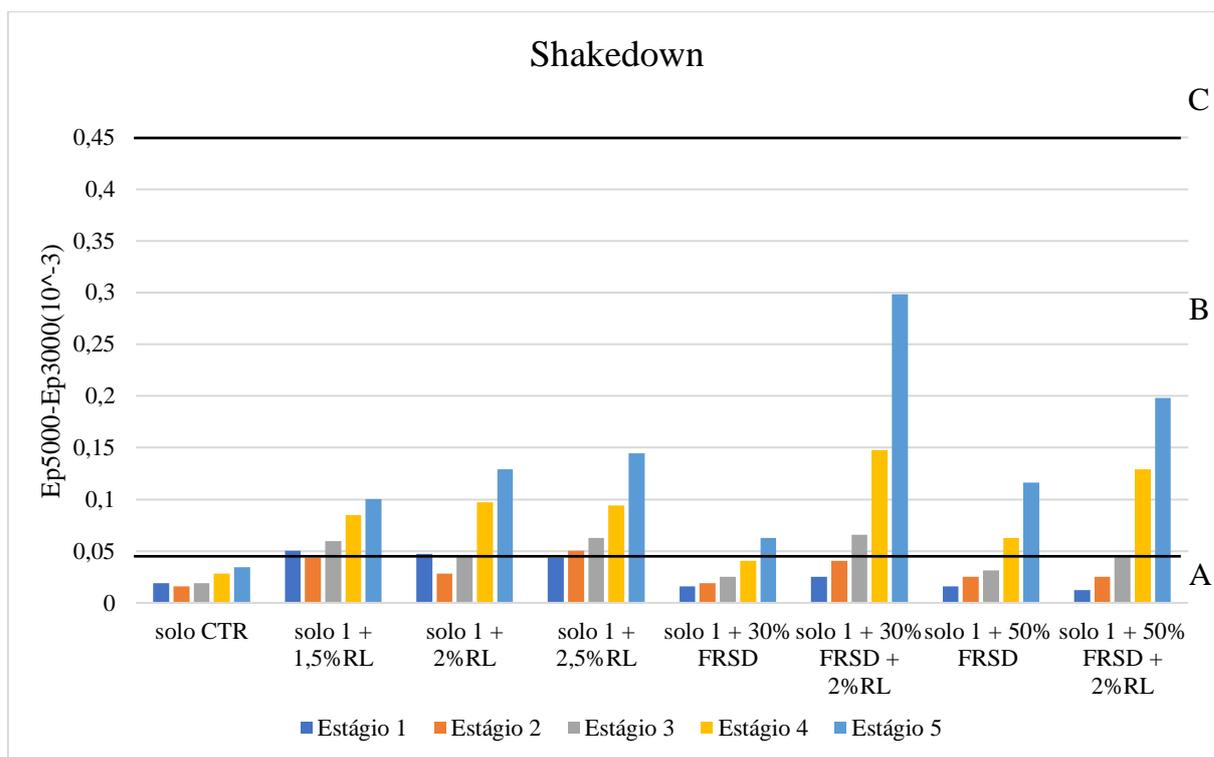


Figura 177: Variação da DP para o solo 1

Os materiais com emulsão apresentam variação significativa ao longo dos estágios. Inicialmente, tendem a se manter no domínio A, caracterizado por uma estabilidade maior, mas há uma transição para o domínio B no estágio 3, enquanto o solo controle atinge o domínio B no estágio 4, sugerindo uma perda de resistência e aumento da variação da deformação plástica.

Os compostos com fresado, como o solo com 30% de fresado, se comportam de maneira mais estável nos estágios iniciais, permanecendo no domínio A em todos os estágios até o estágio 4, o que indica bom desempenho em termos de variação da deformação permanente. Contudo, o solo com 50% de fresado começa a mostrar transição para o domínio B a partir do estágio 4, sugerindo um desempenho inferior ao composto com 30% de fresado.

Quando fresado e emulsão são combinados, observa-se que os materiais tendem a se manter no domínio A nos primeiros estágios, mas há uma transição mais precoce para o domínio B nos estágios posteriores, indicando que a combinação de fresado e emulsão pode resultar em um desempenho inferior quando comparado ao fresado isolado. Estas informações podem ser conferidas na Tabela 26.

Tabela 26: Análise do *shakedown* pelo desempenho plástico do solo 2

Shakedown	Ep5000-Ep3000(10 <sup>-3</sup> )					Domínio				
	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
solo 2 CTR	0,009515	0,031425	0,03771	0,078545	0,175945	A	A	A	B	B
solo 2 + 0,5%RL	0,00941	0,04087	0,069171	0,185424	0,185424	A	A	B	B	B
solo 2 + 1%RL	0,02510	0,03135	0,05337	0,10993	0,24512	A	A	B	B	B
solo 2 + 1,5%RL	0,02198	0,03774	0,05656	0,10692	0,21070	A	A	B	B	B
solo 2 + 30% FRSD	0,00316	0,012605	0,0283	0,047156	0,081635	A	A	A	B	B
solo 2 + 30% FRSD + 1%RL	0,00941	0,015661	0,03771	0,07233	0,14768	A	A	A	B	B
solo 2 + 50% FRSD	0,012605	0,028265	0,025105	0,06587	0,112955	A	A	A	B	B
solo 2 + 50% FRSD + 1%RL	0,018855	0,037711	0,062884	0,128895	0,298694	A	A	B	B	B

Diferente do solo 1, no solo 2 não se observa uma influência da emulsão e dos compostos de maneira tão proeminente na estabilização do solo. A exceção se verifica no composto com 30% de fresado que reduz bastante a variação da DP para o estudo em questão.

Na análise dos solos estabilizados apenas com emulsão, o solo com 0,5% de RL apresentou uma menor variação de deformação permanente (DP) entre os ciclos 3000 e 5000 nos primeiros estágios, mas a maior variação de DP ocorreu no Estágio 5. O solo com 1% e 1,5% de RL também teve um desempenho similar, com uma menor variação nos estágios iniciais e um aumento da variação de DP nos estágios finais, especialmente no Estágio 5, mostrando uma tendência de instabilidade sob cargas mais prolongadas.

Para os compostos com fresado, o solo com 30% de fresado apresentou a menor variação de DP em todos os estágios, o que indica um desempenho superior e mais estável em comparação ao solo controle. Já o solo com 30% de fresado teve uma variação de DP baixa até o Estágio 3, mas apresentou uma maior variação no Estágio 5, superando o valor do solo controle, evidenciando uma limitação nos estágios finais.

Nos compostos com fresado e emulsão, o solo com 30% de fresado e 1% de RL apresentou uma menor variação de DP nos primeiros estágios, mas teve a maior variação de DP a partir do estágio 3, mostrando um comportamento menos estável nos estágios finais. O solo com 50% de fresado e 1% de RL apresentou uma variação de DP moderada nos estágios iniciais, mas teve a maior variação de DP no estágio 5, o que indica um aumento significativo da deformação em ciclos mais avançados de carregamento. Estas informações podem ser visualizadas no gráfico da Figura 178.

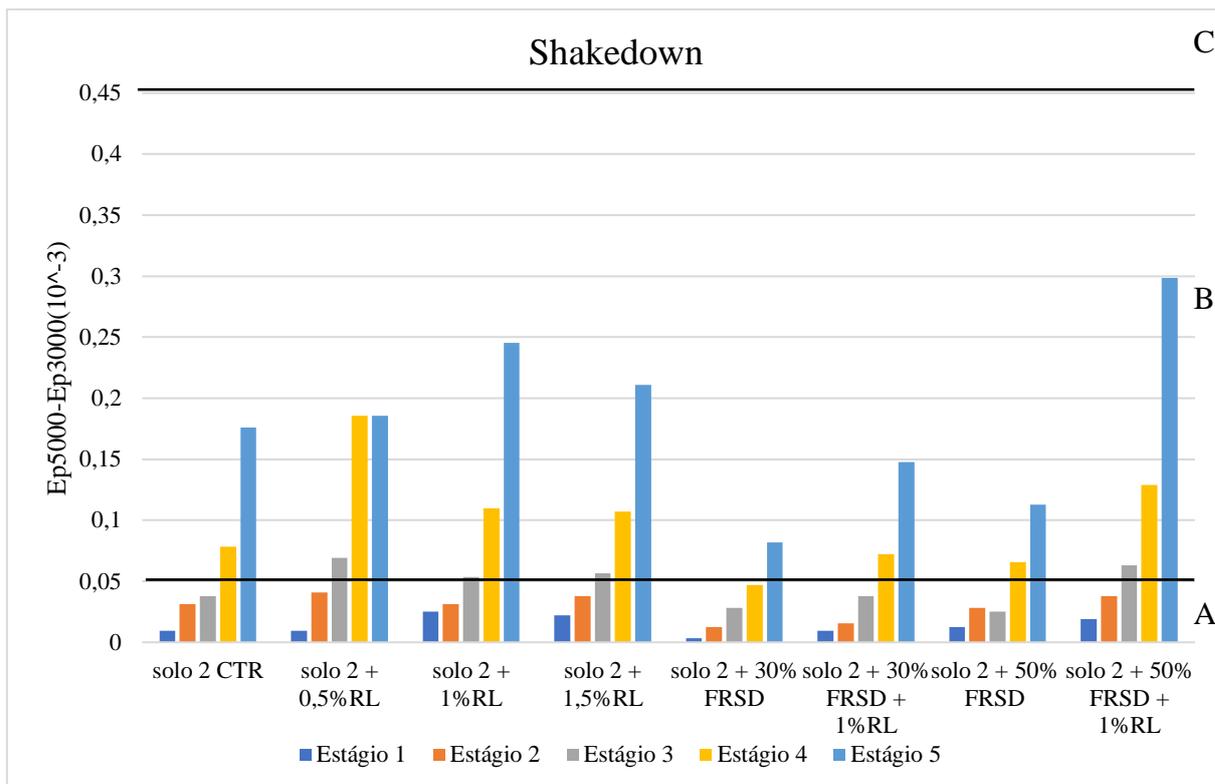


Figura 178: Variação da DP para o solo 2

Para o solo 1, os materiais com emulsão (1,5%, 2% e 2,5% RL) mostraram uma tendência a migrarem para o domínio B em estágios avançados, indicando uma maior variação da DP nestes estágios. O solo com 1,5% de RL foi o que apresentou o pior desempenho, entrando no domínio B já no Estágio 1. Isso indica que a adição de emulsão não foi suficiente para manter esses solos estáveis sob maiores níveis de carregamento, evidenciando um comportamento inferior ao solo controle, mas indicando um efeito que afetou a acomodação do solo estabilizado.

Os compostos com fresado (30% e 50% FRSD) apresentaram um comportamento superior ao solo controle. Ambos permaneceram no domínio A até o Estágio 4, com o composto com 30% de fresado mostrando melhor desempenho ao permanecer mais tempo no domínio A em comparação ao solo controle. Isso sugere que a adição de fresado diminuiu a variação de DP, especialmente nos primeiros estágios de carregamento.

Para os compostos que combinam fresado e emulsão (30% FRSD + 2% RL, 50% FRSD + 2% RL), o comportamento inicial foi bom, com os compostos se mantendo no domínio A até o Estágio 3. No entanto, a entrada no domínio B nos estágios mais avançados sugere que a emulsão, quando combinada com fresado, não oferece uma vantagem significativa nas fases mais críticas de carregamento em relação ao composto com fresado.

No solo 2, o efeito dos solos estabilizados emulsão também foi menos significativo. O solo com 0,5% de RL apresentou uma menor variação de deformação permanente nos estágios iniciais, mas houve um aumento substancial nos estágios finais, especialmente no Estágio 5. Da mesma forma, os solos com 1% e 1,5% de emulsão migraram para o domínio B nos estágios finais, indicando uma estabilidade limitada sob cargas mais prolongadas, porém um comportamento similar ao solo controle.

Para os compostos com fresado, o solo com 30% de fresado apresentou um desempenho superior ao solo controle, mantendo-se no domínio A até o Estágio 3 e entrando no domínio B apenas no Estágio 4. O solo com 50% de fresado apresentou uma transição semelhante, com um bom desempenho nos primeiros estágios, mas uma maior variação de deformação no Estágio 5, evidenciando uma limitação em ciclos mais avançados.

Os compostos que combinam fresado e emulsão também mostraram um desempenho misto. O solo com 30% de fresado e 1% de RL se manteve no domínio A até o Estágio 3, mas entrou no domínio B nos estágios mais avançados, mostrando uma perda de estabilidade. Já o solo com 50% de fresado e 1% de RL teve uma transição similar, apresentando um aumento considerável da variação da deformação nos ciclos mais avançados.

### 5.7.2 Avaliação do Shakedown pelo modelo de Tseng e Lytton

Analisando-se exclusivamente nos coeficientes  $P$  e  $b$  e como estes afetam a função é possível se analisar como estes afetam a função  $\varepsilon_p(N) = \varepsilon_m e^{-\left(\frac{P}{N}\right)^b}$ . Aqui,  $P$  é a variável que está sendo alterada diretamente, e  $b$  é o expoente que controla a curvatura da função. Por exemplo, quando se dobra o valor de  $P$  (ou seja,  $P$  passa a ser  $2P$ ), tem-se o seguinte:  $\left(\frac{P}{N}\right)^b \rightarrow \left(\frac{2P}{N}\right)^b$ . Quando  $P$  é dobrado, a fração  $(P/N)$  também dobra, e como o valor resultante é elevado a  $b$ , o efeito depende do valor de  $b$ , porém seu decaimento é mais lento para o mesmo número de ciclos, pois com um denominador maior a função  $\varepsilon_p(N)$  atinge deformações menores, o que faz a função leve mais tempo para chegar até a assíntota.

Quando  $P$  é pequeno, a expressão  $\left(\frac{P}{N}\right)^b$  decai mais rapidamente enquanto  $N$  aumenta. Quando  $N$  tende ao infinito a expressão  $\left(\frac{P}{N}\right)^b$  tende a zero. Isso significa que o valor de  $\varepsilon_p(N)$  cresce mais rápido em direção ao seu valor de equilíbrio, pois o denominador não "puxa" tanto a função para baixo. Assim, a curva cresce rapidamente e atinge o valor da assíntota mais cedo.

Pois ao se resolver o limite da expressão  $\lim_{N \rightarrow \infty} \varepsilon_p(N) = \varepsilon_m$ , em que  $\varepsilon_p = \varepsilon_m$  é a assíntota da função  $\varepsilon_p(N)$ . Quando  $P$  é grande o termo  $(\frac{P}{N})^\beta$  decai lentamente, significando que a função  $\varepsilon_p(N)$  está crescendo por mais tempo, por isso  $P$  é conhecido como fator de escala.

O parâmetro  $b$  modula a sensibilidade da função à variação de  $N$ . O coeficiente afeta a forma como a função responde a mudanças em  $N$ , se esta envoltória está mais aberta ou fechada, se esta cresce mais em direção a ordenada ou abscissa.

Quando  $b$  diminui, a função  $\varepsilon_p(N)$  tende a ter um crescimento mais proeminente nos ciclos iniciais, pois  $(\frac{P}{N})^\beta$  está no denominador da função tornando o produto da divisão um número maior, logo a curva tende a se aproximar mais das ordenadas, indicando um comportamento mais ascendente inicialmente, alterando a curvatura da função, por isso  $b$  é conhecido como fator de forma. A Figura 179 ilustra o comportamento das curvas com a variação dos coeficientes  $P$  e  $b$ , conforme foi explicado.

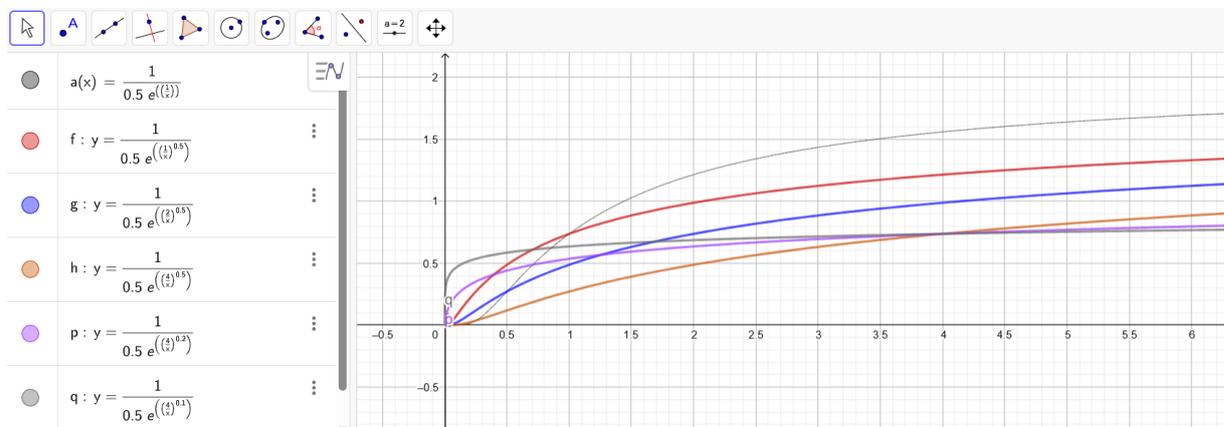


Figura 179: Influência dos coeficientes  $P$ ,  $b$  e  $em$  no comportamento do modelo

### 5.7.2.1 Análise do *Shakedown* para o solo 1

Para o solo 1 controle, o coeficiente  $P$  apresenta um crescimento substancial ao longo dos estágios, indo de 0,223 no estágio 1 para 231,742 no estágio 5. À medida que  $P$  aumenta, a expressão  $(P/N)$  decai mais lentamente. Isso significa que a função vai levar mais tempo para alcançar seu valor de equilíbrio, ou seja, a assíntota. Nos estágios iniciais, com valores mais baixos de  $P$ , a função atinge a assíntota mais rapidamente, refletindo uma resposta mais ágil do solo. No entanto, à medida que  $P$  se eleva, especialmente nos Estágios 4 e 5, a função se alonga, indicando um acúmulo mais lento e prolongado das deformações permanentes (DP), o que reflete que o solo está sofrendo deformações mais persistentes ao longo dos ciclos de carga. Esse comportamento evidencia que, conforme o valor de  $P$  aumenta, o solo acumula

deformações de forma mais progressiva e duradoura, atrasando a estabilização do comportamento do material.

O coeficiente  $b$  tem um papel fundamental na curvatura da função e, conseqüentemente, na taxa de acúmulo de deformações permanentes (DP). O valor de  $b$  começa relativamente baixo no estágio 1 (0,115), aumenta no estágio 2 (0,286), e depois diminui progressivamente nos estágios subsequentes, chegando a 0,183 no estágio 5. Quanto menor for  $b$  em relação a  $P$ , maior será a taxa de acúmulo de DP inicial, pois a expressão  $(P/N)^b$  está no denominador da função. Um  $b$  baixo faz com que o termo  $(P/N)^b$  seja menos dominante, permitindo que a função cresça mais rapidamente, acumulando deformações de forma acelerada. Nos estágios finais, com a diminuição de  $b$  e o aumento de  $P$ , observa-se novamente um aumento na taxa de acúmulo de DP mais lento, refletindo a sensibilidade da curva às variações em  $N$  e a tendência de o solo voltar a acumular deformações de forma mais acentuada.

O valor de  $em$  começa alto no estágio 1 ( $em=1,140$ ), diminui no estágio 2 ( $em=0,732$ ) e depois se mantém entre 0,7 e 0,9 nos estágios 3, 4 e 5, com uma ligeira tendência de aumento no final. A diminuição de  $em$  nos estágios iniciais pode indicar que a função está ajustando sua escala para se adequar melhor à variação dos dados. Nos estágios mais avançados, a estabilização de  $em$  próximo a 0,8 sugere que a amplitude da função atingiu um equilíbrio, refletindo que a escala geral do fenômeno modelado é consistente, com pequenas variações no estágio 5. Estas informações podem ser visualizadas na Tabela 27. Observa-se que  $em$  atinge um valor baixo em todos os ciclos de carregamento.

Tabela 27: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,115	0,286	0,210	0,215	0,183
$P$	0,223	1,402	2,173	21,039	231,742
$em$	1,140	0,732	0,801	0,762	0,888
Ajuste $R^2$	0,999	0,990	0,996	0,993	0,995

O modelo de Tseng e Lytton é utilizado para prever o comportamento de materiais submetidos a carregamentos repetidos demonstrando que o solo entra em *Shakedown* (ou seja, atingem um estado em que as deformações adicionais se tornam muito pequenas ou inexistentes). O gráfico parece indicar que, após o primeiro e o segundo estágios, o solo está entrando em uma fase de estabilização com deformações permanentes muito pequenas, especialmente nos estágios mais avançados (3, 4 e 5).

O gráfico Figura 180: Limites de *Shakedown* do solo 1 mostra que o solo 1, ao passar pelos cinco estágios, experimenta uma diminuição significativa nas deformações permanentes ao longo do tempo. Isso é um indicativo de que o solo está se comportando de maneira estável após múltiplos ciclos de carregamento, com os valores de  $\text{Log}[ep(10^{-3})]$  diminuindo consistentemente e atingindo níveis muito baixos nos estágios finais. Isso sugere um comportamento típico de *Shakedown*, onde o material se ajusta aos carregamentos repetidos e as deformações adicionais se tornam insignificantes.

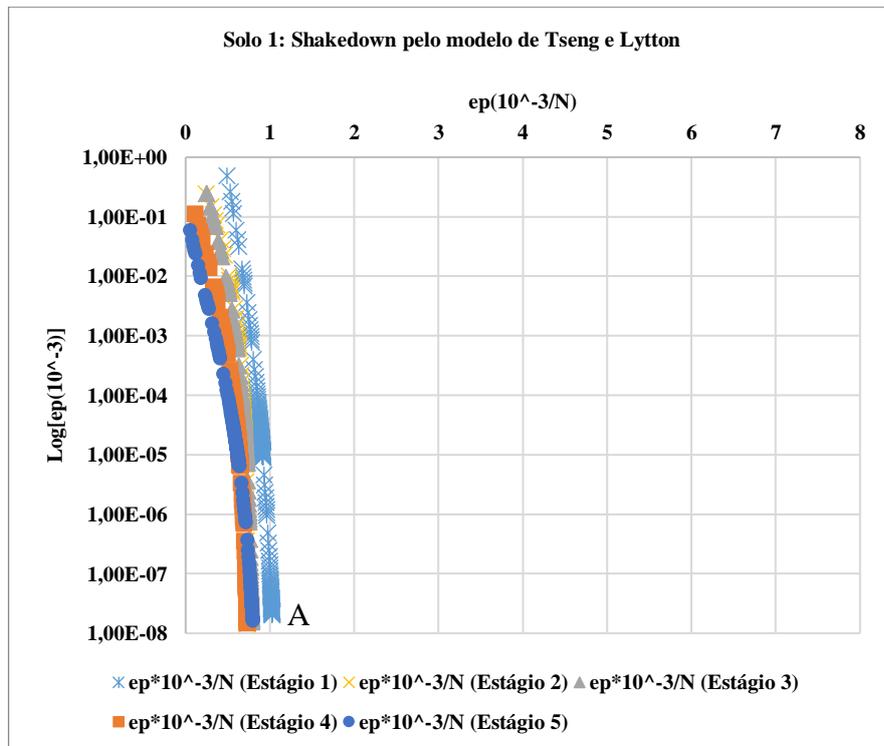


Figura 180: Limites de *Shakedown* do solo 1

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 181, é possível concluir que não há perda de resistência da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o solo esteja entrando em colapso.

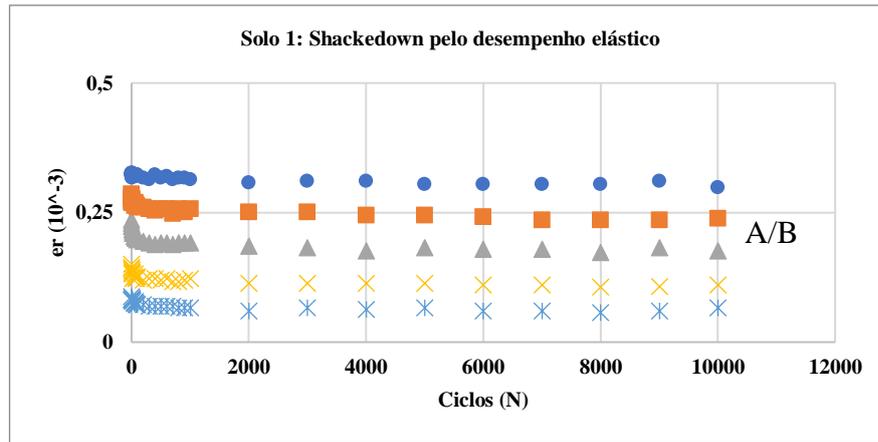


Figura 181- Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 1

O valor de  $P$  é extremamente elevado no estágio 1, o que reflete um comportamento exponencial intenso no início. A redução de  $P$  nos estágios intermediários (estágios 2 e 3) indica um maior decaimento da expressão  $(P/N)$ . O aumento acentuado de  $P$  no estágio 5 sugere que o solo pode estar acumulando mais deformação permanente nesse estágio, levando a um crescimento mais prolongado.

O valor de  $b$  aumenta no estágio 2, indicando que a função cresce mais lentamente nesse ponto, refletindo um ajuste do modelo a uma mudança mais pronunciada nos dados. A redução gradual de  $b$  nos estágios seguintes sugere um crescimento mais acelerado da função à medida que o solo vai estabilizando sua resposta à carga cíclica.

A trajetória de  $em$  reflete a amplificação da função que começa alta, cai no estágio 2 e depois aumenta significativamente nos estágios seguintes. Isso sugere que, ao longo dos ciclos, a função precisa de mais amplitude para capturar as variações dos dados, especialmente nos estágios finais, conforme dados da Tabela 28.

Tabela 28: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 1,5% de emulsão asfáltica

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,054	0,162	0,138	0,122	0,075
$P$	1,04E+07	54,046	523,684	1,15E+04	4,58E+09
$em$	4,526	1,306	2,091	3,955	19,755
Ajuste $R^2$	0,998	0,997	0,999	0,999	0,998

No gráfico Figura 182, a dispersão horizontal dos pontos nos estágios 4 e 5, no domínio B, é mais acentuada, mostra que o solo está sofrendo deformações permanentes em ciclos avançados, sugerindo um comportamento menos ideal conforme aumenta o número de ciclos. Essa inclinação para a horizontal é um sinal de que o material pode não estar se estabilizando

adequadamente. Aqui (Figura 182) é possível ver com facilidade o efeito da emulsão que mudou o comportamento do material.

Nota-se neste percentual de estabilização que a emulsão altera o comportamento do solo controle nos estágios 1, 3, 4 e 5. Apenas no estágio 2 o solo se mantém no domínio A. Apesar de estarem no domínio B, os estágios 1 e 3 apresentam deformações permanentes razoáveis, com uma concavidade da curva voltada para a esquerda, o que denota um tendência á acomodação pós certo número de carregamentos.

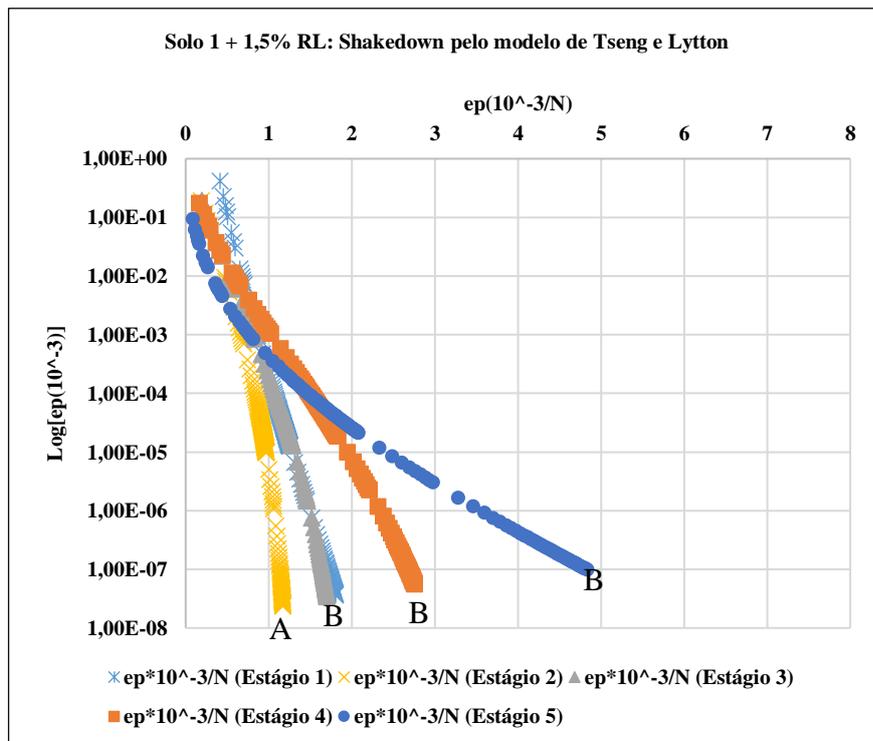


Figura 182: Limites de *Shakedown* do solo 1 estabilizado com 1,5% de emulsão asfáltica

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 183, é possível concluir que não há perda de resistência da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o solo esteja entrando em colapso.

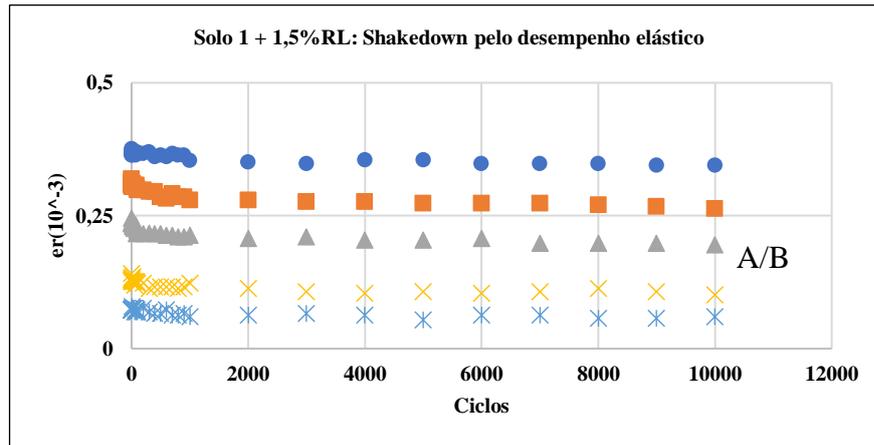


Figura 183: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado com 1,5% de emulsão

O valor de  $P$  aumenta ao longo dos estágios, especialmente nos estágios 4 e 5. Isso indica que o comportamento da função se torna exponencialmente mais acentuado à medida que o número de ciclos  $N$  aumenta. O solo acumula mais deformações permanentes, o que reflete uma condição mais crítica nos estágios finais.

$b$  começa relativamente baixo e varia ligeiramente até o estágio 3, sugerindo um crescimento moderado da função. Nos estágios 4 e 5, a redução de  $b$  potencializa ainda mais o crescimento da função, refletindo um crescimento mais acelerado nos estágios finais.

O valor de  $em$  segue um padrão de crescimento ao longo dos estágios. No estágio 1, em é moderado, mas a partir do estágio 3, o valor de  $em$  começa a aumentar de forma significativa, culminando no estágio 5 com um valor extremamente alto. Isso indica uma ampliação muito forte da função, sugerindo que a magnitude do fenômeno modelado está crescendo exponencialmente. Estes dados podem ser consultados na Tabela 29. Para este percentual de emulsão,  $em$  atinge um valor crítico no quarto e quinto estágios.

Tabela 29: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 2% de emulsão asfáltica

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,102	0,141	0,125	0,099	0,071
$P$	1,67E+02	170,453	5377,178	1,17E+06	2,65E+10
$em$	2,361	1,861	3,190	7,195	37,134
Ajuste $R^2$	0,998	0,999	0,993	0,998	0,994

O gráfico da Figura 184 mostra que, embora o solo apresente uma tendência à estabilização, especialmente nos estágios iniciais, os estágios 4 e 5 indicam um comportamento onde as deformações permanentes continuam a ocorrer de forma significativa, como mostrado pelo afastamento das curvas da vertical. As regiões no domínio B mostram que o solo está em

uma fase de comportamento não ideal, acumulando deformações permanentes mesmo após muitos ciclos de carga. Isso sugere que o material pode está demorando para entrar em *Shakedown*.

Nota-se neste percentual de estabilização que a emulsão altera o comportamento do solo em todos os estágios. Apesar de estarem no domínio B, os estágios 1, 2 e 3 apresentam deformações permanentes razoáveis, com uma concavidade da curva voltada para a esquerda, o que denota uma tendência a acomodação pós certo número de carregamentos.

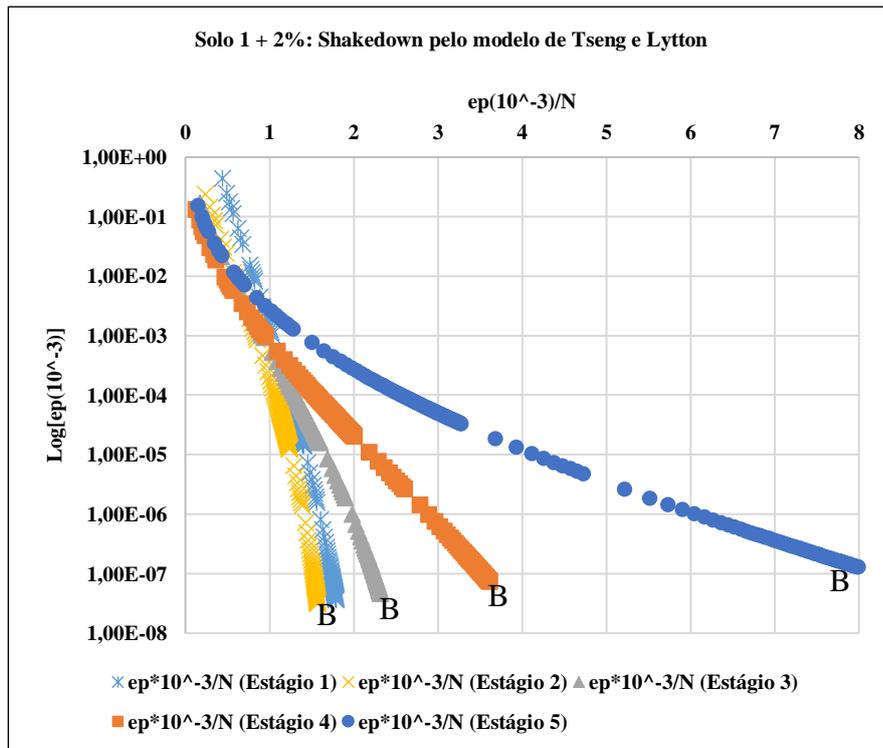


Figura 184: Limites de *Shakedown* do solo 1 estabilizado com 2% de emulsão asfáltica

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 143, é possível concluir que o solo estabilizado com 2% de emulsão não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o solo esteja entrando em colapso.

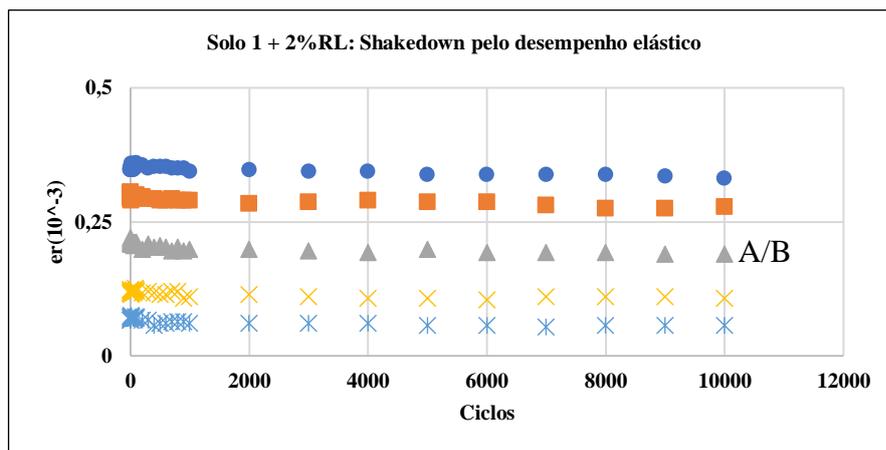


Figura 185: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado com 2% de emulsão

$P$  apresenta oscilações significativas ao longo dos estágios. O valor começa extremamente alto no estágio 1, cai no estágio 2, e volta a subir de forma exponencial nos estágios 4 e 5. Isso reflete que o modelo está capturando o comportamento dinâmico do solo, com o comportamento exponencial se tornando mais crítico nos estágios finais, onde a acumulação de DP se intensifica.

O valor de  $b$  aumenta no estágio 2, sugerindo um crescimento mais lento da função nesse estágio. A redução gradual de  $b$  nos estágios seguintes reflete que o modelo está potencializando o crescimento da função, ajustando-a para refletir a estabilização progressiva do solo com a intensificação do comportamento exponencial.

O coeficiente  $em$  também mostra variações importantes. No estágio 1,  $em$  começa alto, cai drasticamente no estágio 2, e depois aumenta de forma contínua até atingir um valor muito elevado no estágio 5. Esse padrão reflete uma ampliação da função, com uma variação significativa na sua amplitude ao longo dos estágios. Dos solos analisados, o solo estabilizado com 2,5% de emulsão é o que atinge o maior valor de  $em$ , conforme é possível se visualizar na Tabela 30. Assim como no solo estabilizado com 2% de emulsão, o solo estabilizado com 2,5% de emulsão atinge estados críticos de no quarto e quinto estágio.

Tabela 30: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 2,5% de emulsão asfáltica

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,048	0,206	0,136	0,080	0,048
$P$	4,01E+09	7,152	562,113	1,06E+07	1,43E+17
$em$	6,594	0,817	2,043	8,780	125,886
Ajuste $R^2$	0,998	0,994	0,999	0,998	0,996

Os estágios 1, 2 e 3 apresentam um comportamento razoável, próximo ao ideal, com as curvas relativamente próximas da vertical. No entanto, as deformações ainda são significativas nesses primeiros ciclos. Os estágios 4 e 5 mostram um comportamento mais crítico, com as curvas se afastando da vertical e mostrando dispersão significativa, especialmente na região "B". Isso indica que, mesmo após muitos ciclos, o solo ainda está acumulando deformações permanentes, conforme pode ser visualizado no gráfico da Figura 186.

Nota-se neste percentual de estabilização que a emulsão altera o comportamento do solo controle nos estágios 1, 3, 4 e 5. Apenas no estágio 2 o solo se mantém no domínio A. Apesar de estarem no domínio B, os estágios 1 e 3 apresentam deformações permanentes razoáveis, com uma concavidade da curva voltada para a esquerda, o que denota uma tendência á acomodação pós certo número de carregamentos. Um comportamento bastante similar ao solo estabilizado com 1,5%.

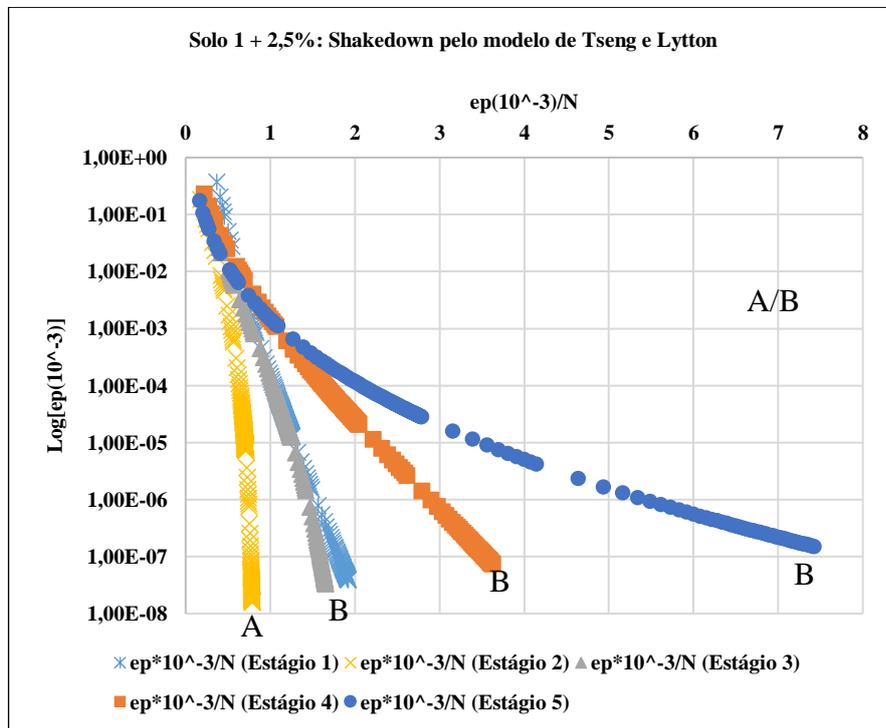


Figura 186: Limites de *Shakedown* do solo 1 estabilizado com 2,5% de emulsão asfáltica

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 187, é possível concluir que o solo estabilizado com 2,5% de emulsão não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o solo esteja entrando em colapso.

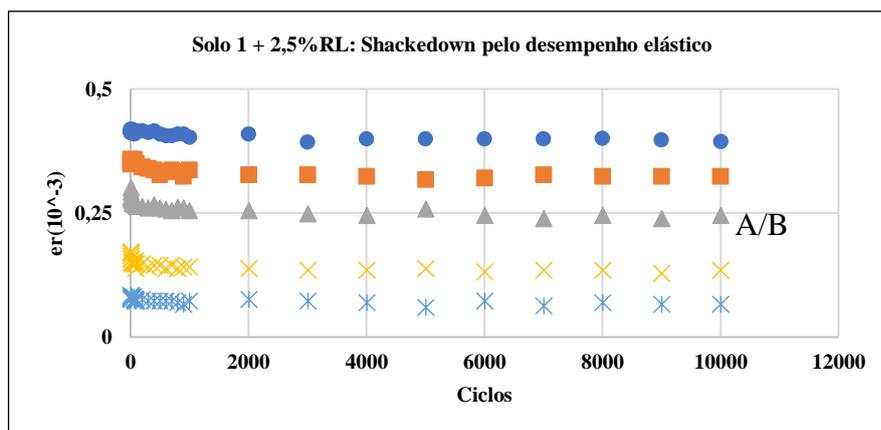


Figura 187: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado com 2,5% de emulsão

O aumento expressivo de  $P$  nos estágios 3 e 4 indica que o comportamento exponencial do solo é extremamente forte nesses estágios, com o material acumulando deformações de forma progressiva. No estágio 5, o valor de  $P$  diminui, o que sugere uma suavização do comportamento exponencial, mas ainda em níveis elevados, mostrando que o solo continua a sofrer grandes deformações.

O valor de  $b$  diminui nos estágios 1, 2 e 3, o que significa que o crescimento da função se torna mais potencializado à medida que o solo passa pelos ciclos de carga iniciais, porém este se ajusta a um valor de  $P$  muito pequeno. Nos estágios 4 e 5, o aumento de  $b$  indica que o crescimento da função se torna mais lento, possivelmente refletindo um comportamento menos intenso da resposta do solo a cargas cíclicas, porém com um valor de  $P$  muito maior, este efeito é compensado por este incremento.

A amplitude da função  $em$  segue uma tendência variável, começando alta, caindo no estágio 2, atingindo um valor aceitável no estágio 3 e depois aumentando drasticamente nos estágios 4 e 5. Isso sugere uma ampliação significativa da resposta da função à medida que os ciclos de carga aumentam.

Tabela 31: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 30% de fresado

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,145	0,136	0,047	0,056	0,086
$P$	0,005	7,905	9,95E+10	4,26E+11	1,46E+08
$em$	1,138	0,481	3,272	7,544	8,750
Ajuste $R^2$	0,993	0,978	0,994	0,999	0,995

Nos estágios Iniciais (1, 2 e 3), o comportamento do composto é próximo ao ideal, com as curvas mais verticais indicando uma tentativa de estabilização rápida após os primeiros ciclos de carga, embora as deformações sejam significativas no início.

Nos estágios avançados (4 e 5), o afastamento das curvas da vertical sugere que o solo estabilizado com 30% de FRSD ainda está acumulando deformações permanentes mesmo após muitos ciclos de carga. As curvas mais inclinadas nos estágios finais indicam que o material pode estar demorando para atingir a fase de *Shakedown* ou pode não estar estabilizando de forma eficiente.

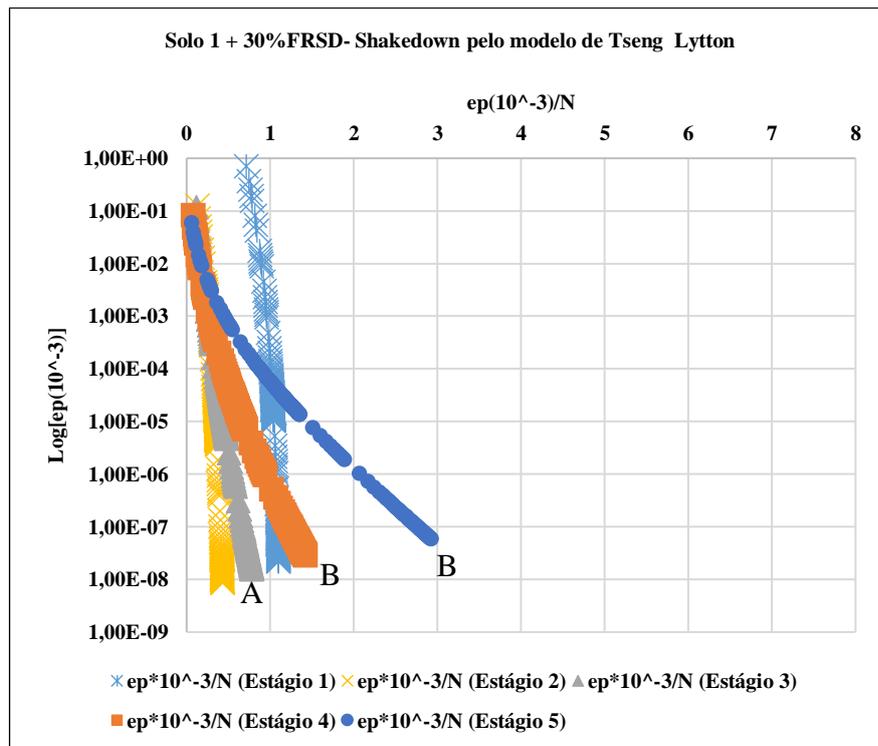


Figura 188: Limites de *Shakedown* do solo 1 estabilizado com 30% de fresado

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 189, é possível concluir que o solo estabilizado com 30% de fresado não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

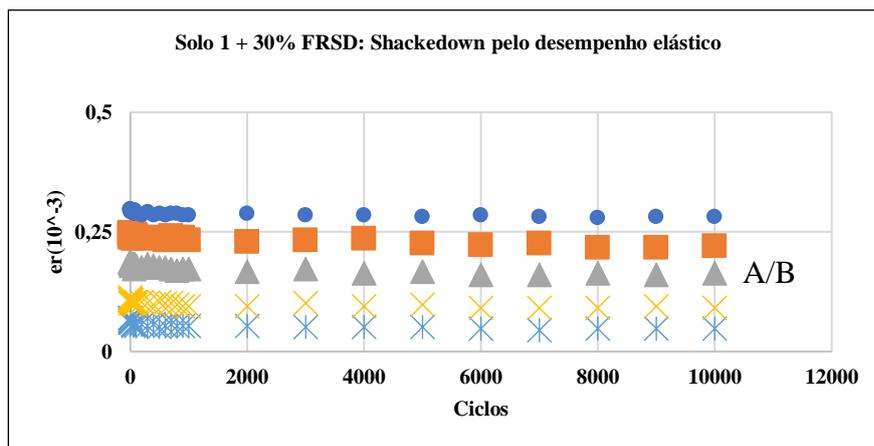


Figura 189: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado 30% de fresado

Para o composto estabilizado com 30% de fresado e 2% de emulsão o valor de  $P$  cresce rapidamente a partir do estágio 2, indicando que o comportamento da função se intensifica à medida que o solo é submetido a mais ciclos de carga. Isso reflete a acumulação exponencial de DP nos estágios mais avançados, sugerindo um comportamento mais crítico do solo, significa que a expressão  $(P/N)$  decai mais lentamente.

O coeficiente  $b$  permanece muito baixo ao longo de todos os estágios, o que indica que o crescimento da função é mais intenso nos ciclos iniciais. Esse comportamento reflete um ajuste acelerado às deformações permanentes do solo, mesmo com o crescimento exponencial capturado por  $P$ .

O coeficiente  $em$  aumenta significativamente a partir do estágio 2, indicando que a amplitude da função cresce de forma considerável, refletindo uma resposta cada vez mais amplificada do solo sob carregamento cíclico. Todas estas informações podem ser conferidas na Tabela 32.

Tabela 32: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 30% de fresado e 2% de emulsão

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,058	0,018	0,024	0,017	0,018
$P$	3,55E+05	4,27E+46	7,39E+38	1,05E+70	1,01E+73
$em$	1,462	168,532	523,160	4,72E+05	4,14E+07
Ajuste $R^2$	0,991	0,993	0,984	0,982	0,980

Nos estágios Iniciais (1, 2 e 3), o comportamento do composto é próximo ao ideal, com as curvas mais verticais indicando uma tentativa de estabilização rápida após os primeiros ciclos de carga, embora as deformações sejam significativas no início. Apesar desse bom

comportamento, observa-se que nos ciclos 3, 4 e 5 o comporto tende a se verticalizar, sendo esta tendência mais acentuada no quarto e quinto ciclo de carregamentos.

Nos estágios avançados (4 e 5), o afastamento das curvas da vertical sugere que o solo estabilizado com 30% de FRSD e 2% de emulsão ainda está acumulando deformações permanentes mesmo após muitos ciclos de carga. As curvas mais inclinadas nos estágios finais indicam que o material pode estar demorando para atingir a fase de *Shakedown* ou pode não estar estabilizando de forma eficiente. Além disso, ao se comparar o comportamento do composto com fresado e emulsão, para o comporto estabilizado com as mesmas proporções de fresado, pode se observar uma mudança de comportamento especificamente no quarto ciclo de carregamento. Estas informações podem ser observadas no gráfico da Figura 190.

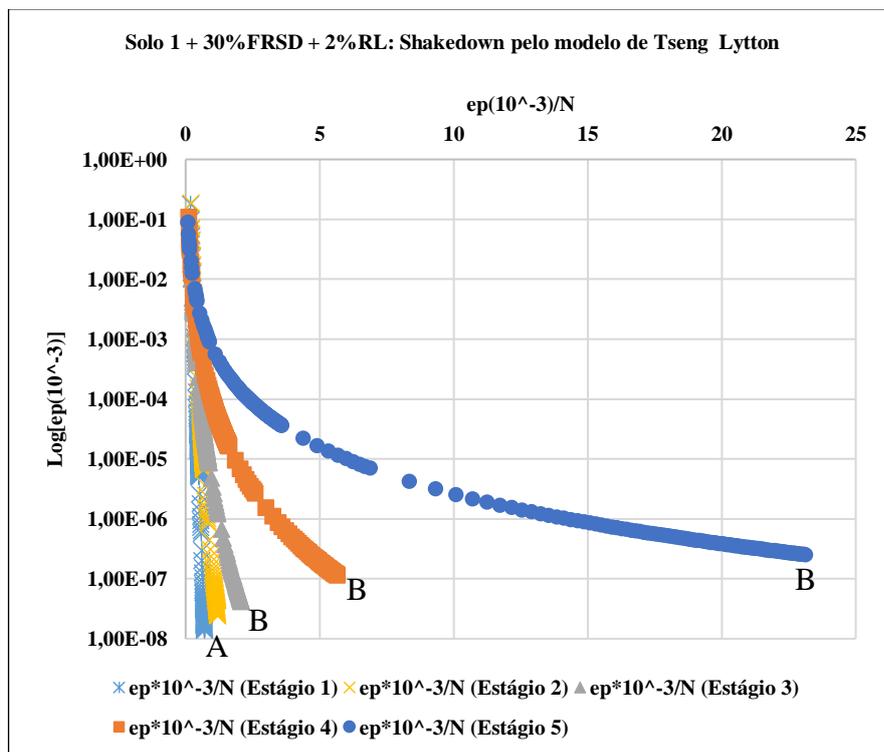


Figura 190: Limites de *Shakedown* do solo 1 estabilizado com 30% de fresado e 2% de emulsão

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 191, é possível concluir que o solo estabilizado com 30% de fresado e 2% de emulsão não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

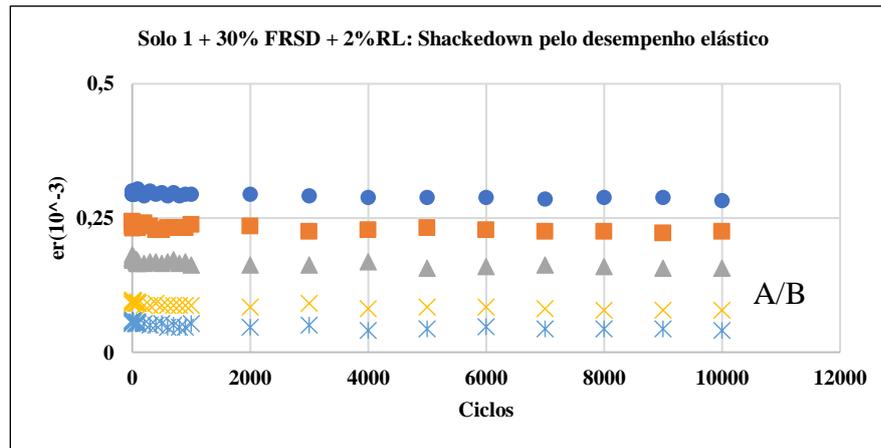


Figura 191: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado 30% de fresado + 2% de emulsão

Para o composto estabilizado com 50% de fresado, o coeficiente  $P$  aumenta drasticamente entre os estágios 2 e 4, atingindo valores extremamente altos. Isso indica que o comportamento exponencial da função se intensifica nesses estágios, refletindo um crescimento significativo das deformações permanentes.

O valor de  $b$  diminui significativamente após o estágio 1, indicando que o crescimento da função se torna mais intenso nos estágios posteriores. Esse comportamento é típico de materiais que estão passando por um ajuste menos gradual ao carregamento.

O coeficiente  $em$  aumenta consideravelmente a partir do estágio 2, atingindo valores muito elevados nos estágios 4 e 5. Isso indica que a amplitude da função está crescendo significativamente, refletindo um comportamento mais amplificado do solo sob carregamento cíclico, conforme dados da regressão que estão na Tabela 33.

Tabela 33: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 50% de fresado

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,168	0,033	0,037	0,017	0,023
$P$	0,028	1,04E+15	2,13E+16	7,53E+63	1,46E+48
$em$	0,864	4,036	7,496	2,62E+04	3,23E+04
Ajuste $R^2$	0,986	0,986	0,989	0,994	0,992

O composto apresenta um comportamento de estabilização rápida nos ciclos iniciais (1, 2 e 3), com as deformações permanentes diminuindo acentuadamente após os primeiros ciclos de carga. O material está se ajustando de forma previsível e estável, sugerindo que ele está operando dentro do domínio A de *Shakedown*.

Nos estágios 4 e 5, o comportamento é mais crítico, com maiores deformações permanentes e uma estabilização mais lenta. O solo ainda está se ajustando ao carregamento

cíclico, mas sem entrar no domínio C, já que não há uma progressão contínua das deformações, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 192.

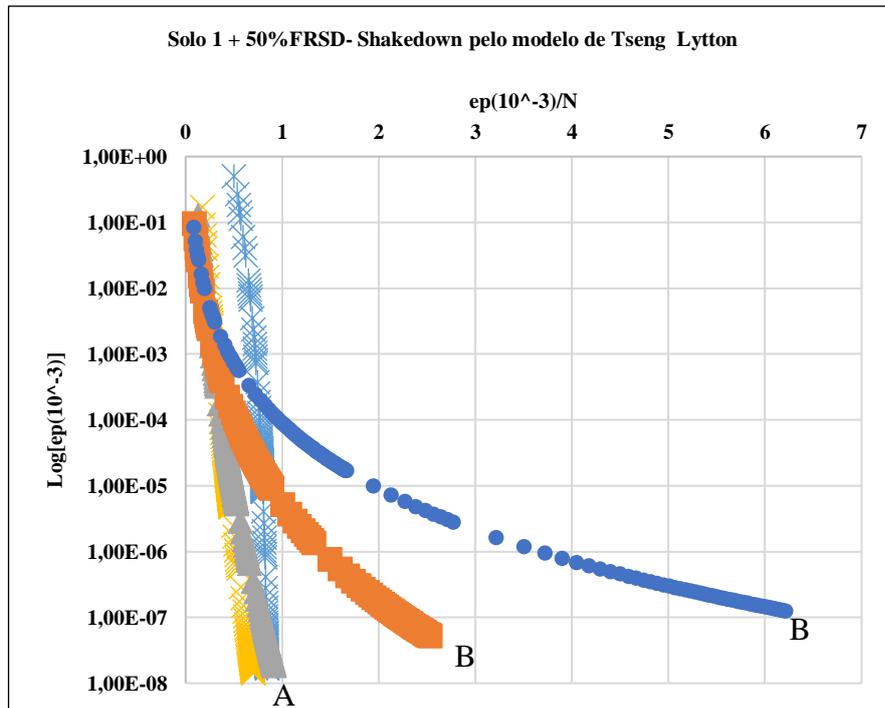


Figura 192: Limites de *Shakedown* do solo 1 estabilizado com 50% de fresado

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 193, é possível concluir que o solo estabilizado com 50% de fresado não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

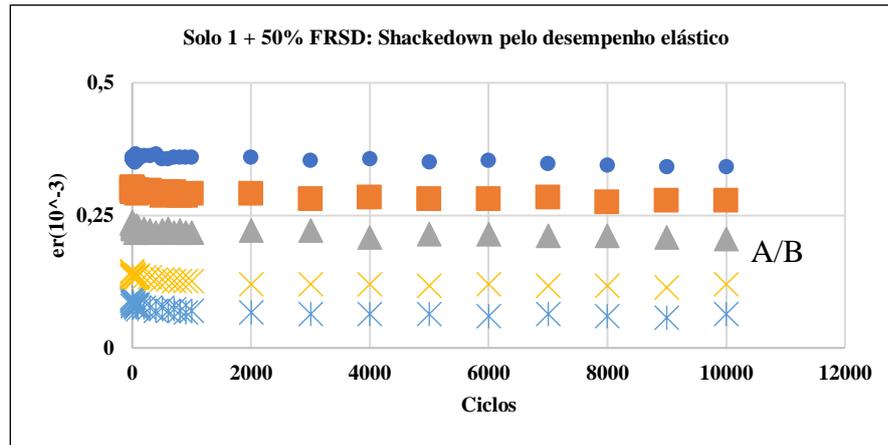


Figura 193: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado 50% de fresado

Para o composto estabilizado com 50% de fresado e 2% de emulsão, o coeficiente  $P$  apresenta um comportamento extremo, com valores muito elevados nos estágios 3, 4 e 5, refletindo um comportamento exponencial acentuado à medida que o solo é submetido a mais ciclos de carga. Quando  $P$  é alto e a variação de  $b$  constante, a função  $f(N)$  cresce mais à medida que  $N$  aumenta até atingir  $em$ .

O coeficiente  $b$  permanece muito baixo em todos os estágios e se estabiliza nos ciclos posteriores, o que indica uma maior dependência da variação de  $P$ .

O coeficiente  $em$  cresce de forma significativa a partir do estágio 3, atingindo níveis muito altos nos estágios 4 e 5. Isso indica que o solo está passando por uma amplificação significativa em sua resposta à carga cíclica.

Tabela 34: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 1 estabilizado com 50% de fresado e 2% de emulsão

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,016	0,074	0,017	0,017	0,017
$P$	5,46E+35	5741,189	2,41E+57	2,25E+73	1,05E+75
$em$	8,261	1,120	1136,141	2,15E+06	2,25E+07
Ajuste $R^2$	0,987	0,984	0,989	0,991	0,993

O composto apresenta um comportamento de estabilização rápida nos ciclos iniciais (1, 2 e 3), com as deformações permanentes diminuindo acentuadamente após os primeiros ciclos de carga. O material está se ajustando de forma previsível e estável, sugerindo que ele está operando dentro do domínio A de *Shakedown*. Todavia, observa-se uma mudança na curva no terceiro ciclo de carregamento, em comparação ao composto estabilizado apenas com 50% de fresado.

Nos estágios 4 e 5, o comportamento é mais crítico, com maiores deformações permanentes e uma estabilização mais lenta. O solo ainda está se ajustando ao carregamento cíclico, mas sem entrar no domínio C, já que não há uma progressão contínua das deformações, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 194.

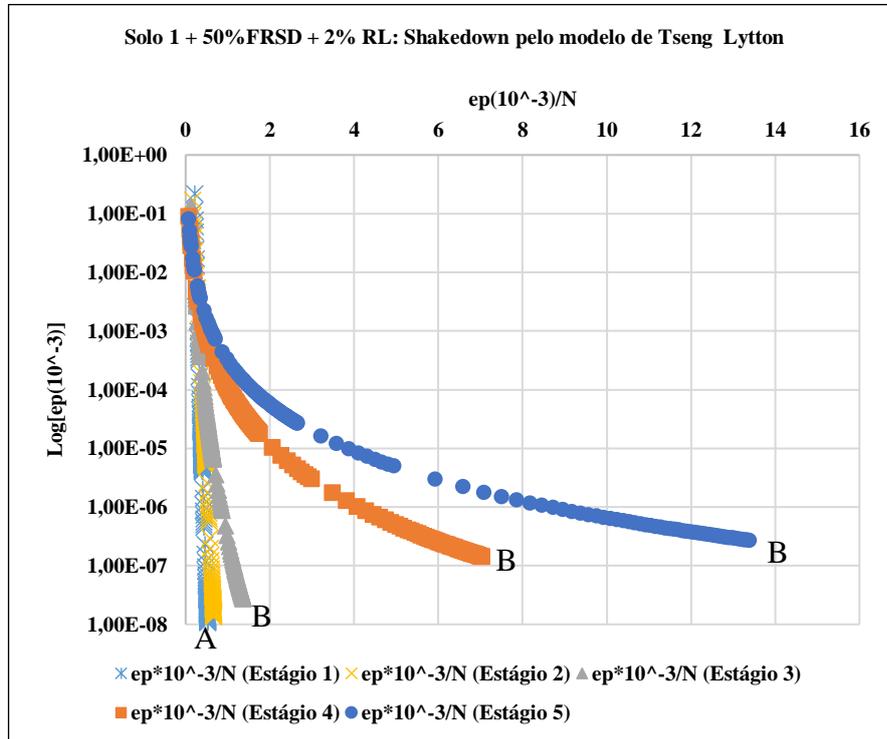


Figura 194: Limites de *Shakedown* do solo 1 estabilizado com 50% de fresado e 2% de emulsão

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 195 é possível concluir que o solo estabilizado com 50% de fresado não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

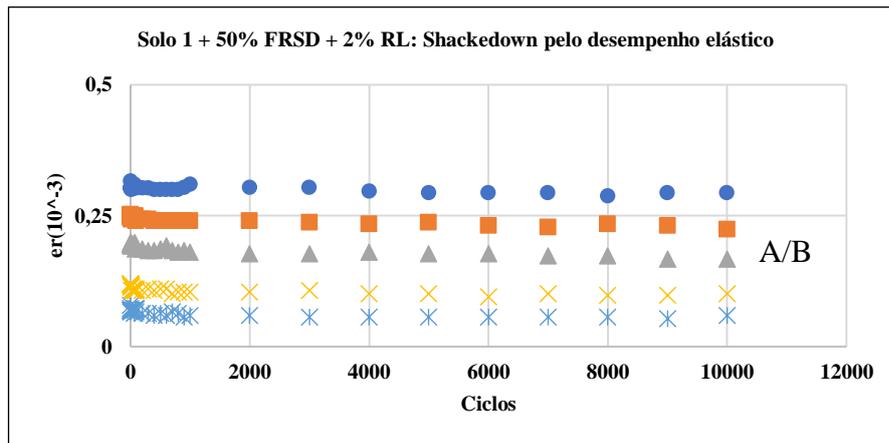


Figura 195: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 1 estabilizado 50% de fresado e 2% de emulsão

### 5.7.2.2 Análise do *Shakedown* para o solo 2

Para o solo controle, o coeficiente  $P$  aumenta significativamente nos estágios 4 e 5, sugerindo um decaimento lento de  $(P/N)$ . Isso reflete que o solo está respondendo de maneira amplificada ao carregamento cíclico nesses estágios.

O coeficiente  $b$  diminui nos estágios 4 e 5, indicando que crescimento da função é intensificado nesses estágios, com a função estabilizando de forma menos gradual. Isso significa que, com o comportamento exponencial esteja atenuado (menor valor no denominador), a resposta da função não cresce de forma intensa.

A amplitude da função  $em$  aumenta demasiadamente nos estágios mais avançados, refletindo uma ampliação significativa da resposta do solo ao carregamento cíclico.

Tabela 35: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,119	0,270	0,191	0,055	0,060
$P$	0,070	0,656	0,308	9,32E+05	1,07E+08
$em$	0,983	0,983	1,597	5,798	15,890
Ajuste $R^2$	0,998	0,985	0,987	0,991	0,997

O solo apresenta uma rápida estabilização, com as deformações permanentes diminuindo significativamente nos primeiros ciclos de carga. Isso sugere que o material está operando dentro dos domínios A ou B de *Shakedown* nos estágios 1, 2 e 3, com rápida adaptação às cargas repetidas e uma estabilização quase imediata.

Nos estágios 4 e 5 O comportamento é mais crítico, com maiores deformações permanentes iniciais e uma estabilização mais lenta. A curva continua a se inclinar ao longo de

mais ciclos, sugerindo que o solo ainda está em processo de ajuste, mas sem atingir um comportamento de falha contínua, o que permite descartar o domínio C, conforme pode ser visto na Figura 196.

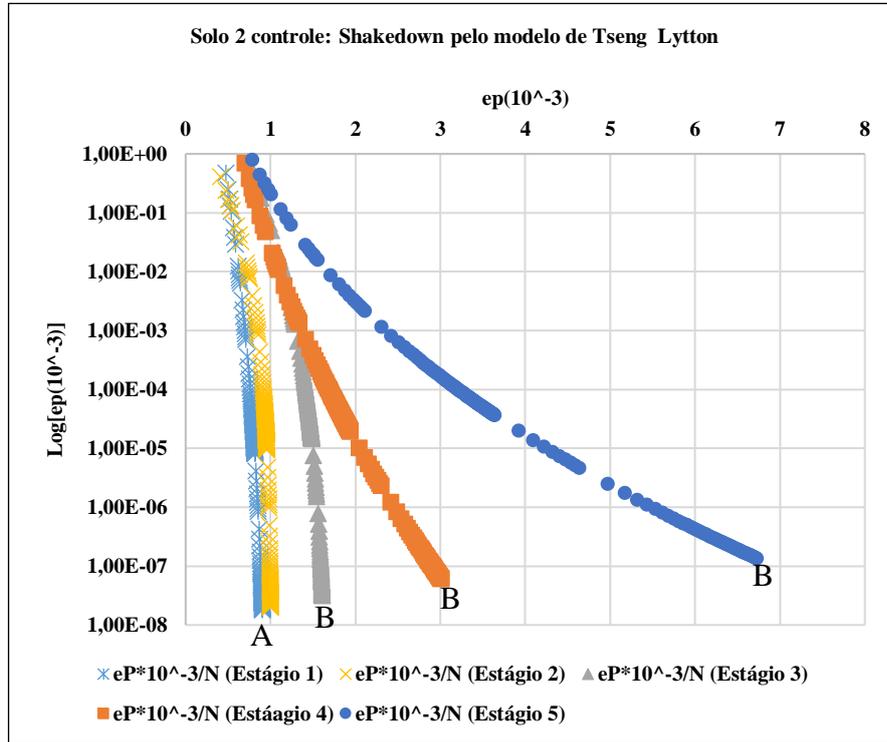


Figura 196: Limites de *Shakedown* do solo 2

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 197, Figura 195 é possível concluir que o solo controle não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

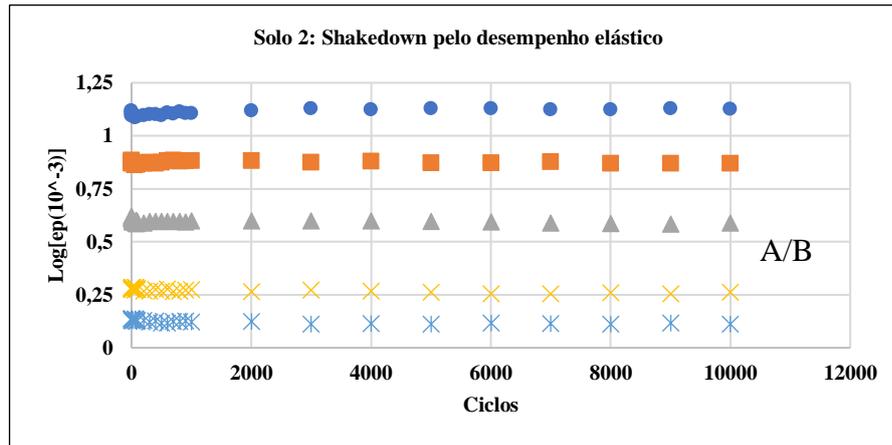


Figura 197: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 2

Para o solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão, estágios 2, 3 e 4,  $P$  atinge valores extremamente elevados, sugerindo um comportamento exponencial muito acentuado. Isso reflete um aumento significativo nas deformações permanentes do solo, principalmente nos estágios intermediários.

O coeficiente  $b$  permanece muito baixo na maioria dos estágios, sugerindo que o crescimento da função é mais intenso. No entanto, no estágio 5,  $b$  aumenta, indicando um crescimento menos acelerado. Porém, com um valor de  $P$  muito pequeno, indica um salto nos valores iniciais de DP.

A amplitude  $em$  aumenta consideravelmente nos estágios 3 e 4, indicando uma resposta muito amplificada do solo. No estágio 5, a amplitude diminui, refletindo uma estabilização mais eficiente.

Nos Estágios 2, 3 e 4, o aumento de  $P$  combinado com o coeficiente  $b < 1$  resulta em uma estabilização mais lenta da função. A função decresce de maneira mais suave, mas com uma amplificação significativa nos estágios intermediários. No estágio 5, o comportamento é mais controlado devido à diminuição de  $P$  e o aumento de  $b$ .

Tabela 36: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,109	0,016	0,013	0,020	0,113
$P$	4,79E-02	8,46E+44	1,33E+55	2,39E+51	3,86
$em$	1,078	93,154	157,402	14487,371	9,850
Ajuste $R^2$	0,998	0,991	0,989	0,998	0,999

O gráfico da Figura 198, observamos que nos estágios 1 a 3, as deformações permanentes acumulam-se rapidamente, com um decrescimento acentuado das curvas,

indicando que o solo está ajustando-se às cargas iniciais. No estágio 4, a curva se torna mais horizontal, sugerindo que o acúmulo de deformações maior, com uma tendência ruim de estabilização. No estágio 5, o comportamento da curva é ainda mais prolongado, refletindo um acúmulo de DP maior nos ciclos iniciais, em que as deformações acumulam-se de forma muito maior.

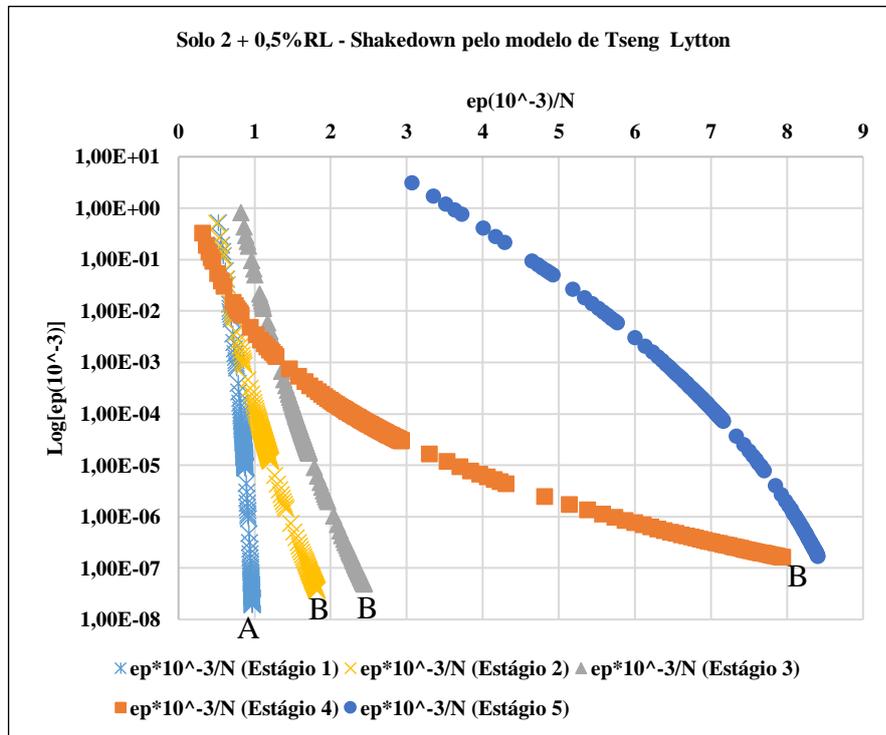


Figura 198: Limites de *Shakedown* do solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 199Figura 195 é possível concluir que o solo controle não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso. Excepcionalmente, no quinto ciclo de carregamento, observa-se no início do ciclo uma perda de resistência resiliente, mas que se estabiliza mais adiante.

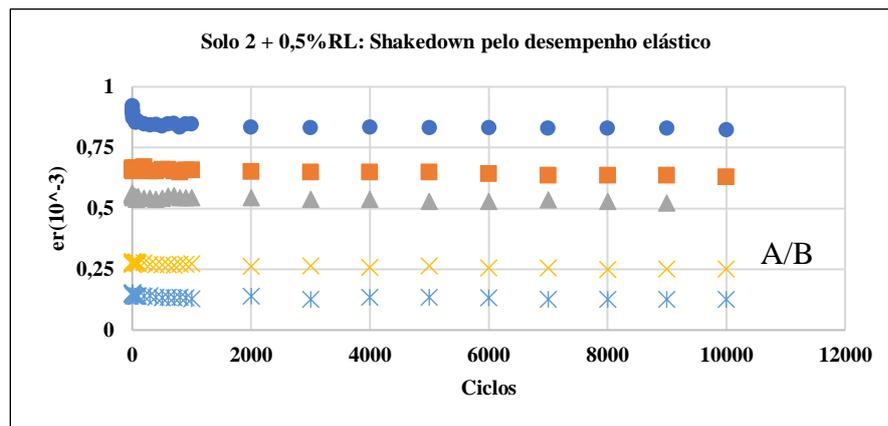


Figura 199: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 0,5% de emulsão

O valor de  $P$  aumenta progressivamente ao longo dos estágios, começando em  $2,91E-01$  no estágio 1 e alcançando  $5,17E+02$  no estágio 5 para o solo 2 estabilizado com 1% de emulsão. Esse crescimento gradual de  $P$  reflete um comportamento exponencial cada vez mais acentuado da função. Nos estágios iniciais, o acúmulo de deformações permanentes ocorre de forma mais moderada, enquanto nos estágios finais, com valores elevados de  $P$ , o acúmulo de deformações se torna mais persistente. Esse comportamento indica que o solo acumula mais deformações permanentes à medida que os ciclos de carga aumentam, especialmente nos estágios finais, quando  $P$  atinge valores extremamente altos.

O coeficiente  $b$  começa em 0,123 no estágio 1, atinge seu valor máximo de 0,277 no estágio 2, e depois oscila, com valores mais baixos nos estágios seguintes. A variação de  $b$  sugere que o comportamento de acúmulo de deformações permanentes não é linear ao longo dos estágios. O aumento de  $b$  no Estágio 2 implica um crescimento mais lento da função nesse ponto.

O valor de  $em$  começa em 1,328 no estágio 1, mantém-se estável até o estágio 2, mas a partir do estágio 3, cresce de forma significativa, chegando a 8,157 no estágio 5, de acordo com a Tabela 37. Esse aumento expressivo de  $em$  indica que a amplitude das deformações permanentes se torna cada vez maior à medida que o número de ciclos aumenta. A elevação de  $em$  nos estágios finais reflete uma amplificação significativa na resposta do solo, sugerindo que o material está apresentando uma maior vulnerabilidade às deformações permanentes com o avanço dos ciclos de carga.

Tabela 37: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
b	0,123	0,277	0,110	0,130	0,144
P	2,91E-01	0,566	2,801	4,89E+01	5,17E+02
em	1,328	1,226	2,310	3,360	8,157
Ajuste R <sup>2</sup>	0,999	0,987	0,994	0,992	0,999

No gráfico da Figura 200, observamos que quanto mais vertical a curva, como ocorre nos estágios 1 e 2, isso indica que o solo está tendendo à estabilização mais rapidamente, o que sugere que o solo está se classificando no Domínio A, região onde as deformações permanentes se acumulam de forma controlada e o material resiste bem às cargas cíclicas. Esse comportamento é típico de solos que atingem um equilíbrio estável após poucos ciclos de carga, sendo que o estágio 3 se apresenta como de transição.

Por outro lado, nos estágios 4 e 5, o solo está em um estado de instabilidade maior, embora não a ponto de colapsar. Nesse caso, o solo se classificaria no Domínio B, o que representa um estado de atenção. Esse comportamento revela que o solo demorou mais para se estabilizar, o que pode indicar um acúmulo maior de deformações permanentes ao longo dos ciclos, sugerindo uma resistência menor à fadiga e uma maior vulnerabilidade com o tempo.

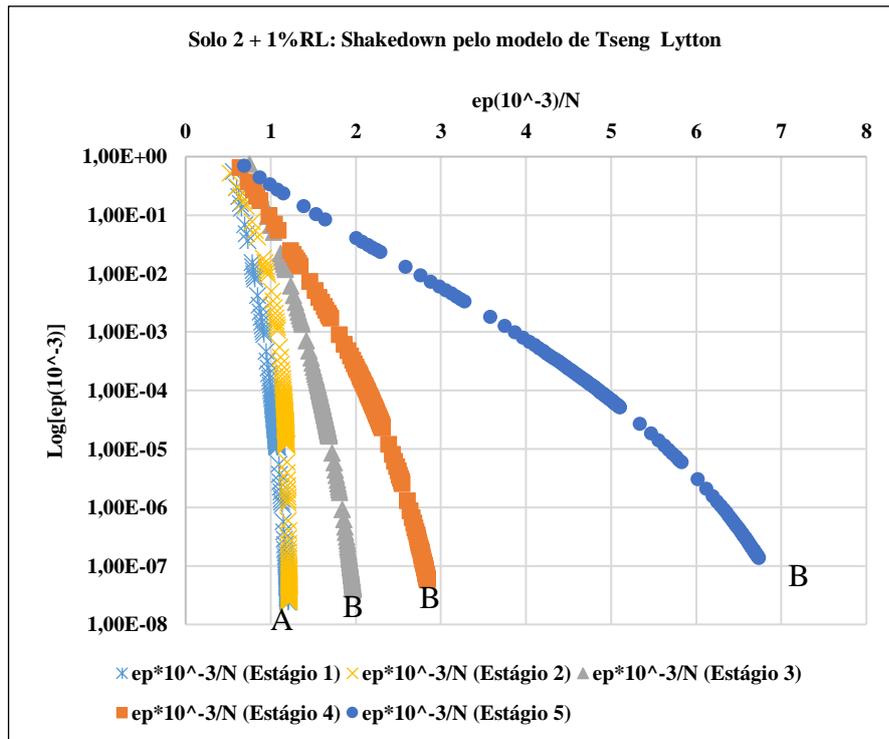


Figura 200: Limites de *Shakedown* do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 201Figura 195 é possível concluir que o solo controle não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

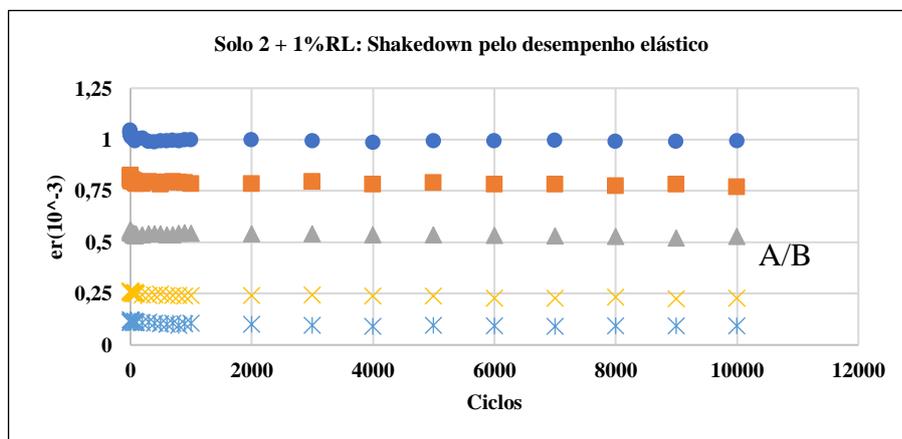


Figura 201: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão

O coeficiente  $P$  começa em 0,261 no estágio 1 e sobe de forma contínua ao longo dos estágios, alcançando valores extremamente altos nos estágios 4 e 5. Esse aumento expressivo indica que o comportamento exponencial da função se intensifica à medida que os ciclos de

carga avançam. Nos primeiros estágios, com valores menores de  $P$ , o acúmulo de deformações permanentes ocorre de maneira mais rápida, o que sugere que o solo reage de forma mais imediata às cargas aplicadas. Nos estágios finais, o aumento significativo de  $P$  implica que o acúmulo de deformações permanentes ainda acontece, mas de forma mais lenta, prolongando o tempo necessário para atingir a estabilização, especialmente à medida que o número de ciclos aumenta.

O coeficiente  $b$  começa em 0,099 no estágio 1, aumenta para 0,153 no estágio 2, mas depois decresce drasticamente para 0,022 no estágio 4 e 0,043 no estágio 5. Essa trajetória de  $b$  indica que, nos estágios iniciais, o solo acumula deformações de maneira mais lenta (como refletido pelo aumento de  $b$  no estágio 2), mas à medida que o solo é submetido a mais ciclos de carga, o crescimento da função se torna maior.

O coeficiente  $em$  apresenta um comportamento crescente ao longo dos estágios, começando em 1,185 no estágio 1, crescendo modestamente até 3,124 no estágio 3, e então saltando para valores muito elevados nos estágios 4 e 5, atingindo 224,703 e 84,679, respectivamente. Esse aumento acentuado de  $em$  nos estágios finais reflete uma amplificação significativa da resposta do solo. Isso indica uma maior vulnerabilidade do material à medida que os ciclos de carga avançam, revelando uma amplificação considerável na deformação acumulada, conforme dados da regressão exibidos na Tabela 38.

Tabela 38: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 1,5% de emulsão

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,099	0,153	0,077	0,022	0,043
$P$	0,261	0,913	3,80E+02	7,48E+35	1,58E+16
$em$	1,185	1,296	3,124	224,703	84,679
Ajuste $R^2$	0,997	0,984	0,992	0,996	0,999

As curvas mais verticais dos Estágios 1 e 2 mostram um comportamento típico de solos mais estáveis no Domínio A, o estágio 3 apresenta-se como transicional, enquanto as curvas mais horizontais são dos estágios 4 e 5, que indicam que o solo está no Domínio B, apresentando um acúmulo de deformações mais lento e progressivo e com necessidade de atenção, conforme pode ser visto na Figura 202.

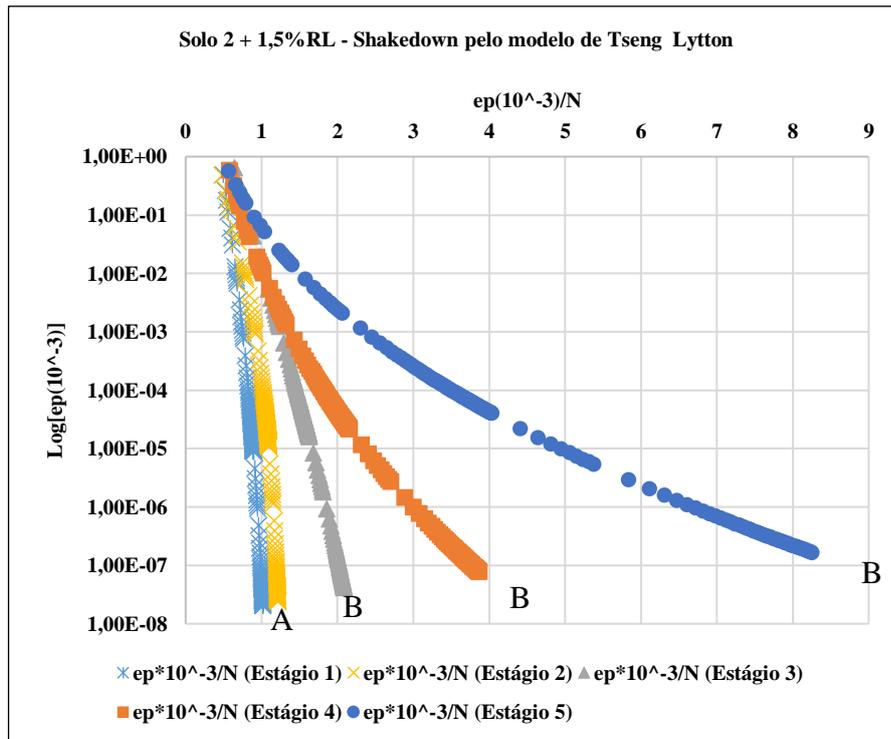


Figura 202: Limites de *Shakedown* do solo 2 estabilizado com 1,5% de emulsão

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 203Figura 195 é possível concluir que o solo controle não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

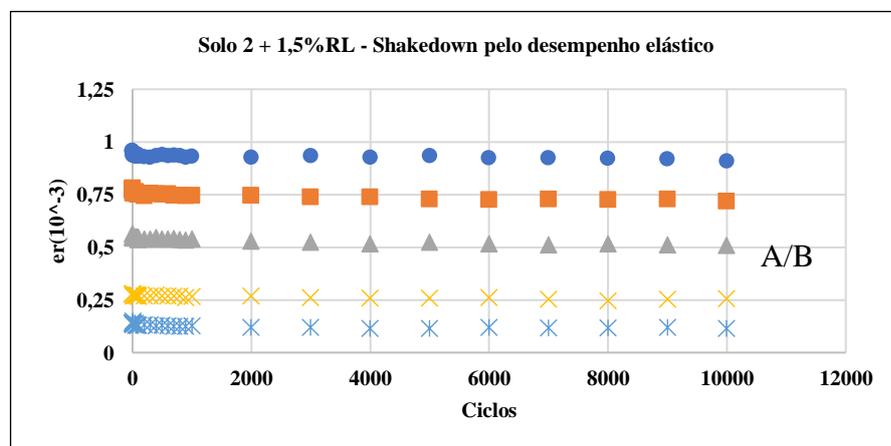


Figura 203: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 1,5% de emulsão

O coeficiente  $P$  apresenta um crescimento extremamente significativo ao longo dos estágios, começando. Esse aumento reflete uma intensificação do comportamento exponencial da função com o avanço dos ciclos de carga e com um decaimento mais lento e  $(P/N)$  a medida

que os ciclos avançam. Nos estágios iniciais, com  $P$  baixo, o solo tende a acumular deformações de maneira rápida. Nos estágios mais avançados, o solo demora mais para atingir a estabilização, refletindo um acúmulo mais prolongado de deformações permanentes, com o comportamento exponencial se tornando dominante nos estágios finais.

O valor de  $b$  começa em 0,101 no estágio 1, aumentando para 0,258 no estágio 2, mas depois diminui drasticamente nos estágios subsequentes, atingindo 0,017 no Estágio 5. Esse padrão sugere que, nos estágios finais, o solo acumula deformações mais rapidamente.

O coeficiente  $em$  em começa em 0,477 no estágio 1, mantendo-se baixo até o estágio 2, mas experimenta um aumento significativo nos estágios seguintes, atingindo 5855,871 no estágio 5. Esse aumento substancial nos valores de  $em$  reflete uma amplificação drástica na resposta do solo aos ciclos de carga, especialmente nos estágios finais, sugerindo que o material está sofrendo uma ampliação considerável nas deformações permanentes com o avanço dos ciclos, conforme Tabela 39.

Tabela 39: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 30% de fresado

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,101	0,258	0,041	0,029	0,017
$P$	4,32E-04	0,424	5,61E+08	3,50E+22	1,46E+58
$em$	0,477	0,458	2,604	18,803	5855,871
Ajuste $R^2$	0,989	0,960	0,975	0,988	0,992

O gráfico da Figura 204 reflete a transição do comportamento do solo do Domínio A nos estágios iniciais para o Domínio B no estágio final. O solo, ao receber 30% de fresado, apresenta uma boa resposta inicial, estabilizando-se rapidamente, mas conforme o número de ciclos aumenta, o acúmulo de deformações se prolonga, exigindo maior atenção quanto à durabilidade e à performance sob cargas cíclicas a longo prazo. Até o presente momento, é o melhor comportamento para o composto com solo 2.

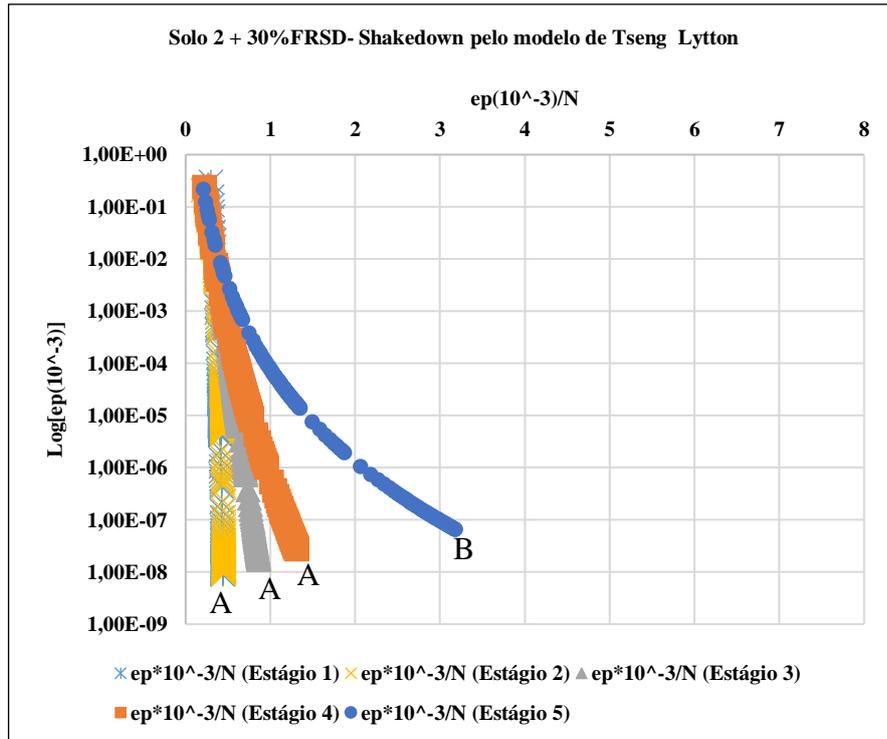


Figura 204: Limites de *Shakedown* do solo 2 estabilizado com 30% de fresado

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 205Figura 195 é possível concluir que o solo controle não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

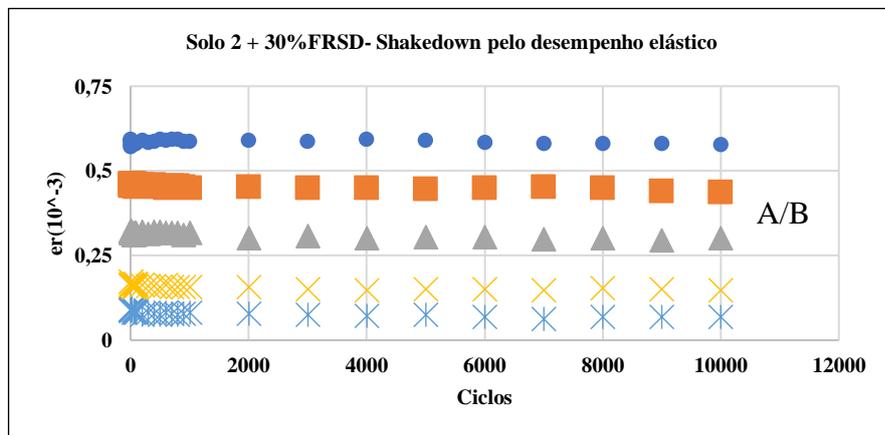


Figura 205: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão

Nos primeiros estágios, com valores menores de  $P$ , o decaimento de  $(P/N)^b$  ocorre mais rapidamente, o que significa que o solo se estabiliza mais rapidamente sob os ciclos iniciais de carga. Porém, à medida que  $P$  aumenta de forma drástica nos estágios finais, a taxa

de decaimento se torna muito mais lenta, e o acúmulo de deformações permanentes persiste por um número maior de ciclos. Esse comportamento indica que o solo passa a sofrer uma maior vulnerabilidade ao longo do tempo, levando mais tempo para atingir a estabilização final. Portanto, o aumento de  $P$  não só desacelera o decaimento de  $(P/N)^b$ , mas também prolonga o processo de estabilização do solo, refletindo maior acúmulo de deformações permanentes, especialmente nos estágios finais de carga.

O coeficiente  $b$  começa relativamente alto em 0,216 no estágio 1 e 0,221 no estágio 2, mas diminui para 0,019 no estágio 4. Este comportamento sugere que o acúmulo de deformações permanentes nos primeiros estágios ocorre de forma controlada, enquanto, nos estágios posteriores, o solo tende a acumular deformações de maneira rápida, com uma estabilização progressiva.

O coeficiente  $em$  começa em 0,501 no estágio 1 e aumenta significativamente nos estágios seguintes, atingindo 493,502 no estágio 4 e 699,748 no estágio 5. Esse crescimento expressivo de  $em$  reflete uma amplificação considerável da resposta do solo nos estágios finais, sugerindo que o material está acumulando deformações permanentes de forma muito mais pronunciada à medida que os ciclos de carga aumentam, conforme pode ser conferido na Tabela 40.

Tabela 40: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,216	0,221	0,067	0,019	0,029
$P$	6,26E-02	1,113	4,91E+03	1,18E+46	3,28E+30
$em$	0,501	0,732	2,162	493,502	699,748
Ajuste $R^2$	0,996	0,988	0,990	0,994	0,999

O gráfico da Figura 206 denota que houve um efeito da emulsão no comportamento do solo, em especial no quarto ciclo de carregamento. O solo, ao receber 30% de fresado e 1% de emulsão, apresenta uma boa resposta inicial, entre os ciclos 1 e 3, estabilizando-se rapidamente, porém conforme o número de ciclos aumenta, o acúmulo de deformações se prolonga, exigindo maior atenção quanto à durabilidade e à performance sob cargas cíclicas a longo prazo.

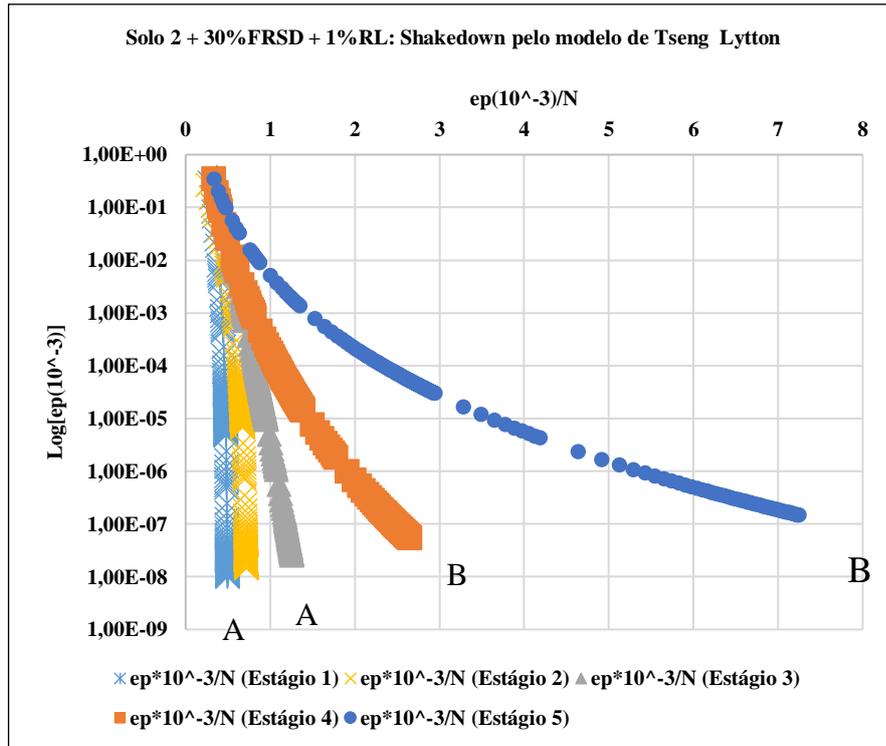


Figura 206: Limites de *Shakedown* do solo 2 estabilizado com 30% de fresado e 1% de emulsão

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 207/Figura 195 é possível concluir que o solo controle não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

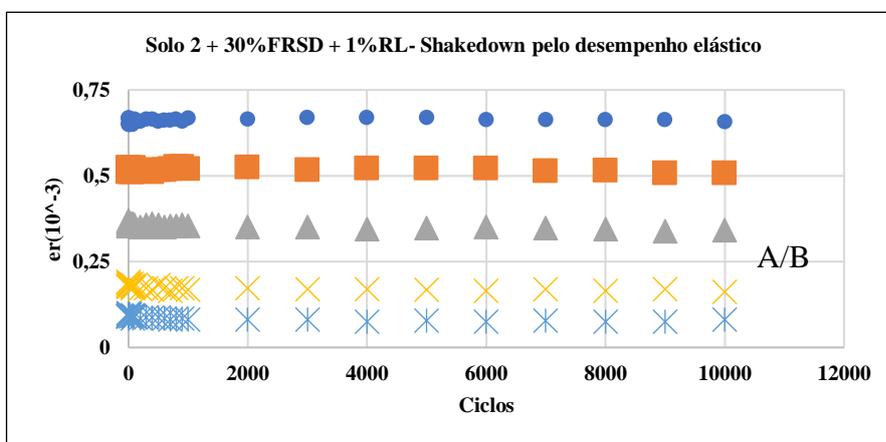


Figura 207: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 1% de emulsão

Quando o coeficiente  $P$  aumenta, a fração  $(P/N)$  se torna maior, o que significa que a expressão decai mais lentamente à medida que o número de ciclos  $N$  aumenta. Isso ocorre

porque o aumento de  $P$  reduz a taxa de diminuição da fração conforme  $N$  aumenta, prolongando o acúmulo de deformações permanentes e retardando a estabilização da função.

Nos estágios finais do vemos um comportamento claro desse efeito. Nos Estágios 4 e 5,  $P$  atinge valores extremamente altos. Isso significa que a fração diminui muito mais devagar com o aumento de  $N$ , indicando que o solo está demorando mais para se estabilizar. O acúmulo de DP continua ocorrendo, mas de forma mais lenta e prolongada, com a função levando mais tempo para atingir o equilíbrio.

Além de  $P$ , o coeficiente  $b$  controla a taxa de decaimento da função. Quando  $b$  é baixo, o decaimento da função é mais lento, o que significa que a função cresce mais rapidamente nos estágios iniciais. Isso é refletido nos Estágios 4 e 5, onde  $b$  é 0,019 e 0,063, respectivamente. Com  $b$  baixo, o acúmulo de DP é mais agressivo, mas o aumento de  $P$  faz com que a estabilização demore mais para ocorrer.

O coeficiente  $em$  começa relativamente alto em 4,025 no Estágio 1, mas cai para 0,668 no estágio 2, refletindo uma estabilização temporária. A partir do estágio 3,  $em$  aumenta novamente, atingindo um pico em 833,454 no estágio 4, o que sugere uma amplificação significativa da resposta do solo à carga. No estágio 5, em volta a um valor mais controlado de 16,687, mostrando que, apesar da amplificação no estágio 4, o solo está retomando uma resposta mais suave nos estágios finais, conforme pode ser visto na Tabela 41.

Tabela 41: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 50% de fresado

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,026	0,133	0,074	0,019	0,063
$P$	5,04E+16	4,921	1,32E+04	1,96E+48	1,87E+10
$em$	4,025	0,668	1,607	833,454	16,687
Ajuste $R^2$	0,998	0,980	0,990	0,996	0,999

O Solo 2 + 50% FRSD apresenta um comportamento inicialmente estável (Domínio A) nos três primeiros estágios. No entanto, nos estágios mais avançados (Estágios 4 e 5), o material entra em uma fase de instabilidade (Domínio B), refletida pela concavidade da curva, deixando-a mais horizontal. Isso sugere que, sob carregamento cíclico prolongado, o solo está demorando mais para estabilizar-se e acumulando deformações permanentes em um ritmo mais lento, o que pode exigir uma avaliação mais cuidadosa para garantir sua durabilidade a longo prazo, conforme pode ser visto na Figura 208.

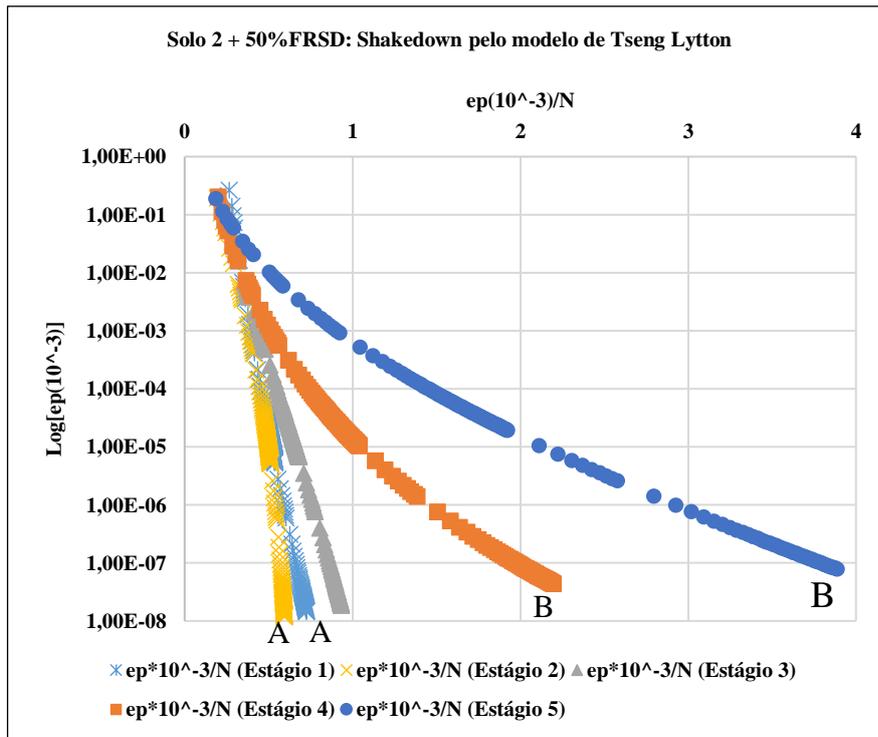


Figura 208: Limites de *Shakedown* do solo 2 estabilizado com 50% de fresado

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 209/Figura 195 é possível concluir que o solo controle não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso.

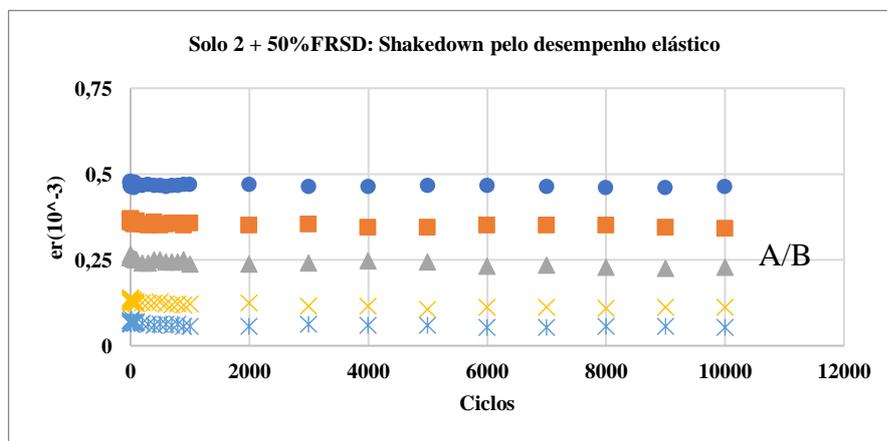


Figura 209: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 50% de fresado

No estágio 1,  $P$  é extremamente alto, o que resulta em um decaimento muito lento de  $(P/N)$  prolongando a estabilização da função. Conforme  $P$  diminui no estágio 2 para  $1,94E+10$ , o decaimento ocorre de forma mais acelerada, indicando que a função estabiliza mais

rapidamente. Nos Estágios 3, 4 e 5,  $P$  aumenta muito o que causa um decaimento muito lento da expressão ( $P/N$ ). Isso significa que a estabilização do solo é muito mais prolongada nesses estágios, e o acúmulo de deformações permanentes persiste por um número maior de ciclos. O solo, portanto, demora muito mais para atingir o equilíbrio (valor assintótico da função).

O valor de  $b$  começa relativamente baixo e aumenta no estágio 2 para, mas retorna a valores baixos nos estágios seguintes. Esse comportamento sugere que o acúmulo de deformações permanentes é menos pronunciado no estágio 2, mas, à medida que  $b$  diminui, a estabilização se torna acelerada nos estágios iniciais. Isso implica que, mesmo com o aumento de  $P$ , a resistência ao acúmulo de DP não é suficiente para evitar a instabilidade no longo prazo.

O coeficiente  $em$  mostra um aumento expressivo ao longo dos estágios. Nos estágios 1 e 2, os valores permanecem relativamente constantes em torno de 3,887 e 3,894, respectivamente. No entanto, a partir do Estágio 3, há uma ampliação significativa com. Isso indica que o solo está respondendo de forma muito mais agressiva às cargas cíclicas nos estágios avançados, com uma amplificação expressiva da deformação permanente, conforme pode ser conferido na Tabela 42.

Tabela 42: Coeficientes da regressão não linear para o modelo de Tseng e Lytton do solo 2 estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão

Valores da regressão	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5
$b$	0,019	0,039	0,014	0,015	0,019
$P$	3,46E+19	1,94E+10	6,98E+65	2,10E+71	2,14E+58
$em$	3,887	3,894	979,196	4,33E+04	2,48E+05
Ajuste $R^2$	0,976	0,962	0,969	0,976	0,992

Observa-se na Figura 210 que os primeiros estágios apresentam um rápido decréscimo na taxa de acumulação de deformação (evidente na forma como as curvas caem de forma acentuada nos estágios 1 e 2). À medida que os ciclos avançam, há uma desaceleração no aumento da deformação, especialmente nos estágios mais avançados (Estágios 4 e 5), onde as curvas se tornam mais estáveis e praticamente lineares no final do gráfico. Porém, é possível se verificar claramente o efeito da emulsão no estágio 5, comparando o comportamento do composto com seu par sem emulsão.

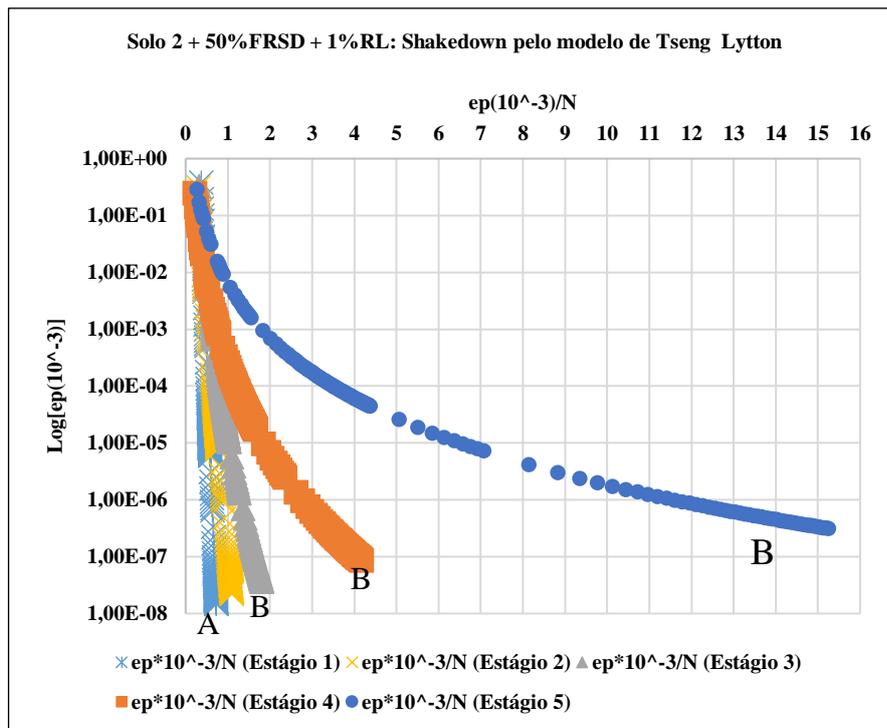


Figura 210: Limites de *Shakedown* do solo 2 estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão

Com base no comportamento observado no gráfico da Figura 211Figura 195 é possível concluir que o solo controle não perde resistência, não há uma diminuição súbita da resposta elástica ao longo dos ciclos, o que indica que o material está operando dentro dos domínios A ou B, de acordo com o modelo de *Shakedown*, descartando que o composto esteja entrando em colapso

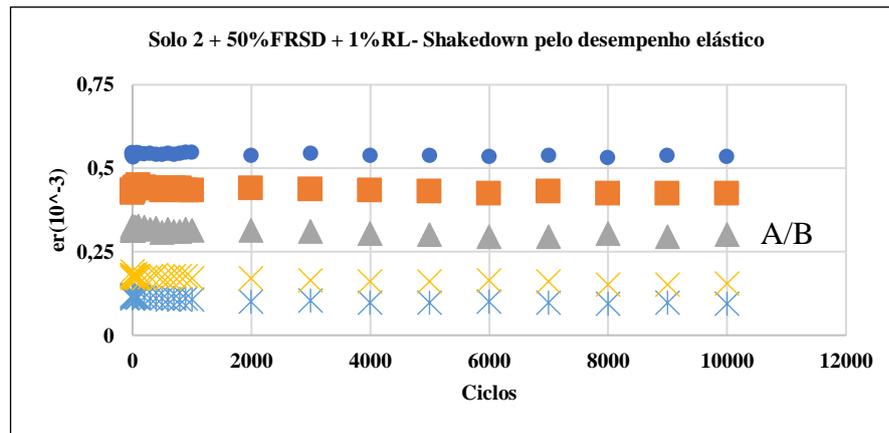


Figura 211: Limites de *Shakedown* utilizando a resposta elástica do solo 2 estabilizado com 50% de fresado e 1% de emulsão

### 5.7.3 Influência do multiestágio na regressão não linear

Devido à mudança da taxa de acumulação da deformação permanente, conforme visto e analisado no item 5.7 Análise do coeficiente angular e linear da linearização da DP, o ajuste da regressão não linear considerando-se todos os pontos de DP não ajusta corretamente. De forma geral, a função prevista tem uma taxa de crescimento menor do que os valores observados. A variável  $em$ , que representa a assíntota da função e o limite do decaimento de  $(P/N)^b$ , é ou calculada em um valor inferior. Apesar dessa diferença no ajuste da função não ser tão significativo nos 10000 ciclos de carregamento, podem impactar um pouco mais a modelagem para ciclos maiores. Para corrigir esta inconsistência é necessário desconsiderar os dados observados iniciais que possuem taxa de acúmulo de DP distinta dos restantes dos dados observados.

Para exemplificar esta diferença, foi utilizado o algoritmo apresentado no ANEXO E que realiza o ajuste de um modelo exponencial para prever a deformação permanente ( $ep$ ) em função de um número de ciclos de carga ( $N$ ) em experimentos de comportamento de materiais, como pavimentos. O ajuste é feito utilizando técnicas de otimização não linear para encontrar os melhores parâmetros do modelo, baseando-se em dados experimentais fornecidos em um arquivo Excel.

Carregamento dos Dados: O código começa carregando um arquivo Excel utilizando a biblioteca pandas. Esse arquivo contém os dados experimentais que relacionam o número de ciclos de carga ( $N$ ) e a deformação permanente ( $ep$ ).

O modelo usado para descrever a deformação permanente é uma equação exponencial:  $ep(N) = em * np.exp(-(P / N) ** b)$  – (no formato Python).

Inicialmente, o algoritmo tenta ajustar o modelo usando três pontos experimentais específicos, onde (N) assume valores de 100, 1000 e 10.000. Para isso, define-se um sistema de equações que relaciona as deformações observadas para esses valores de (N) com as previsões do modelo, e busca-se minimizar a diferença entre os valores observados e previstos. O referido sistema compõem-se de 3 equações:  $eq1 = ep1 - em * np.exp(-(P / N1) ** b)$ ;  $eq2 = ep2 - em * np.exp(-(P / N2) ** b)$ ; e  $eq3 = ep3 - em * np.exp(-(P / N3) ** b)$  - (no formato Python).

O ajuste dos parâmetros (*em*), (*P*) e (*b*) é feito através da função *least\_squares* da biblioteca *scipy*, que resolve o sistema de equações não lineares. O algoritmo começa com um "chute inicial" calculado anteriormente, pós a solução do sistema não linear, para os parâmetros e tenta ajustar os valores de modo a minimizar a diferença entre os dados experimentais e o modelo.

Após o ajuste inicial, o algoritmo aplica o modelo ajustado aos dados experimentais completos (filtrando para  $N > 20$ ), ou seja, excluindo possíveis ruídos (taxa de acúmulo de DP diferente) nos dados para (N) muito pequenos). Novamente, a função *least\_squares* é utilizada para ajustar os parâmetros com base em todos os dados disponíveis.

Os parâmetros (*em*), (*P*) e (*b*) ajustados são exibidos no final, juntamente com o valor de ( $R^2$ ) e erros médios quadrados (EMQ), que indica o quão bem o modelo se ajusta aos dados.

O algoritmo realiza um ajuste de regressão não linear para modelar a relação entre o número de ciclos de carga (N) e a deformação permanente (*ep*) com base em um modelo exponencial. Este utiliza dados experimentais, resolve um sistema de equações não lineares, ajusta os parâmetros do modelo, e visualiza os resultados em um gráfico comparativo. Este tipo de abordagem é comum em estudos de comportamento mecânico de materiais, como a análise de pavimentos rodoviários.

Para exemplificar o que foi descrito, no gráfico da Figura 212 sem ajuste (esquerda), o valor de *em* é baixo (0,1491), assim como os valores de *P* e *b*, o que resulta em uma curva que se ajusta de maneira razoável, mas que pode não ser o melhor modelo para os dados de *ep* em função de *N*. O erro médio quadrático (EMQ) aqui é maior, o que reflete o ajuste menos preciso.

No gráfico com ajuste (direita), o modelo ajustado refina os parâmetros, especialmente o valor muito elevado de *P* (5548059043.41), o que faz com que o modelo tenha uma transição

muito mais suave entre os valores de  $ep$  ao longo dos ciclos. Isso melhora consideravelmente a precisão do ajuste, evidenciado também pelo menor EMQ e maior  $R^2$ .

No modelo ajustado (direita), o  $R^2$  de 0,993 mostra que quase toda a variação dos dados é explicada pelo modelo, enquanto o gráfico à esquerda com  $R^2=0,987$  tem uma pequena perda de ajuste, principalmente para os valores iniciais de  $N$ , devido a essa diferença na taxa de acúmulo de DP inicial.

O modelo ajustado captura de forma mais precisa a evolução da deformação permanente para ciclos maiores, o que é evidenciado pela proximidade entre a curva e os pontos observados. O ajuste realizado para os dados com  $N > 20$  é claramente superior. O modelo ajustado consegue descrever com mais precisão a relação entre  $N$  e  $ep$ , o que é indicado tanto pelos coeficientes ajustados, o menor erro médio quadrático, quanto pelo  $R^2$  mais elevado.

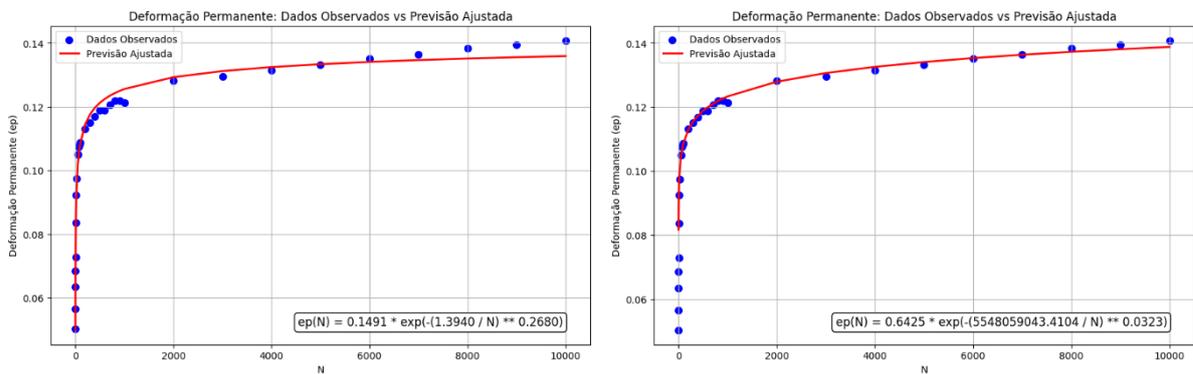


Figura 212: Dados observados e modelo para o solo 1 controle do estágio 2 (a esquerda sem ajuste e a direita com ajuste –  $N > 20$ )

A Tabela 43 apresenta os parâmetros do modelo de deformação permanente ( $ep$ ) para o estágio 2, com e sem ajuste, considerando valores de  $N > 20$ . Os parâmetros  $em$ ,  $P$ , e  $b$  foram ajustados para representar a relação entre o número de ciclos  $N$  e a deformação permanente. Além disso, a tabela também fornece o erro médio quadrático (EMQ), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e os valores de  $ep$  para  $N=10.000$  e  $N=150.000$ , o que permite uma comparação clara entre os modelos com e sem ajuste.

No modelo sem ajuste, temos os seguintes parâmetros:  $em = 0,1491$ ,  $P = 1,39$ , e  $b=0,268$ . O valor de  $ep$  para  $N = 150.000$  é aproximadamente 0,14260. Com um EMQ de  $7,489 \times 10^{-6}$  e  $R^2 = 0,987$ , o modelo sem ajuste já proporciona uma boa estimativa do comportamento dos dados experimentais, explicando cerca de 98,7% da variação total.

Por outro lado, o modelo com ajuste apresenta uma alteração significativa nos parâmetros:  $em = 0,6425$ ,  $P = 5548059043,41$ , e  $b = 0,0323$ . O valor de  $ep$  para  $N = 150.000$  calculado é aproximadamente 0,1578, o que representa uma diferença notável. O ajuste melhora

o desempenho do modelo, com o EMQ reduzido para  $8,584 \times 10^{-7}$  e  $R^2$  aumentando para 0,993, indicando que o modelo ajustado consegue explicar 99,3% da variação dos dados observados, oferecendo uma previsão mais precisa, especialmente para maiores valores de N.

O parâmetro  $em$ , que representa a assíntota da função quando N tende ao infinito, indica o valor máximo que a deformação permanente  $ep$  pode atingir à medida que o número de ciclos N aumenta indefinidamente. No modelo sem ajuste,  $em = 0,1491$ , enquanto no modelo com ajuste,  $em = 0,6425$ . Isso significa que, no modelo ajustado, a deformação permanente tende a um valor assintótico muito maior. A diferença percentual entre as assíntotas dos dois modelos pode é de  $\approx 331,1\%$

Tabela 43: Valores de  $em$ ,  $P$  e  $b$  para modelo com e sem ajuste do estágio 2 ( $N > 20$ )

Estágio 2 - sem ajuste		EMQ	$R^2$	Estágio 2 - com ajuste		EMQ	$R^2$
Variáveis	Valores			Variáveis	Valores		
$em$ (mm)	0,149095624	$7,489 * 10^{-6}$	0,987	$em$ (mm)	0,642489074	$8,584 * 10^{-7}$	0,993
P	1,39			P	5548059043,41		
b	0,267983931			b	0,032272712		
$\varepsilon_{p(10.000)}$	0,140798002			$\varepsilon_{p(10.000)}$	0,140798002		
$N_{(150.000)}$ (mm)	$\approx 0,1426$			$N_{(150.000)}$ (mm)	$\approx 0,1578$		

A Figura 213 mostra os dados observados (em azul) e a curva ajustada (em vermelho) utilizando a equação:  $ep(N) = 0.1623 * \exp(-4.2396 / N^{0.2027})$ . Neste modelo, o valor do parâmetro  $em$  é 0.1623, indicando a deformação permanente máxima que o modelo prevê para N tendendo ao infinito. A curva se ajusta bem aos dados observados, especialmente para os valores iniciais de N. No entanto, ao comparar visualmente com o gráfico da direita, observa-se que a curva pode não capturar com precisão as sutis variações nos valores de  $ep$  em maiores N, resultando em um ajuste menos refinado.

O gráfico da direita apresenta um modelo ajustado que utiliza a equação:  $ep(N) = 0.5987 * \exp(-1498748097.3600 / N^{0.0390})$ . Neste caso, o valor de  $em$  é 0.5987, significativamente maior que no modelo sem ajuste, sugerindo que o modelo prevê uma deformação permanente máxima muito maior para altos valores de N. A curva ajustada se aproxima ainda mais dos pontos observados, especialmente em valores de N mais elevados, o que se reflete em um ajuste mais preciso para o comportamento de longo prazo dos dados.

A principal diferença entre os dois modelos está no valor de  $em$ , que representa a assíntota da função quando N tende ao infinito. No modelo sem ajuste,  $em$  é 0.1623, enquanto no modelo ajustado,  $em$  é 0.5987, uma diferença percentual significativa. A diferença percentual pode ser calculada da seguinte forma:

O gráfico ajustado da direita oferece uma melhor adequação aos dados observados, com uma previsão mais precisa para altos valores de N, especialmente no que diz respeito à estabilização da deformação permanente. Essa melhoria é indicada pela maior precisão no ajuste e pela diferença significativa entre os parâmetros em nos dois modelos, sugerindo que o modelo ajustado captura melhor o comportamento de longo prazo do material testado.

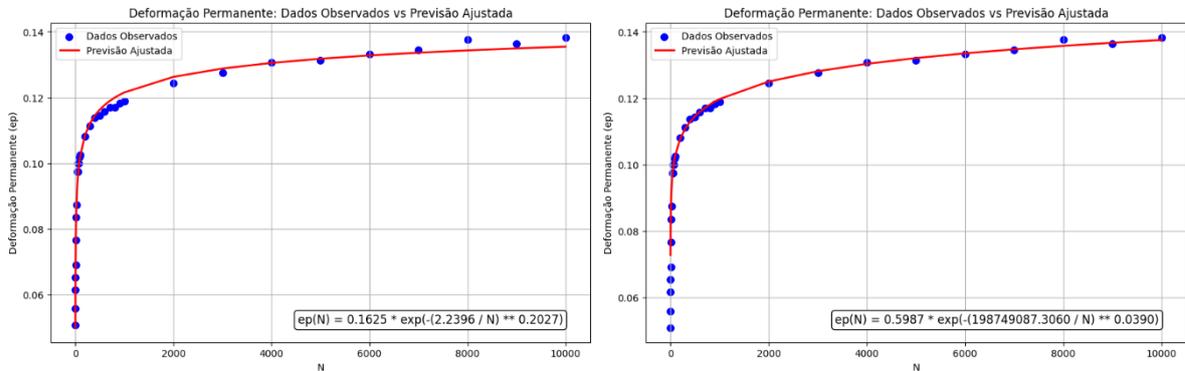


Figura 213: Dados observados e modelo para o solo 1 controle do estágio 3 (a esquerda sem ajuste e a direita com ajuste –  $N > 20$ )

A Tabela 44 apresenta os parâmetros  $em$ ,  $P$  e  $b$  para o modelo de deformação permanente ( $ep$ ) no estágio 3, com e sem ajuste, considerando valores de  $N > 20$ . A tabela também inclui o erro médio quadrático (EMQ), o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), e os valores de  $ep$  para  $N = 10.000$  e  $N = 150.000$ .

No modelo sem ajuste, temos os seguintes parâmetros:  $em = 0,1625$  (mm), indicando a deformação permanente máxima quando  $N$  tende ao infinito.  $P = 0,24$  e  $b = 0,2027$ . O valor de  $ep$  para  $N = 10.000$  é  $0,13827$ , e para  $N = 150.000$ , o valor é aproximadamente  $0,1520$ . O modelo sem ajuste apresenta um EMQ de  $3,602 * 10^{(-6)}$  e um  $R^2$  de  $0,994$ , significando que o modelo explica 99,4% da variação dos dados, oferecendo um bom ajuste.

No modelo com ajuste, os parâmetros ajustados são:  $em = 0,5987$  (mm), um valor significativamente maior em comparação com o modelo sem ajuste.  $P = 198749087,31$  e  $b = 0,0390$

O valor de  $ep$  para  $N = 150.000$  é aproximadamente  $0,1593$ . O modelo ajustado tem um EMQ reduzido para  $4,716 * 10^{(-7)}$  e um  $R^2$  de  $0,997$ , indicando que o ajuste captura 99,7% da variabilidade dos dados observados.

O parâmetro  $em$  representa a assíntota da função quando  $N$  tende ao infinito. No modelo sem ajuste,  $em$  é  $0,1625$ , enquanto no modelo ajustado,  $em$  é  $0,5987$ . A diferença percentual entre as assíntotas é de  $\approx 268,5\%$

O modelo ajustado proporciona uma previsão mais precisa da deformação permanente para grandes números de ciclos, evidenciado pelo menor EMQ e maior R<sup>2</sup>. A diferença significativa entre os valores de em mostra que o modelo ajustado consegue capturar melhor o comportamento de longo prazo da deformação permanente.

Tabela 44: Valores de *em*, *P* e *b* para modelo com e sem ajuste do estágio 3 (N > 20)

Estágio 3 - sem ajuste		EMQ	R <sup>2</sup>	Estágio 3 - com ajuste		EMQ	R <sup>2</sup>
Variáveis	Valores			Variáveis	Valores		
em (mm)	0,16247275	3,602* 10 <sup>-6</sup>	0,994	em (mm)	0,598664956	4,716* 10 <sup>-7</sup>	0,997
P	0,24			P	198749087,31		
b	0,202702766			b	0,039019482		
$\epsilon_{p(10.000)}$	0,138269961			$\epsilon_{p(10.000)}$	0,138269961		
$N_{(150.000)} (mm)$	$\approx 0,1520$			$N_{(150.000)} (mm)$	$\approx 0,1593$		

A Figura 214 mostra o gráfico à esquerda com a equação:  $ep(N) = 0.1584 * \exp(-25.31 / N^{0.2017})$ . Neste modelo, o parâmetro  $em = 0.1584$  representa a deformação permanente máxima que o material pode atingir quando N tende ao infinito. O modelo sem ajuste oferece um bom ajuste para os valores mais baixos de N, mas conforme N aumenta, a precisão do ajuste diminui ligeiramente, especialmente em ciclos mais altos.

O gráfico à direita mostra os dados observados e a previsão ajustada utilizando a equação:  $ep(N) = 0.6991 * \exp(-804780352.810 / N^{0.0503})$ . Neste caso, o valor de  $em = 0.6991$  é significativamente maior, sugerindo que o modelo prevê uma deformação permanente muito maior para N tendendo ao infinito. Além disso, o parâmetro P ajustado, sendo muito maior, indica que o modelo ajustado é mais suave, capturando melhor o comportamento dos dados, especialmente para N mais altos, onde a deformação permanente tende a estabilizar.

A principal diferença entre os dois gráficos está no valor de *em*, que representa a assíntota da função. No modelo sem ajuste,  $em = 0.1584$ , enquanto no modelo ajustado,  $em = 0.6991$ , uma diferença significativa. A diferença percentual é de  $\approx 341.4\%$ .

Isso indica que o modelo ajustado prevê uma deformação permanente máxima 341,4% maior em comparação ao modelo sem ajuste. Essa diferença reflete a melhor adequação do modelo ajustado ao comportamento real dos dados experimentais em grandes valores de N.

O modelo ajustado oferece uma previsão muito mais precisa do comportamento da deformação permanente, especialmente para N elevados. O maior valor de *em* no modelo ajustado demonstra que o material apresenta uma maior deformação permanente em longo prazo, capturando o comportamento estabilizado que não é tão bem representado no modelo sem ajuste.

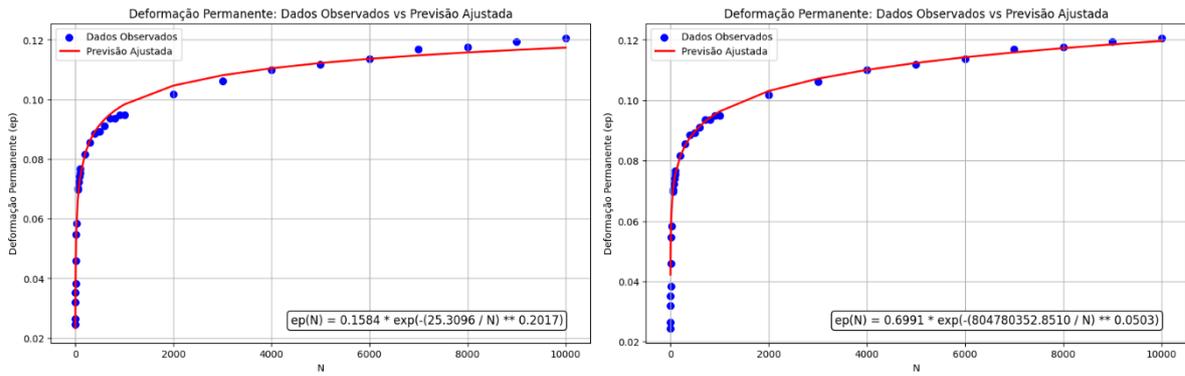


Figura 214: Dados observados e modelo para o solo 1 controle do estágio 4 (a esquerda sem ajuste e a direita com ajuste –  $N > 20$ )

A Tabela 45 apresenta um modelo sem ajuste, com os seguintes parâmetros:  $e_m = 0,1584$  (mm), indicando a deformação permanente máxima quando  $N$  tende ao infinito.  $P = 25,31$  e  $b = 0,2017$ . O valor de  $N = 150.000$  é aproximadamente  $0,1331$ . O modelo sem ajuste apresenta um EMQ de  $4,841 * 10^{(-6)}$  e um  $R^2$  de  $0,994$ , significando que o modelo explica  $99,4\%$  da variação dos dados, oferecendo um bom ajuste.

No modelo com ajuste, os parâmetros ajustados são:  $e_m = 0,6991$  (mm), um valor significativamente maior em comparação com o modelo sem ajuste.  $P = 804780352,9$  e  $b = 0,0503$ . O valor de  $e_p$  para  $N = 150.000$  é aproximadamente  $0,1593$ . O modelo ajustado tem um EMQ de  $5,592 * 10^{(-6)}$  e um  $R^2$  de  $0,997$ , indicando que o ajuste captura  $99,7\%$  da variabilidade dos dados observados.

O parâmetro  $e_m$  representa a assíntota da função quando  $N$  tende ao infinito. No modelo sem ajuste,  $e_m$  é  $0,1584$ , enquanto no modelo ajustado,  $e_m$  é  $0,6991$ . A diferença percentual entre as assíntotas é de  $\approx 341,4\%$

O modelo ajustado proporciona uma previsão mais precisa da deformação permanente para grandes números de ciclos, evidenciado pelo maior  $R^2$ . A diferença significativa entre os valores de  $e_m$  mostra que o modelo ajustado consegue capturar melhor o comportamento de longo prazo da deformação permanente.

Tabela 45: Valores de  $e_m$ ,  $P$  e  $b$  para modelo com e sem ajuste do estágio 4 ( $N > 20$ )

Estágio 4- sem ajuste		EMQ	$R^2$	Estágio 4 - com ajuste		EMQ	$R^2$
Variáveis	Valores			Variáveis	Valores		
$e_m$ (mm)	0,158366098	$4,841 * 10^{-6}$	0,994	$e_m$ (mm)	0,699074546	$5,592 * 10^{-6}$	0,997
P	25,31			P	804780352,9		
b	0,201653829			b	0,050319454		
$\epsilon_{p(10.000)}$	0,120630026			$\epsilon_{p(10.000)}$	0,120630026		
$N_{(150.000)}$ (mm)	$\approx 0,1331$			$N_{(150.000)}$ (mm)	$\approx 0,1593$		

A Figura 215 apresenta o gráfico à esquerda que mostra os dados observados (em azul) e a previsão ajustada (em vermelho) utilizando a equação:  $ep(N) = 0.1779 * \exp(-218.4822 / N^{0.1814})$ . Neste modelo, o valor de  $em = 0.1779$  representa a deformação permanente máxima que o modelo prevê para  $N$  tendendo ao infinito. O ajuste captura bem o comportamento dos dados observados para valores iniciais de  $N$ , mas a precisão pode diminuir ligeiramente à medida que  $N$  aumenta, refletido em ciclos mais elevados.

O gráfico à direita mostra os dados observados e a previsão ajustada com a equação:

$ep(N) = 0.4501 * \exp(-733176.841 / N^{0.0817})$ . Neste caso, o valor de  $em = 0.4501$  é maior, sugerindo uma deformação permanente máxima consideravelmente maior do que no modelo sem ajuste. O parâmetro  $P$ , sendo significativamente maior, resulta em um ajuste mais suave, o que captura melhor o comportamento dos dados, principalmente para maiores valores de  $N$ , onde a deformação permanente tende a se estabilizar.

Os dois modelos exibem diferenças substanciais, principalmente no valor de  $em$ , que representa a assíntota da função. No modelo sem ajuste,  $em = 0.1779$ , enquanto no modelo ajustado,  $em = 0.4501$ . A diferença percentual é de  $\approx 152.9\%$

O modelo ajustado (à direita) reflete uma maior precisão no ajuste aos dados experimentais, especialmente para altos valores de  $N$ . A deformação permanente máxima estimada pelo modelo ajustado é substancialmente maior, indicando uma previsão mais realista do comportamento do material em longos períodos, quando comparado ao modelo sem ajuste.

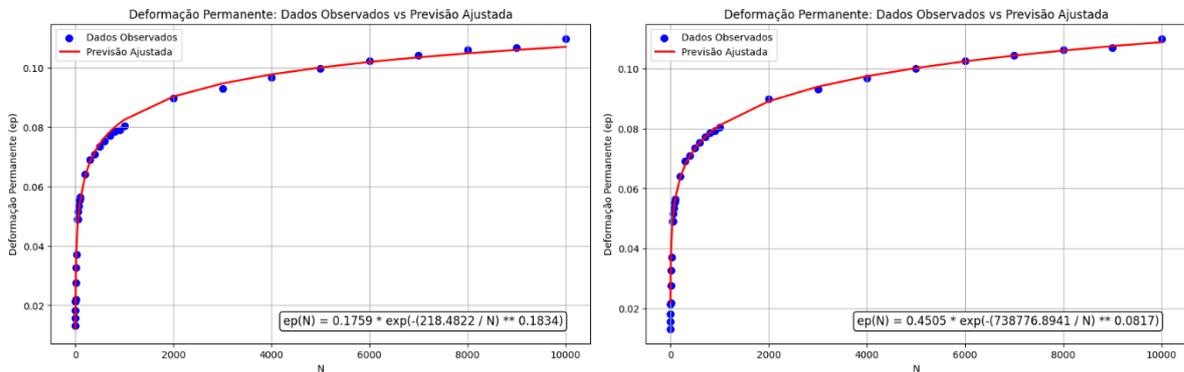


Figura 215: Dados observados e modelo para o solo 1 controle do estágio 4 (a esquerda sem ajuste e a direita com ajuste –  $N > 20$ )

A Tabela 46 apresenta um modelo sem ajuste, em que o valor de  $em$  é 0,1759 mm, o que representa a deformação permanente máxima que o material pode atingir quando o número de ciclos  $N$  tende ao infinito. O parâmetro  $P$  é 248,4822, enquanto o parâmetro  $b$  é 0,1834, ambos afetando a forma da curva de deformação permanente em função de  $N$ . O valor de  $ep$  para  $N = 150.000$  é 0,1292 mm. O modelo sem ajuste tem um EMQ de  $2,624 * 10^{(-6)}$  e um

$R^2$  de 0,997, indicando que o modelo explica 99,7% da variabilidade dos dados, o que o torna um bom ajuste.

Já no modelo com ajuste, o valor de  $e_m$  aumenta significativamente para 0,4505 mm, sugerindo que a deformação permanente máxima prevista pelo modelo ajustado é muito maior para altos valores de  $N$ . O parâmetro  $P$  ajustado também aumenta substancialmente para 738776,8941, enquanto o parâmetro  $b$  é ajustado para 0,0817, o que resulta em um comportamento mais suave da curva de  $e_p$  à medida que o número de ciclos  $N$  aumenta. O valor de  $e_p$  para  $N = 150.000$ , o valor previsto pelo modelo ajustado é maior, cerca de 0,1442 mm. O modelo ajustado melhora significativamente a qualidade do ajuste, com um EMQ reduzido para  $3,728 * 10^{(-7)}$  e um  $R^2$  de 0,999, o que significa que o modelo ajustado captura 99,9% da variabilidade dos dados.

Uma análise da diferença entre as assíntotas dos dois modelos mostra que, no modelo sem ajuste,  $e_m$  é 0,1759 mm, enquanto no modelo ajustado,  $e_m$  é 0,4505 mm. A diferença percentual entre os dois valores de  $e_m$  pode ser calculada como aproximadamente 156,1%, o que indica que o modelo ajustado prevê uma deformação permanente máxima muito maior do que o modelo sem ajuste. Essa diferença considerável sugere que o modelo ajustado captura melhor o comportamento da deformação permanente ao longo do tempo, especialmente em ciclos mais longos.

O modelo ajustado oferece uma previsão mais precisa da deformação permanente para altos valores de  $N$ . A diferença nos valores de  $e_m$ , aliada à maior precisão do ajuste refletida nos valores de  $R^2$  e EMQ, demonstra que o modelo ajustado é mais eficaz em descrever a estabilização da deformação permanente do material ao longo dos ciclos de carga.

Tabela 46: Valores de  $e_m$ ,  $P$  e  $b$  para modelo com e sem ajuste do estágio 5 ( $N > 20$ )

Estágio 5 - sem ajuste		EMQ	$R^2$	Estágio 5 - com ajuste		EMQ	$R^2$
Variáveis	Valores			Variáveis	Valores		
$e_m$ (mm)	0,175932079	$2,624 * 10^{-6}$	0,997	$e_m$ (mm)	0,450508882	$3,728 * 10^{-7}$	0,999
$P$	248,4822258			$P$	738776,8941		
$b$	0,183373363			$b$	0,081733024		
$\epsilon_{p(10.000)}$	0,109921038			$\epsilon_{p(10.000)}$	0,109921038		
$N_{(150.000)}$ (mm)	$\approx 0,1292$			$N_{(150.000)}$ (mm)	$\approx 0,1442$		

Portanto, carregamento multiestágio afeta a deformação permanente ao alterar a taxa de acumulação dessa deformação ao longo dos ciclos de carga. Quando se tenta ajustar um modelo de regressão não linear usando todos os dados, incluindo os valores iniciais de ciclos, o ajuste

pode ser inadequado. Isso ocorre porque os valores iniciais de deformação permanente (DP) tendem a ter uma taxa de acumulação diferente da observada em ciclos mais avançados.

A deformação permanente inicial pode acumular-se de forma mais rápida ou com uma taxa de crescimento diferente em comparação aos estágios posteriores de carregamento. Isso causa uma dificuldade em ajustar corretamente a curva de regressão usando todos os pontos de dados de DP, especialmente os iniciais.

Ao tentar ajustar o modelo com todos os pontos, o valor de  $em$  (que representa a assíntota da função ou o valor máximo da deformação) tende a ser calculado em um valor inferior.

Para corrigir essa inconsistência no ajuste, sugere-se desconsiderar os dados iniciais, que têm uma taxa de acumulação de DP diferente dos demais. Ao filtrar esses dados iniciais e focar apenas em ciclos superiores a um certo limite (por exemplo,  $N > 20$ ), o ajuste dos parâmetros  $em$ ,  $P$ , e  $b$  se torna mais preciso.

O modelo ajustado, que exclui os valores de  $N$  muito pequenos, tem um  $R^2$  mais elevado, indicando que este consegue explicar uma proporção maior da variabilidade dos dados observados. Além disso, o erro médio quadrático (EMQ) é menor no modelo ajustado, sugerindo que o ajuste é mais preciso.

O carregamento multiestágio tem um impacto direto na taxa de acumulação da deformação permanente e, se não for tratado adequadamente, pode resultar em um ajuste inadequado dos modelos de previsão de DP. Ao desconsiderar os valores iniciais de ciclos, que têm uma taxa de acumulação distinta, o modelo consegue capturar melhor o comportamento de longo prazo da deformação permanente.

Para fins acadêmicos e de pesquisa o ajuste não inviabiliza o estudo das funções sem ajuste, até porque a diferença dos valores de  $ep$  entre os modelos, ocorreu na casa de centésimos de milímetros para os 150 mil ciclos preconizados pelo DNIT. Porém, para um projeto, sugere-se verificar o quanto de correção é necessário se avaliar para que a função alcance os 150 mil ciclo com uma maior acurácia.

## 5.8 Análise estatística utilizando JAMOVI

Muitos testes estatísticos paramétricos (como o teste t de Student, ANOVA, regressão linear, etc.) assumem que os dados provêm de uma distribuição normal. Se os dados não são normalmente distribuídos, a interpretação dos resultados desses testes pode ser inválida.

A normalidade dos dados é fundamental para realizar inferências estatísticas válidas. Quando os dados são normalmente distribuídos, pode-se utilizar métodos estatísticos que proporcionam estimativas precisas de parâmetros populacionais e intervalos de confiança.

O teste de normalidade, portanto, é essencial para verificar se os dados podem ser analisados utilizando métodos paramétricos que pressupõem uma distribuição normal. O teste ajuda a garantir que os resultados estatísticos sejam interpretados de maneira correta e confiável, aumentando a validade das conclusões tiradas a partir da análise dos dados.

Os resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk (valores próximos de 1 indicam que a distribuição é próxima da normalidade) são apresentados como o valor W de Shapiro-Wilk e o p-valor associado para cada grupo. Esse teste é utilizado para verificar se uma amostra de dados segue uma distribuição normal.

Um p-valor maior que 0.05 geralmente sugere que os dados não fornecem evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula de normalidade.

Para a Deformação Elástica e Plástica, nem todos os grupos têm p-valores superiores a 0.05, indicando que os dados não apresentam evidências suficientes para rejeitar a normalidade. Em outras palavras, garantindo que para estas duas variáveis a distribuição dos dados não são normais para todos os fatores.

Por isso foi necessário rodar um teste Kruskal-Wallis Tabela 47.

Tabela 47: Teste não paramétrico de Kruskal-Wallis

Deformação	Solo	Kruskal-Wallis	Graus de Liberdade (df)	p-valor	Significância
Elástica	1	26.317	7	0.000465	Significativo
Plástica	1	37.958	7	3.086e-06	Significativo
Elástica	2	29.231	7	5.326e-05	Significativo
Plástica	2	37.958	7	1.075e-06	Significativo

Para o solo 1 o teste de Kruskal-Wallis indicou diferenças significativas entre os grupos na Deformação Plástica (p-valor = 3.086e-06) e Deformação Elástica (p-valor = 0,000465). As

análises post-hoc com o teste de Dunn identificaram comparações específicas com diferenças significativas.

A utilização de testes não paramétricos (Kruskal-Wallis e Dunn) permitiu lidar com a ausência de normalidade em algumas regiões. As diferenças significativas entre os grupos confirmam que as condições de estabilização afetam as medidas nas regiões analisadas.

Para o solo 2 o teste de Kruskal-Wallis indicou diferenças significativas entre os grupos na Deformação Plástica ( $p$ -valor =  $1.075e-06$ ) e na Deformação Elástica ( $p$ -valor =  $5.326e-05$ ). As análises post-hoc com o teste de Dunn identificaram várias comparações significativas.

O uso de testes não paramétricos garantiu a validade das análises mesmo na presença de dados não normalmente distribuídos. As diferenças significativas entre os grupos confirmam a influência das condições de estabilização nas regiões analisadas.

Para ambos os solos, os resultados dos testes não paramétricos confirmam a validade do experimento. As análises demonstram que as diferentes condições de estabilização têm um impacto significativo nas deformações elástica e plástica.

O experimento é válido, pois os testes estatísticos utilizados são apropriados para as características dos dados, e as análises revelam diferenças significativas entre os grupos experimentais. As conclusões são robustas, pois foram utilizadas metodologias estatísticas adequadas (testes de Kruskal-Wallis e Dunn) para analisar os dados, mesmo quando a normalidade não foi atendida.

### **5.8.1 Experimento 1**

#### **5.8.1.1 Solo 1**

A análise ANOVA mostra que o teor de emulsão tem um impacto estatisticamente significativo sobre a variável dependente, com um valor de  $p = 0,003$  e uma estatística  $F = 7,98$ . Esses resultados indicam que a variabilidade observada na variável dependente pode ser explicada, em grande parte, pelas diferenças no teor de emulsão utilizado. Como o valor de  $p$  é menor que  $0,05$ , rejeitamos a hipótese nula de que o teor de emulsão não afeta a variável. O baixo risco de cometer um erro Tipo I ( $0,3\%$ ) reforça a robustez dessa conclusão, indicando que mudanças no teor de emulsão têm uma influência real e mensurável no desempenho analisado. A influência dos ciclos sugere um efeito marginalmente significativo na variável dependente, com um valor de  $p = 0,049$  e uma estatística  $F = 3,28$ . Embora o efeito seja menos

pronunciado que o do teor de emulsão, o valor de p indica que há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula e concluir que o número de ciclos exerce influência sobre a variável. No entanto, o risco de cometer um erro Tipo I (4,9%) é mais elevado neste caso, o que sugere cautela ao interpretar os resultados. Apesar disso, o número de ciclos não deve ser ignorado como um fator relevante na variação observada. Estas informações podem ser consultadas na Tabela 48

Tabela 48: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre a DP para o solo 1

ANOVA: DP	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Teor de Emulsão	0.0554	3	0.01845	7.98	0.003
Ciclos	0.0303	4	0.00759	3.28	0.049
Resíduos	0.0277	12	0.00231		

O gráfico da Figura 216 evidencia a interação entre o teor de emulsão e o número de ciclos de carregamento sobre a deformação permanente (DP), mostrando claramente que o desempenho dos materiais piora à medida que o teor de emulsão aumenta e o número de ciclos se eleva. O solo controle, sem adição de emulsão, apresenta consistentemente os menores valores de DP, indicando melhor resistência à deformação permanente. Em contraste, os solos com emulsão (1,5%, 2% e 2,5%) mostram um desempenho inferior, com deformações crescentes conforme o teor de emulsão aumenta. Essa diferença é particularmente acentuada nos ciclos mais avançados, com os maiores valores de DP observados no quinto ciclo, quando a razão entre a tensão desvio e a tensão confinante é de 4. O segundo ciclo destaca-se como o ponto de menor deformação para todos os teores de emulsão, sugerindo um comportamento de acomodação temporária do material antes de retomar o aumento progressivo das deformações nos ciclos seguintes. No entanto, independentemente do ciclo, o solo com 2 % de emulsão apresenta as maiores deformações, seguido pelo de 1,5% e, por último, o de 2,5.

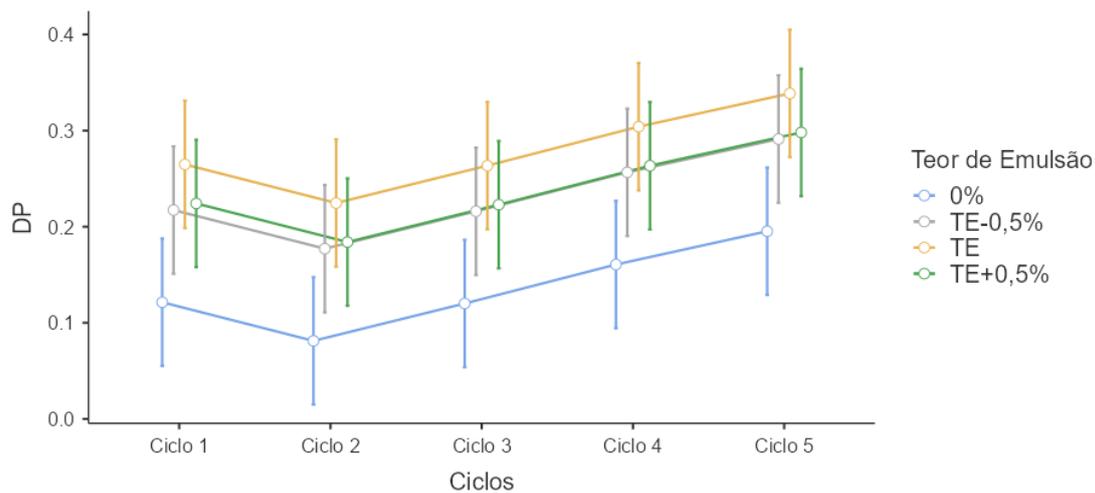


Figura 216: Interação ciclos\*teor de emulsão sobre a DP

O resultado da ANOVA, Tabela 49, para o teor de emulsão mostra que esse fator tem um impacto significativo sobre a deformação resiliente (DR), com um valor de  $p = 0,002$  e uma estatística F de 9,18. Isso indica que a hipótese nula, que assume que o teor de emulsão não afeta a DR, pode ser rejeitada com confiança. O risco de cometer um erro Tipo I, ou seja, rejeitar a hipótese nula quando esta é verdadeira, é muito baixo (0,2%). Portanto, o teor de emulsão tem um efeito estatisticamente significativo sobre a deformação resiliente. Como a influência foi detectada com significância, o erro Tipo II (não rejeitar a hipótese nula quando ela é falsa) é irrelevante nesse caso. A adição de emulsão contribui para mudanças no comportamento resiliente do solo, confirmando que variações nos teores de emulsão afetam de forma significativa a DR. Os ciclos de carregamento demonstraram uma influência extremamente significativa sobre a deformação resiliente, com um valor de  $p$  menor que 0,001 e uma estatística F de 172,16. A hipótese nula, que afirma que o número de ciclos não afeta a DR, pode ser fortemente rejeitada. O valor  $p$  muito pequeno indica que a probabilidade de cometer um erro Tipo I é praticamente nula, confirmando que o número de ciclos tem um impacto altamente significativo. O aumento dos ciclos está diretamente relacionado ao aumento da deformação resiliente, o que destaca a importância do número de ciclos na avaliação do desempenho do material ao longo do tempo.

Tabela 49: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre a DR para o solo 1

ANOVA: DR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Teor de Emulsão	3.35e-4	3	1.12e-4	9.18	0.002
Ciclos	0.00837	4	0.00209	172.16	< .001
Resíduos	1.46e-4	12	1.21e-5		

O gráfico da Figura 217 mostra o comportamento da deformação resiliente (DR) ao longo dos ciclos de carregamento para diferentes teores de emulsão, incluindo o solo controle (0%), 1,5%, 2% e 2,5%. A deformação resiliente aumenta de maneira quase linear conforme o número de ciclos cresce, indicando que o material se deforma progressivamente com o tempo. O solo controle, representado pela curva azul, apresenta os menores valores de DR em todos os ciclos, sugerindo um melhor desempenho em termos de resistência à deformação resiliente. Os solos com teores de 1,5% e 2% mostram um comportamento semelhante, com deformações ligeiramente superiores ao controle, mas inferiores ao solo com 2,5% de emulsão. A curva referente ao teor de 2,5%, representada pela cor verde, exibe consistentemente os maiores valores de DR em todos os ciclos, sugerindo que o aumento do teor de emulsão está associado a uma maior deformação resiliente. A partir do terceiro ciclo, há uma separação mais clara entre as curvas, destacando o efeito cumulativo dos ciclos e do teor de emulsão na deformação do solo. As barras de erro indicam pequenas variações, sugerindo que as medições foram consistentes ao longo dos ciclos.

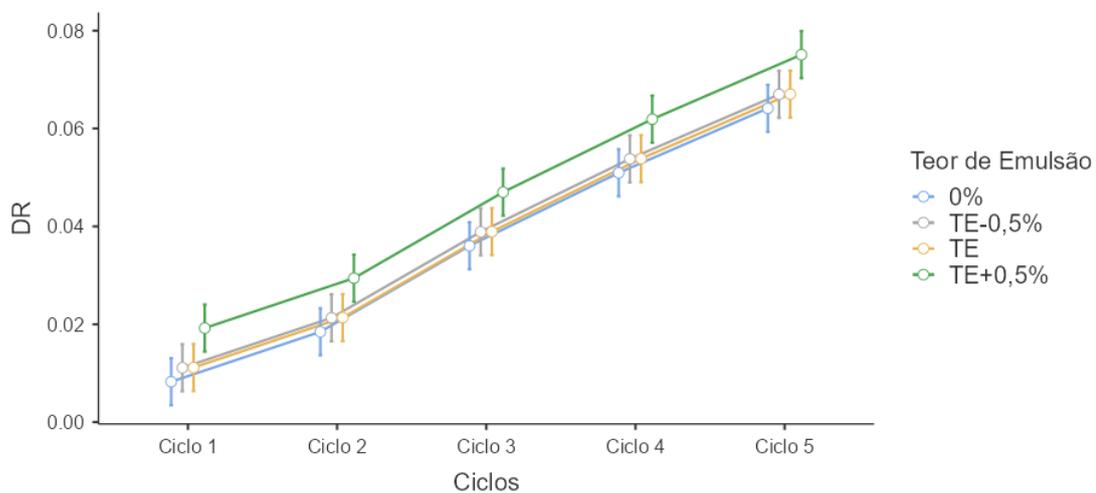


Figura 217: Interação entre ciclos\*teor de emulsão sobre a DR para o solo 1

A análise ANOVA Tabela 50 para o fator de forma "b" indica que o teor de emulsão tem um impacto significativo sobre essa variável, com um valor de  $p < 0,001$  e uma estatística F de 16,3. Isso significa que a hipótese nula, que assume que o teor de emulsão não afeta o fator de forma "b", pode ser rejeitada com alta confiança. O risco de cometer um erro Tipo I, ou seja, rejeitar a hipótese nula quando esta é verdadeira, é extremamente baixo. Dessa forma, pode-se concluir que diferentes níveis de teor de emulsão influenciam significativamente o valor de "b", indicando que o comportamento do material varia conforme a quantidade de emulsão utilizada. O efeito do teor de emulsão é claro e robusto, refletido pela alta significância estatística. A influência dos ciclos de carregamento sobre o fator de forma "b" também é altamente significativa, com um valor de  $p < 0,001$  e uma estatística F de 13,1. A hipótese nula, que propõe que o número de ciclos não tem efeito sobre "b", pode ser rejeitada com grande confiança. O risco de erro Tipo I é igualmente muito baixo, confirmando que o número de ciclos afeta o fator de forma "b" de forma estatisticamente significativa. O aumento do número de ciclos está diretamente relacionado a mudanças no fator de forma, sugerindo que o material se adapta e responde de maneira progressiva à carga aplicada ao longo do tempo. Assim, os ciclos são um fator importante para entender o comportamento de "b".

Tabela 50: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre b para o solo 1

ANOVA: b	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Teor de Emulsão	0.03368	3	0.01123	16.3	<.001
Ciclos	0.03602	4	0.00901	13.1	<.001
Resíduos	0.00825	12	6.87e-4		

Para os solos com emulsão (1,5%, 2%, e 2,5%), as curvas são muito próximas umas das outras, com uma diferença mínima entre os diferentes teores, conforme é possível se visualizar no gráfico de interações da Figura 218. Embora todos sigam a mesma tendência de aumento no segundo ciclo e diminuição posterior, os solos com emulsão apresentam valores de "b" consistentemente menores em comparação com o solo controle. Essa proximidade entre as curvas indica que variações no teor de emulsão (dentro desse intervalo) têm um efeito menos pronunciado em "b" do que a presença ou ausência total de emulsão. O solo controle, sem emulsão, apresenta um comportamento significativamente distinto, com valores mais elevados de "b" ao longo de todos os ciclos. Em termos de variação ao longo dos ciclos, observa-se que, para todos os teores de emulsão, o valor de "b" atinge um pico no segundo ciclo e depois começa

a diminuir nos ciclos subsequentes. A curva do solo controle (0%) apresenta os maiores valores de "b" em todos os ciclos, destacando-se das demais. A partir do terceiro ciclo, todas as curvas mostram uma tendência de queda contínua até o ciclo 5, indicando que o fator de forma "b" é reduzido à medida que o número de ciclos aumenta.

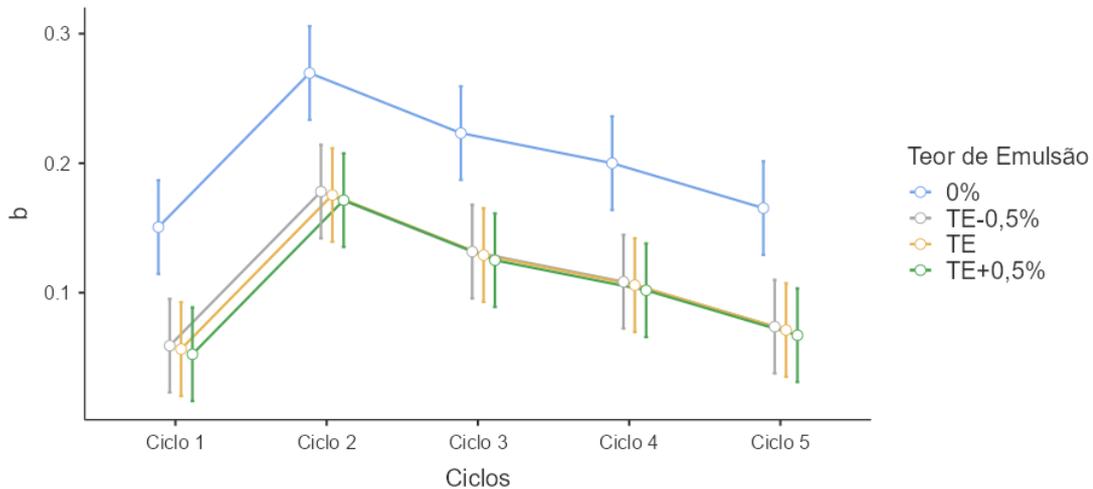


Figura 218: Interação entre ciclos\*teor de emulsão sobre b para o solo 1

A análise ANOVA, Tabela 51, mostra que o teor de emulsão tem um impacto significativo sobre o módulo resiliente (MR), com um valor de  $p = 0,002$  e uma estatística F de 8,95. Esses resultados indicam que a hipótese nula, que assume que o teor de emulsão não afeta o MR, pode ser rejeitada com confiança, uma vez que o valor de  $p$  é menor que o nível de significância de 0,05. O risco de cometer um erro Tipo I, ou seja, rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira, é de apenas 0,2%. Isso implica que a variação nos níveis de teor de emulsão exerce uma influência real e mensurável sobre o MR, alterando o comportamento resiliente do material conforme a quantidade de emulsão utilizada. Os ciclos de carregamento demonstraram uma influência ainda mais significativa sobre o módulo resiliente, com um valor de  $p$  inferior a 0,001 e uma estatística F de 16,48. A hipótese nula, que afirma que o número de ciclos não afeta o MR, pode ser fortemente rejeitada. O valor F elevado e o  $p$  muito pequeno indicam que o efeito do número de ciclos é altamente significativo, o que sugere que o comportamento do material muda progressivamente com o aumento dos ciclos de carregamento. O risco de cometer um erro Tipo I é praticamente inexistente, o que reforça que o número de ciclos tem um papel crucial na variação do MR, refletindo as mudanças que ocorrem no material à medida que este é submetido a mais ciclos de carga.

Tabela 51: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o MR para o solo 1

ANOVA: MR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Teor de Emulsão	55238	3	18413	8.95	0.002
Ciclos	135627	4	33907	16.48	< .001
Resíduos	24689	12	2057		

Em relação aos ciclos de carregamento, observa-se um aumento progressivo do MR à medida que o número de ciclos aumenta. Esse aumento é bem linear conforme pode ser visto na Figura 219. Isso sugere que o solo vai se tornando mais resistente à medida que é submetido a mais ciclos, indicando um possível efeito de compactação ou endurecimento progressivo ao longo do tempo. Quanto aos teores de emulsão, o solo controle, representado pela curva azul, apresenta os maiores valores de MR em todos os ciclos, indicando o melhor desempenho em termos de resistência resiliente. Os solos com 1,5% e 2% de emulsão seguem um comportamento semelhante, mas com valores de MR consistentemente menores do que o solo controle. Já o solo com 2,5% de emulsão, representado pela curva verde, apresenta os menores valores de MR em todos os ciclos, sugerindo que o aumento do teor de emulsão está associado a uma diminuição na capacidade do solo de resistir à deformação repetida. As barras de erro, que indicam a variabilidade das medições, são relativamente pequenas, o que mostra que os resultados são consistentes. De maneira geral, o solo controle demonstra o melhor desempenho, enquanto os solos com emulsão apresentam uma redução no MR à medida que o teor de emulsão aumenta. Isso sugere que, embora o número de ciclos tenha uma influência positiva no aumento do MR, a adição de emulsão, especialmente em maiores teores, reduz a capacidade do solo de resistir a cargas repetidas.

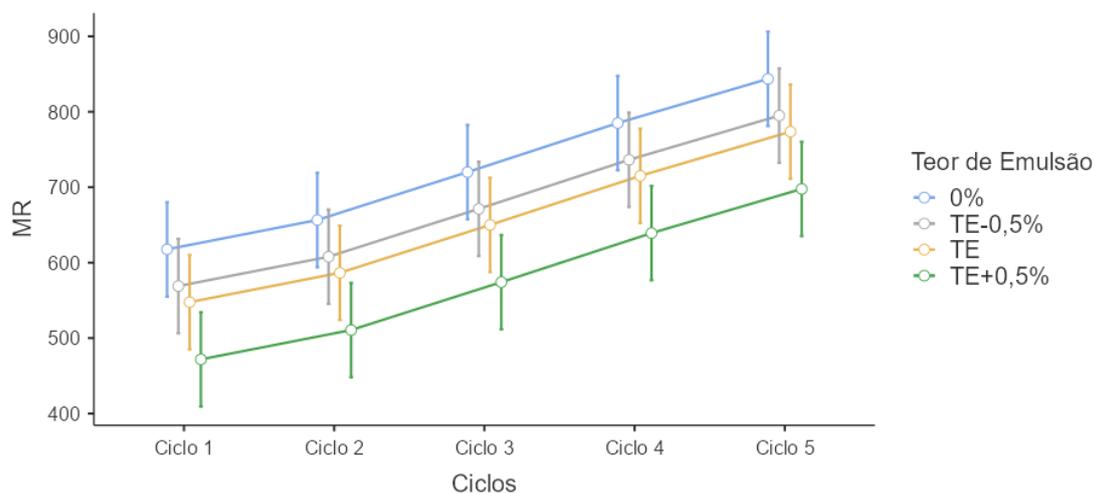


Figura 219: Interação entre ciclos\*teor de emulsão sobre o MR para o solo 1

#### 5.8.1.2 Solo 2

A análise ANOVA Tabela 52 revela que o teor de emulsão não tem um impacto estatisticamente significativo sobre a deformação permanente, com um valor de  $p = 0,273$  e uma estatística F de 1,47. Esses valores indicam que a hipótese nula, que sugere que o teor de emulsão não afeta a DP, não pode ser rejeitada. O valor de p maior que 0,05 sugere que as diferenças observadas na DP entre os diferentes níveis de teor de emulsão podem ser atribuídas ao acaso. Consequentemente, o risco de cometer um erro Tipo I (rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira) é alto 27,3%, e, portanto, não há evidências suficientes para afirmar que o teor de emulsão tem um efeito significativo sobre a deformação permanente. Por outro lado, a influência dos ciclos de carregamento sobre a deformação permanente é altamente significativa, com um valor de p inferior a 0,001 e uma estatística F de 12,64. Esses resultados indicam que a hipótese nula, que assume que o número de ciclos não afeta a DP, pode ser rejeitada com grande confiança. O valor F elevado sugere que os ciclos têm um impacto substancial na DP, o que significa que à medida que o número de ciclos aumenta, a deformação permanente também aumenta de forma significativa. O risco de cometer um erro Tipo I nesse caso é praticamente inexistente, indicando que o número de ciclos é um fator crucial na variação da deformação permanente.

Tabela 52: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o DP para o solo 2

ANOVA: DP	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Teor de Emulsão	0.0995	3	0.0332	1.47	0.273
Ciclos	1.1430	4	0.2858	12.64	< .001
Resíduos	0.2712	12	0.0226		

O gráfico da Figura 220 mostra o comportamento da deformação permanente (DP) ao longo de cinco ciclos de carregamento para diferentes teores de emulsão: 0% (solo controle), 0,5%, 1%, e 1,5%. Observa-se que a DP aumenta de forma consistente à medida que o número de ciclos de carregamento aumenta. Esse crescimento é especialmente acentuado do ciclo 4 ao 5, onde todas as curvas demonstram um aumento mais pronunciado na DP, indicando que o material acumula deformações significativas com o aumento do número de ciclos. Em relação aos teores de emulsão, o solo controle (0%) é representado pela curva azul, que geralmente apresenta os menores valores de DP ao longo dos ciclos. Os solos com teores de 0,5% e 1% de emulsão, representados pelas curvas cinza e amarela, exibem um comportamento bastante semelhante, com valores de DP ligeiramente superiores aos do solo controle. A diferença entre esses teores é pequena, e ambos apresentam um aumento considerável na DP nos ciclos 4 e 5. Por outro lado, o solo com 1,5% de emulsão, representado pela curva verde, também mostra um aumento na DP à medida que os ciclos avançam, mas seus valores são ligeiramente menores em comparação aos outros teores nos ciclos iniciais. No entanto, no quinto ciclo, as diferenças entre os teores de emulsão diminuem, com todos os solos apresentando valores de DP mais próximos. De modo geral, as barras de erro, que indicam a variabilidade das medições, mostram certa consistência entre as amostras, embora haja alguma sobreposição entre os diferentes teores de emulsão, especialmente nos ciclos iniciais. O aumento acentuado da DP nos ciclos 4 e 5 destaca que, independentemente do teor de emulsão, o material tende a sofrer maiores deformações permanentes à medida que é submetido a mais ciclos de carga. O solo controle, apesar de inicialmente apresentar um desempenho superior, exibe diferenças menores em relação aos solos com emulsão nos ciclos finais, indicando que, com o aumento do número de ciclos, a resistência diferencial entre os solos diminui.

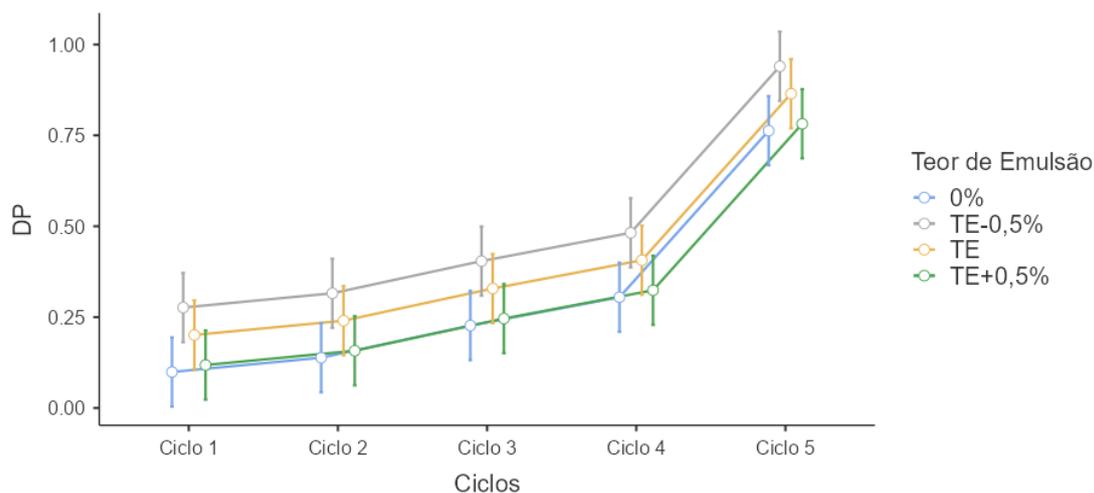


Figura 220:: Interação entre ciclos\*teor de emulsão sobre a DP para o solo 2

A análise ANOVA, Tabela 53, para a deformação resiliente (DR) indica que o teor de emulsão possui uma influência que se aproxima da significância estatística, mas não a atinge completamente, com um valor de  $p = 0,053$  e uma estatística F de 3,42. Embora o valor de  $p$  seja ligeiramente maior que o limite comum de 0,05, ele sugere uma tendência de que o teor de emulsão pode ter algum efeito sobre a DR. No entanto, a hipótese nula, que assume que o teor de emulsão não afeta significativamente a DR, não pode ser rejeitada com total confiança. Isso significa que, embora exista uma indicação de que o teor de emulsão pode influenciar a deformação resiliente, a evidência não é suficientemente forte para ser considerada estatisticamente significativa. Essa proximidade com o limiar de significância sugere que pode haver um risco de erro Tipo II, onde um efeito real do teor de emulsão poderia passar despercebido. Por outro lado, o número de ciclos de carregamento demonstra um efeito altamente significativo sobre a deformação resiliente, com um valor de  $p$  inferior a 0,001 e uma estatística F de 128,12. Esses resultados indicam que a hipótese nula, que sugere que os ciclos não afetam a DR, pode ser rejeitada com grande confiança. O valor F elevado sugere que o número de ciclos tem um impacto substancial na deformação resiliente, e a probabilidade de cometer um erro Tipo I ao rejeitar a hipótese nula é praticamente inexistente. Isso reforça a conclusão de que o aumento no número de ciclos está diretamente relacionado a um aumento significativo na deformação resiliente, destacando os ciclos de carregamento como um fator crucial na variação dessa variável.

Tabela 53: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre a DR para o solo 2

ANOVA: DR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Teor de Emulsão	0.00155	3	5.17e-4	3.42	0.053
Ciclos	0.07744	4	0.0194	128.12	< .001
Resíduos	0.00181	12	1.51e-4		

As barras de erro, Figura 221, indicam a pouca variabilidade das medições e mostram que há uma sobreposição entre os diferentes teores de emulsão, especialmente nos primeiros ciclos. No entanto, o padrão geral indica que o solo controle se deforma mais do que os solos com emulsão, e que, entre os solos com emulsão, o aumento do teor parece estar associado a uma ligeira redução na deformação resiliente. Esse comportamento sugere que a emulsão pode contribuir para melhorar a resistência do material à deformação sob cargas repetidas, sendo estas extremamente dependentes das tensões solicitantes, que para o caso em tela aumenta de maneira linear e proporcional ao aumento da tensão desvio.

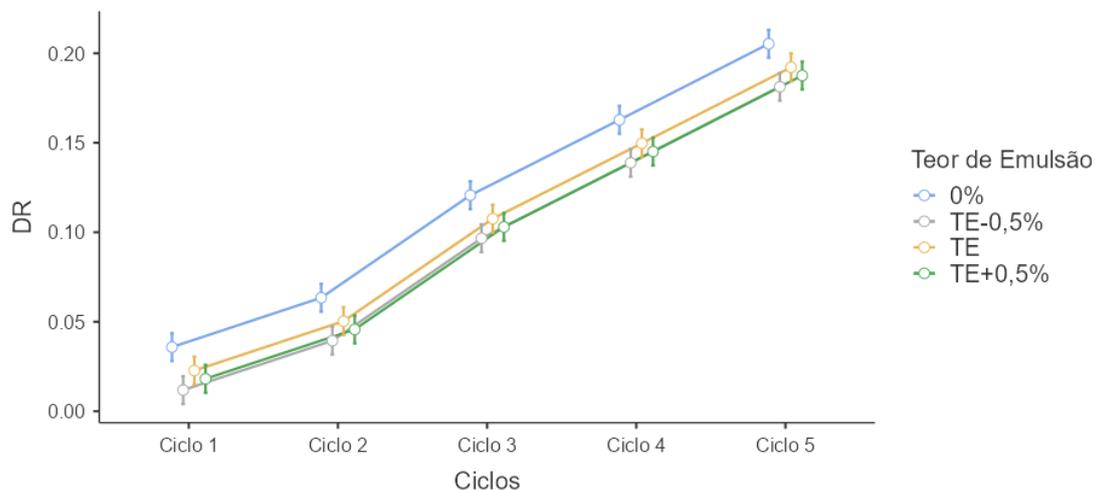


Figura 221: Interação entre ciclos\*teor de emulsão sobre a DR para o solo 2

A análise ANOVA, Tabela 54, indica que o teor de emulsão possui uma influência marginalmente significativa sobre o fator de forma "b", com um valor de  $p = 0,051$  e uma estatística F de 3,47. Embora o valor de p seja ligeiramente maior que o limiar convencional de 0,05, ele sugere uma tendência de que o teor de emulsão pode ter um efeito sobre "b". No entanto, essa evidência não é suficientemente forte para que possamos rejeitar a hipótese nula com confiança. Portanto, não há suporte estatístico robusto para afirmar que o teor de emulsão afeta significativamente o fator de forma "b". A proximidade do valor de p com o limiar de significância também implica um risco potencial de erro Tipo II, onde um possível efeito real

do teor de emulsão pode não ter sido detectado pela análise. Em relação ao número de ciclos de carregamento, a ANOVA revela que este fator não tem um efeito significativo sobre o fator de forma "b", com um valor de  $p = 0,110$  e uma estatística F de 2,38. Esses resultados indicam que a hipótese nula, que propõe que o número de ciclos não afeta significativamente "b", não pode ser rejeitada. Isso sugere que, dentro dos limites da análise realizada, o número de ciclos de carregamento não exerce uma influência estatisticamente significativa sobre o fator de forma "b". Assim como no caso do teor de emulsão, existe um risco de erro Tipo II, especialmente considerando que o valor de p, embora não próximo do limiar de significância, ainda não é tão elevado. Os resultados da ANOVA indicam que nem o teor de emulsão nem o número de ciclos têm um efeito estatisticamente significativo sobre o fator de forma "b". O teor de emulsão apresenta uma tendência próxima da significância, mas o valor de p ligeiramente acima de 0,05 impede a rejeição da hipótese nula com confiança. Da mesma forma, o número de ciclos não mostra um efeito significativo, com um valor de p de 0,110. Em ambos os casos, a possibilidade de cometer um erro Tipo II (não detectar um efeito quando ele realmente existe) deve ser considerada, especialmente para o teor de emulsão, dado o valor de p próximo ao limiar de significância.

Tabela 54: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre b para o solo 2

ANOVA: b	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Teor de Emulsão	0.0354	3	0.01181	3.47	0.051
Ciclos	0.0324	4	0.00811	2.38	0.110
Resíduos	0.0409	12	0.00341		

O gráfico da Figura 222 apresentado mostra a variação do coeficiente b em função dos ciclos, para diferentes teores de emulsão (0%, TE-0,5%, TE e TE+0,5%). Observa-se que, nos primeiros dois ciclos, os valores de b apresentam um aumento, atingindo seu pico no ciclo 2, independentemente do teor de emulsão. A partir do ciclo 3, há uma redução significativa no valor de b. No ciclo 4, os valores de b atingem seu mínimo, voltando a aumentar ligeiramente no ciclo 5. As barras de erro indicam a variabilidade dos dados, mostrando que, para teores mais elevados de emulsão (TE e TE+0,5%), essa variabilidade é maior nos ciclos iniciais. Isso sugere que o teor de emulsão influencia diretamente o comportamento do coeficiente b ao longo dos ciclos, com os teores mais altos apresentando maior estabilidade nos valores de b a partir do ciclo 3.

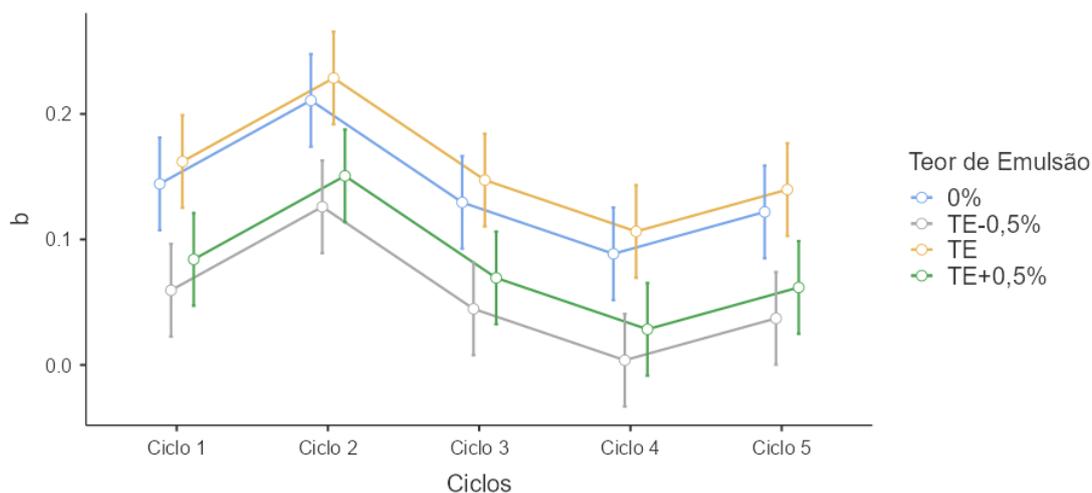


Figura 222: Interação entre ciclos\*teor de emulsão sobre b para o solo 2

A análise ANOVA revela que o teor de emulsão não tem um impacto estatisticamente significativo sobre o Módulo Resiliente (MR), com um valor de  $p = 0,235$  e uma estatística F de 1,63. Isso indica que a hipótese nula, que assume que o teor de emulsão não afeta o MR, não pode ser rejeitada com base nesses resultados. O valor de  $p$  maior que 0,05 sugere que as variações observadas no MR entre os diferentes teores de emulsão podem ser atribuídas ao acaso. Dessa forma, não há evidências estatísticas suficientes para afirmar que o teor de emulsão influencia significativamente o MR, e o risco de cometer um erro Tipo I, caso a hipótese nula fosse rejeitada, seria elevado. Em relação aos ciclos de carregamento, o resultado da ANOVA indica que o número de ciclos também não tem um efeito significativo sobre o Módulo Resiliente, com um valor de  $p = 0,167$  e uma estatística F de 1,95. Embora os ciclos de carregamento possam afetar outros parâmetros mecânicos do solo, os dados sugerem que, para o MR, o efeito dos ciclos não é suficientemente forte para ser considerado estatisticamente significativo. Assim como no caso do teor de emulsão, a hipótese nula não pode ser rejeitada, indicando que o número de ciclos não tem uma influência significativa sobre o MR nesta análise.

Tabela 55: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o MR para o solo 2

ANOVA: MR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Teor de Emulsão	2913	3	971	1.63	0.235
Ciclos	4656	4	1164	1.95	0.167
Resíduos	7160	12	597		

Durante os primeiros três ciclos, os valores de MR tendem a diminuir, atingindo o ponto mais baixo no ciclo 3, para em seguida aumentar nos ciclos 4 e 5. Esse comportamento é observado em todas as curvas, embora a linha azul (0%) apresente uma maior variação. Além disso, as barras de erro indicam a variabilidade dos dados em cada ciclo, com variações maiores nos teores de emulsão mais altos. Esse gráfico sugere que o acréscimo de emulsão melhora significativamente o Módulo Resiliente, com os teores TE-0,5%, TE, e TE+0,5% exibindo melhor desempenho em termos de resistência ao longo dos ciclos.

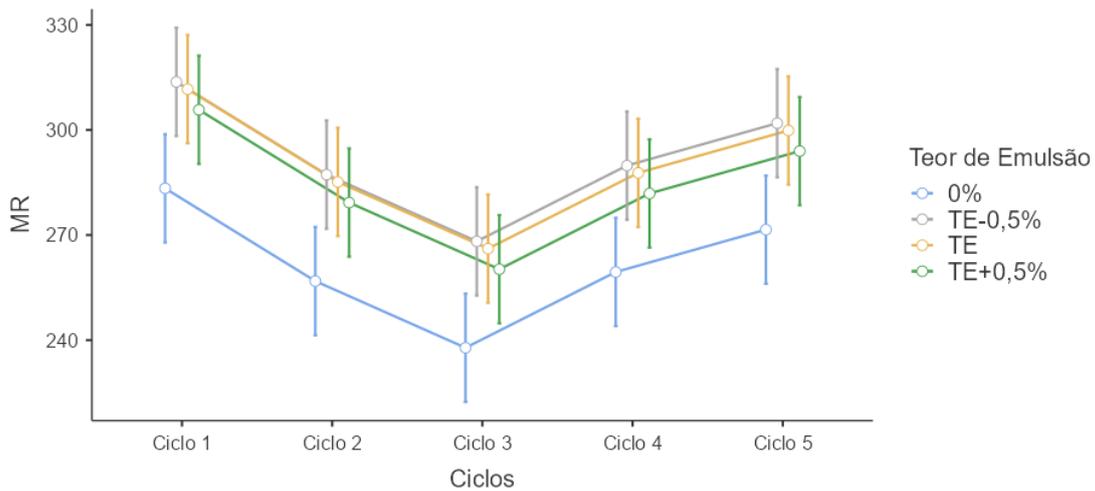


Figura 223: Interação entre ciclos\*teor de emulsão sobre o MR para o solo 2

O Solo 1 é fortemente afetado pelo teor de emulsão e pelo número de ciclos, com impactos significativos em todas as variáveis analisadas (DP, DR, MR e "b"). Em contraste, o Solo 2 mostra que o número de ciclos afeta de maneira substancial a DP e a DR, enquanto o teor de emulsão não apresenta impactos significativos em nenhuma das variáveis, sugerindo que o comportamento desse solo é menos sensível à adição de emulsão. O desempenho do Solo 1 é, portanto, mais dependente da emulsão, enquanto o Solo 2 parece ser mais influenciado pela carga cíclica.

## 5.8.2 Experimento 2

### 5.8.2.1 Solo 1

A ANOVA, Tabela 56 revela que o percentual de fresado, o número de ciclos e o teor de emulsão têm efeitos significativos na deformação permanente (DP) do material. O número de ciclos ( $p < 0,001$ ) e o teor de emulsão ( $p < 0,001$ ) mostram os impactos mais significativos,

seguidos pelo percentual de fresado ( $p = 0,009$ ). As interações entre o percentual de fresado e o teor de emulsão ( $p = 0,013$ ), assim como entre os ciclos e o teor de emulsão ( $p = 0,002$ ), também são significativas, indicando que a combinação desses fatores influencia a DP de forma relevante. Por outro lado, a interação entre o percentual de fresado e os ciclos não apresentou efeito significativo ( $p = 0,240$ ), sugerindo que essa combinação de fatores não afeta a DP de maneira relevante. Os resíduos baixos indicam que o modelo ajusta bem os dados, reforçando a validade dos resultados. Esses achados mostram que tanto os fatores isolados quanto algumas de suas interações desempenham um papel importante no comportamento do material em termos de deformação permanente.

Tabela 56: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre a DP para o solo 1

ANOVA: DP	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado	0.0197	2	0.00986	9	0.009
Ciclos	0.0869	4	0.02172	19.81	<0.01
Teor de Emulsão	0.0499	1	0.04994	45.54	<0.01
Percentual de Fresado * Ciclos	0.0147	8	0.00184	1.68	0.240
Percentual de Fresado * Teor de Emulsão	0.0171	2	0.00853	7.78	0.013
Ciclos * Teor de Emulsão	0.05519	4	0.01380	12.78	0.002
Resíduos	0.0640	8	0.00533		

O gráfico da Figura 224 mostra que a curva superior, que representa o solo e compostos com 2% de emulsão (TERL), apresenta os maiores valores de deformação permanente (DP) na maioria dos ciclos de carregamento. Em contraste, a curva inferior, sem emulsão (TE0%), apresenta menores valores de DP, indicando que a adição de emulsão aumenta a suscetibilidade à deformação permanente. Isso sugere que a emulsão contribui para uma maior deformação do solo e compostos quando exposto a cargas repetidas, em comparação com o solo controle (sem emulsão), que exibe uma resistência mais elevada. A influência do percentual de fresado (0%, 30%, e 50%) é evidente ao longo dos ciclos de carregamento. Nos primeiros ciclos, o aumento do fresado, ajuda a reduzir a DP para ambos os tipos de misturas (com e sem emulsão). No entanto, à medida que o número de ciclos aumenta, essa redução na DP torna-se menos pronunciada, especialmente no caso do composto com 2% de emulsão. Nos ciclos finais (4 e 5), a diferença entre os diferentes percentuais de fresado diminui, sugerindo que o fresado tem um efeito maior nos ciclos iniciais e que a repetição das cargas tende a nivelar os resultados entre os diferentes percentuais. O comportamento ao longo dos ciclos de carregamento revela

um aumento geral da DP para ambos os compostos (com e sem emulsão), especialmente no quinto ciclo, onde os valores de DP atingem seus picos. Nos primeiros ciclos, a diferença entre o solo com e sem emulsão é mais evidente, com o solo sem emulsão apresentando melhores resultados. No entanto, à medida que os ciclos avançam, o efeito dos ciclos de carregamento faz com que ambos os compostos apresentem uma maior deformação, e a influência do fresado se torna menos pronunciada.

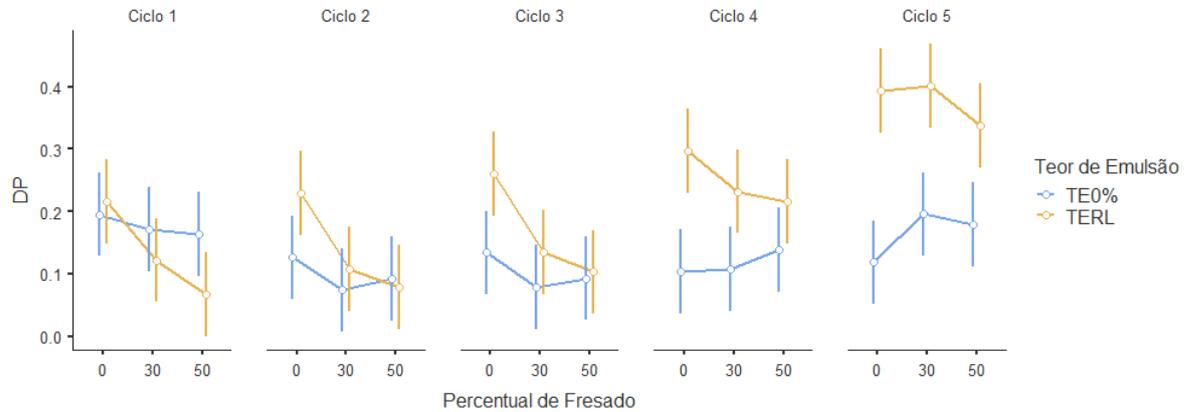


Figura 224: Efeito da interação entre ciclos, teor de emulsão e fresado sobre a DP para o solo 1

Os resultados da ANOVA, Tabela 57, indicam que o percentual de fresado e o número de ciclos são fatores significativamente influentes. O percentual de fresado apresentou um efeito significativo na DR ( $p = 0,005$ ), assim como o número de ciclos, que teve um impacto altamente significativo ( $p < 0,001$ ). Isso indica que tanto o aumento do fresado quanto o número de ciclos de carga afetam diretamente a capacidade do material de resistir à deformação resiliente. Por outro lado, o teor de emulsão não teve um efeito significativo sobre a DR de forma isolada ( $p = 0,227$ ), sugerindo que mudanças no teor de emulsão não afetam substancialmente a deformação resiliente. No entanto, a interação entre o percentual de fresado e o teor de emulsão apresentou um efeito significativo ( $p = 0,024$ ), indicando que a combinação desses fatores tem impacto relevante na DR.

Tabela 57: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre a DR para o solo 1

ANOVA: DR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado	1.95e-4	2	9.73e-5	11.1834	0.005
Ciclos	0.00987	4	0.00247	283.583 3	<.001
Teor de Emulsão	1.49e-5	1	1.49e-5	1.7105	0.227
Percentual de Fresado * Ciclos	1.25e-5	8	1.56e-6	0.1793	0.987

ANOVA: DR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado * Teor de Emulsão	1.07e-4	2	5.34e-5	6.1336	0.024
Ciclos * Teor de Emulsão	3.16e-6	4	7.90e-7	0.0907	0.983
Resíduos	6.96e-5	8	8.07e-6		

O gráfico da Figura 225 mostra que os compostos com 30% de fresado apresentam, de forma consistente, os menores valores de deformação resiliente ao longo dos ciclos, indicando uma resistência superior à DR em comparação ao solo (0% de fresado). O aumento do fresado para 50% parece oferecer uma resistência intermediária, enquanto o solo controle (TE0%) geralmente apresenta os maiores valores de DR. O teor de emulsão (TERL) parece reduzir ligeiramente a DR ao longo dos ciclos, mas seu efeito é mais visível nos ciclos posteriores.

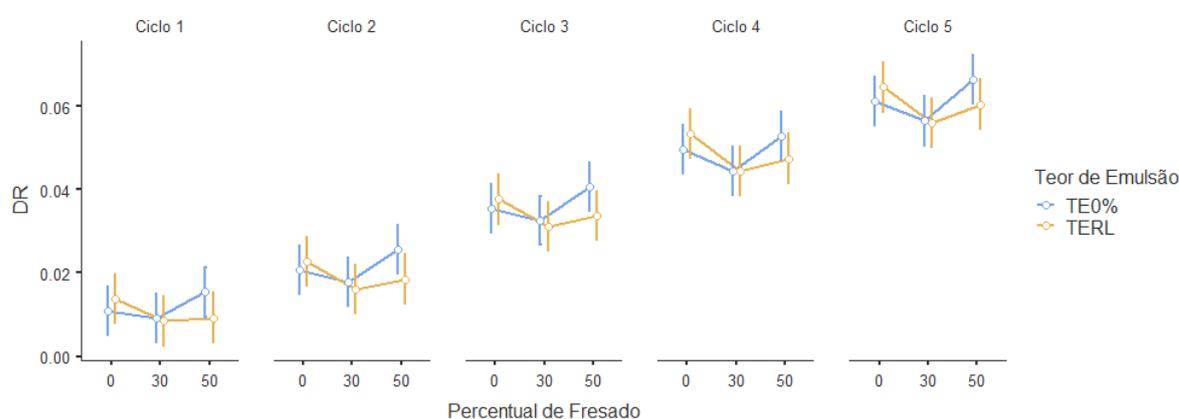


Figura 225: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a DR para o solo 1

A análise ANOVA, Tabela 58, para o fator de forma "b" revela que tanto o percentual de fresado quanto o teor de emulsão têm efeitos significativos sobre este parâmetro. O percentual de fresado apresentou um impacto altamente significativo ( $p = 0.001$ ), enquanto o teor de emulsão também influenciou de forma relevante ( $p = 0.006$ ). Por outro lado, o número de ciclos não mostrou efeito significativo sobre o coeficiente b ( $p = 0.363$ ), assim como as interações entre os fatores, que também não foram significativas. O comportamento do coeficiente b é fortemente influenciado pelo percentual de fresado e pelo teor de emulsão, enquanto o número de ciclos e as interações entre esses fatores não apresentaram impacto relevante.

Tabela 58: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre b para o solo 1

ANOVA: b	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado	0.07301	2	0.03650	17.29	0.001
Ciclos	0.01058	4	0.00265	1.253	0.363
Teor de Emulsão	0.02980	1	0.02980	14.12	0.006
Percentual de Fresado * Ciclos	0.01677	8	0.00210	0.993	0.504
Percentual de Fresado * Teor de Emulsão	0.00561	2	0.00280	1.329	0.317
Ciclos * Teor de Emulsão	0.00165	4	4.11e-4	0.195	0.983
Resíduos	0.01688	8	0.00154		

A interação entre os três fatores revela que o percentual de fresado tem um impacto significativo na redução dos valores de "b", sendo o composto com 50% de fresado o que mais reduziu o fator de forma em ambos os tipos de material, Figura 226. O solo e compostos com 2% de emulsão tende a reduzir o valor de "b" de forma consistente, apresentando valores menores em comparação o solo e compostos sem emulsão. A diferença entre os materiais com e sem emulsão é mais evidente nos ciclos iniciais, enquanto nos ciclos finais, a adição de fresado reduz essa diferença, especialmente no composto com 50% de fresado. O número de ciclos também desempenha um papel, com os valores de "b" diminuindo progressivamente à medida que os ciclos avançam.

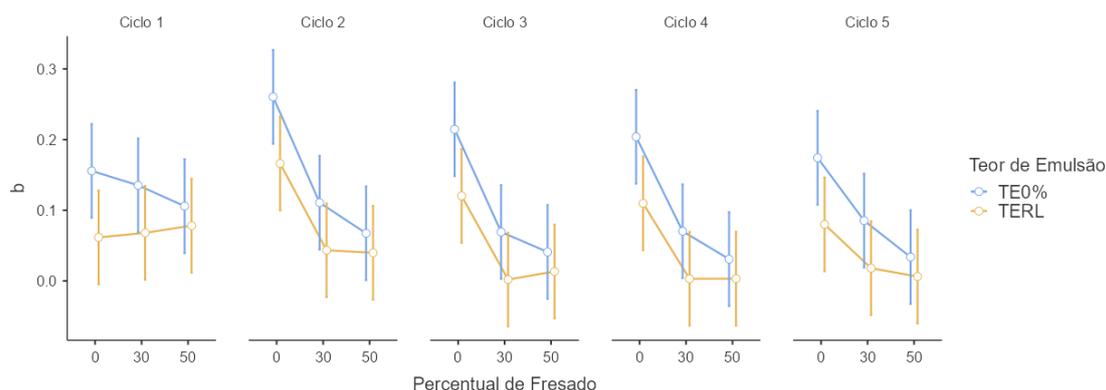


Figura 226: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre b para o solo 1

O Módulo Resiliente (MR) mostrou que tanto o percentual de fresado quanto o número de ciclos têm efeitos altamente significativos sobre o MR, com  $p < 0.001$  para ambos. Isso indica que a variação no fresado e o aumento no número de ciclos afetam substancialmente a rigidez do material. Por outro lado, o teor de emulsão isolado não teve um efeito significativo ( $p = 0.163$ ), sugerindo que mudanças no teor de emulsão não influenciam de maneira relevante o Módulo Resiliente. No entanto, a interação entre o percentual de fresado e o teor de emulsão

foi significativa ( $p = 0.006$ ), indicando que a combinação desses fatores afeta o comportamento resiliente do material. As interações entre o percentual de fresado e os ciclos e entre ciclos e teor de emulsão não mostraram efeitos significativos, sugerindo que essas combinações de fatores não influenciam de maneira relevante o MR.

Tabela 59. O Módulo Resiliente (MR) mostrou que tanto o percentual de fresado quanto o número de ciclos têm efeitos altamente significativos sobre o MR, com  $p < 0.001$  para ambos. Isso indica que a variação no fresado e o aumento no número de ciclos afetam substancialmente a rigidez do material. Por outro lado, o teor de emulsão isolado não teve um efeito significativo ( $p = 0.163$ ), sugerindo que mudanças no teor de emulsão não influenciam de maneira relevante o Módulo Resiliente. No entanto, a interação entre o percentual de fresado e o teor de emulsão foi significativa ( $p = 0.006$ ), indicando que a combinação desses fatores afeta o comportamento resiliente do material. As interações entre o percentual de fresado e os ciclos e entre ciclos e teor de emulsão não mostraram efeitos significativos, sugerindo que essas combinações de fatores não influenciam de maneira relevante o MR.

Tabela 59: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre o MR para o solo 1

ANOVA: MR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado	151028	2	75514	35.162	<.001
Ciclos	287036	4	71759	33.414	<.001
Teor de Emulsão	5073	1	5073	2.362	0.163
Percentual de Fresado * Ciclos	4379	8	547	0.255	0.965
Percentual de Fresado * Teor de Emulsão	43885	2	21942	10.217	0.006
Ciclos * Teor de Emulsão	7841	4	1960	0.913	0.501
Resíduos	17181	8	2148		

O gráfico da Figura 227 revela que o composto com 30% de fresado proporciona consistentemente os maiores valores de Módulo Resiliente (MR) ao longo de todos os ciclos de carregamento, destacando-se como o percentual mais eficiente para melhorar a resistência resiliente dos compostos. O composto com 50% fresado também contribui para o aumento do MR, mas com valores ligeiramente inferiores aos observados com 30% de fresado. O material com 2% de emulsão (TERL), por sua vez, tende a apresentar valores de MR um pouco superior em comparação ao solo controle (TE0%), especialmente quando combinado com fresado. No entanto, a diferença entre os teores de emulsão é sutil e diminui à medida que os ciclos de carregamento aumentam, sugerindo uma estabilização no comportamento mecânico do

material. O aumento do número de ciclos resulta em um crescimento geral do MR. O composto com 30% de fresado e 2% de emulsão é o mais eficaz para incrementar o MR, oferecendo uma leve vantagem, especialmente em ciclos iniciais.

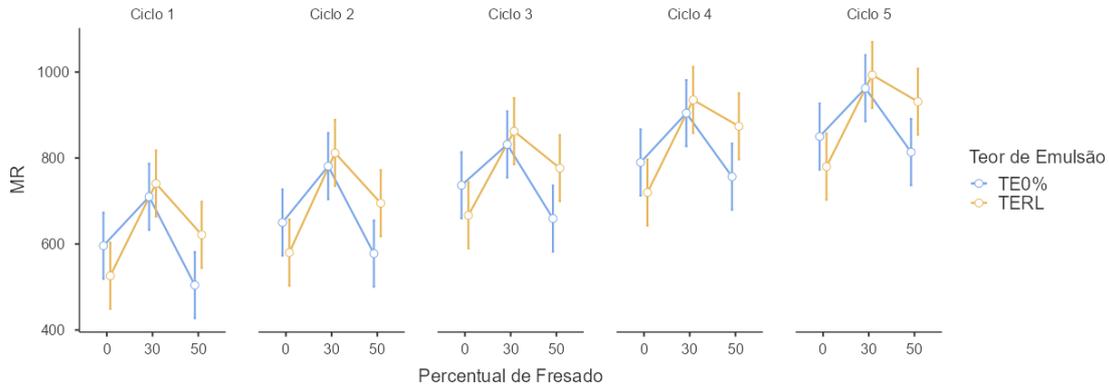


Figura 227: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre o MR para o solo 1

### 5.8.2.2 Solo 2

A análise de variância (ANOVA), Tabela 60, realizada para avaliar o efeito do percentual de fresado, dos ciclos e do teor de emulsão sobre a deformação permanente (DP) no solo 2 revelou que todos os fatores principais influenciam significativamente a DP. O percentual de fresado apresentou um efeito significativo, com F de 343.823 e  $p < 0.001$ , indicando que diferentes percentuais de fresado afetam de maneira importante a deformação permanente. Da mesma forma, o número de ciclos demonstrou um impacto altamente relevante na DP, com F de 417.622 e  $p < 0.001$ . O teor de emulsão também teve um efeito significativo, com F de 227.060 e  $p < 0.001$ , sugerindo que variações nesse teor influenciam a DP. Além dos efeitos principais, foi identificada uma interação significativa entre o percentual de fresado e os ciclos, com F de 28.485 e  $p < 0.001$ , o que significa que a influência do fresado na DP varia conforme o número de ciclos. No entanto, a interação entre o percentual de fresado e o teor de emulsão não foi significativa, com F de 0.819 e  $p = 0.475$ , indicando que o efeito do fresado não depende significativamente do teor de emulsão. Em contrapartida, a interação entre ciclos e teor de emulsão foi significativa, com F de 46.410 e  $p < 0.001$ , sugerindo que a influência dos ciclos na DP varia de acordo com o teor de emulsão. Por fim, os resíduos apresentaram uma soma dos quadrados baixa (0.00239), indicando que o modelo explica a maior parte da variação observada na DP. Assim, conclui-se que o percentual de fresado, os ciclos e o teor de emulsão

afetam significativamente a DP, com interações importantes entre fresado e ciclos, bem como entre ciclos e teor de emulsão.

Tabela 60: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre a DP para o solo 2

ANOVA: DP	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado	0.20543	2	0.10272	343.823	< .001
Ciclos	0.49905	4	0.12476	417.622	< .001
Teor de emulsão	0.06783	1	0.06783	227.060	< .001
Percentual de Fresado * Ciclos	0.06808	8	0.00851	28.485	< .001
Percentual de Fresado * Teor de emulsão	4.90e-4	2	2.45e-4	0.819	0.475
Ciclos * Teor de emulsão	0.05546	4	0.01386	46.410	< .001
Resíduos	0.00239	8	2.99e-4		

O gráfico da Figura 228 mostra que o composco com 30% fresado consistentemente oferece a maior resistência à deformação permanente ao longo de todos os ciclos de carregamento, com os menores valores de DP tanto para o solo controle quanto para o material com 1% de emulsão (TERL). O solo controle (TE0%) apresenta os piores resultados em termos de DP, especialmente nos ciclos finais, onde a diferença em relação ao material com emulsão se torna mais pronunciada. O material com 1% de emulsão (TERL) mostra maior suscetibilidade à deformação permanente, particularmente nos ciclos finais, destacando a importância de se considerar o efeito da emulsão sobre o desempenho do material.

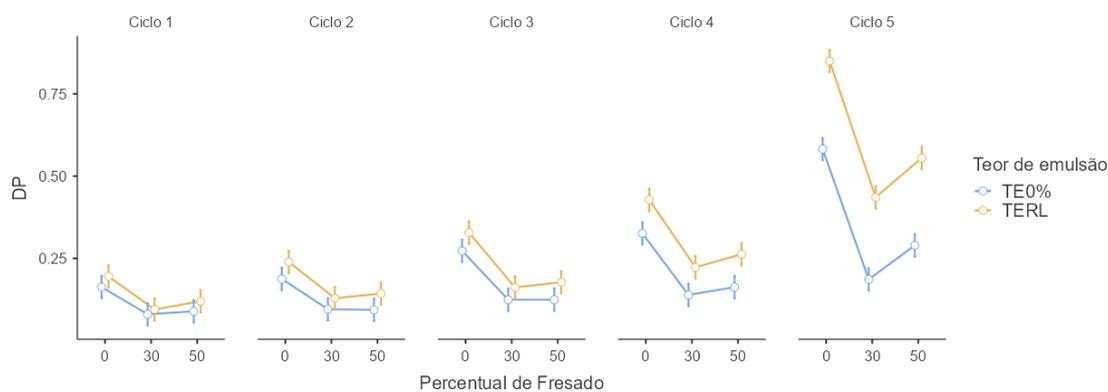


Figura 228: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a DP para o solo 2

A análise de variância (ANOVA) para a deformação resiliente (DR) revela os seguintes resultados. O percentual de fresado teve um efeito significativo, com F de 267.9691 e  $p < 0.001$ , demonstrando que diferentes percentuais de fresado influenciam consideravelmente a DR. Os ciclos também apresentaram um efeito significativo, com F de 493.0375 e  $p < 0.001$ , indicando que o número de ciclos afeta de maneira relevante a deformação resiliente. No entanto, o teor

de emulsão não apresentou um efeito significativo, com F de 1.5118 e  $p = 0.254$ , sugerindo que variações no teor de emulsão não têm um impacto estatisticamente relevante sobre a DR. A interação entre o percentual de fresado e os ciclos foi significativa, com F de 31.4730 e  $p < 0.001$ , indicando que o efeito do fresado na DR depende do número de ciclos. A interação entre o percentual de fresado e o teor de emulsão também foi significativa, com F de 13.9141 e  $p = 0.002$ , sugerindo que o efeito do fresado na DR varia conforme o teor de emulsão. Entretanto, a interação entre os ciclos e o teor de emulsão não foi significativa, com F de 0.0632 e  $p = 0.991$ , indicando que o número de ciclos e o teor de emulsão não têm uma interação relevante sobre a DR. Por fim, os resíduos apresentaram uma soma dos quadrados muito baixa ( $2.71e-4$ ), com um quadrado médio residual de  $3.38e-5$ , indicando que o modelo explica a maior parte da variação observada na deformação resiliente. Assim, conclui-se que o percentual de fresado e os ciclos influenciam significativamente a DR, enquanto o teor de emulsão não apresenta efeito isolado significativo, mas há uma interação significativa entre o percentual de fresado e o teor de emulsão.

Tabela 61: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre a DR para o solo 2

ANOVA: DR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado	0.01813	2	0.00906	267.9691	<.001
Ciclos	0.06670	4	0.01668	493.0375	<.001
Teor de emulsão	5.11e-5	1	5.11e-5	1.5118	0.254
Percentual de Fresado * Ciclos	0.00852	8	0.00106	31.4730	<.001
Percentual de Fresado * Teor de emulsão	9.41e-4	2	4.71e-4	13.9141	0.002
Ciclos * Teor de emulsão	8.55e-6	4	2.14e-6	0.0632	0.991
Resíduos	2.71e-4	8	3.38e-5		

O gráfico da Figura 229 mostra que o composto com 30 % de **fresado** oferece consistentemente a maior resistência à deformação resiliente ao longo dos ciclos, com os menores valores de DR tanto para o solo controle quanto para o material com emulsão. O fresado de 50% apresenta um desempenho intermediário, enquanto o solo controle (TE0%) tende a apresentar valores ligeiramente superiores de DR, especialmente nos ciclos finais. A influência do teor de emulsão (TERL) é sutil, com uma leve vantagem observada nos ciclos finais, indicando que o impacto da emulsão sobre a DR se torna mais evidente à medida que o número de ciclos aumenta, mas não de maneira significativa.

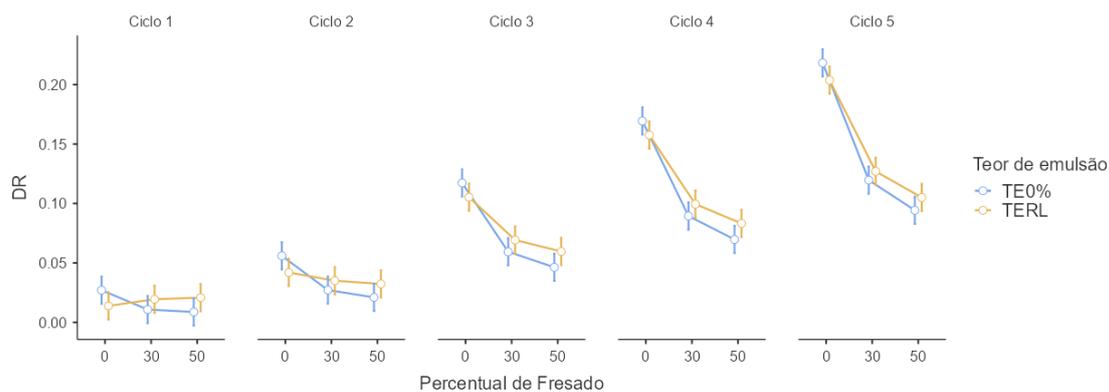


Figura 229: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a DR para o solo 2

A análise de variância (ANOVA), Tabela 62, realizada para o coeficiente "b" revela que o percentual de fresado tem um efeito significativo, com F de 21.63144 e  $p < 0.001$ , indicando que diferentes percentuais de fresado influenciam de maneira relevante o valor do coeficiente "b". Além disso, a variável ciclos também apresentou um efeito significativo, com F de 17.68671 e  $p < 0.001$ , sugerindo que o número de ciclos afeta significativamente o coeficiente "b". Por outro lado, o teor de emulsão não demonstrou um efeito significativo, com F de 0.00586 e  $p = 0.941$ , o que indica que a variação no teor de emulsão não tem impacto significativo sobre "b". A interação entre o percentual de fresado e os ciclos também não foi estatisticamente significativa, embora estivesse próxima do limite de significância, com F de 3.02943 e  $p = 0.069$ , sugerindo que há uma possível interação marginal entre essas duas variáveis. Já a interação entre o percentual de fresado e o teor de emulsão não foi significativa, com F de 2.41676 e  $p = 0.151$ , assim como a interação entre ciclos e teor de emulsão, que apresentou F de 1.52562 e  $p = 0.283$ . Por fim, os resíduos apresentaram uma soma dos quadrados baixa (0.01035), indicando que o modelo é capaz de explicar grande parte da variação observada no coeficiente "b". Portanto, os resultados indicam que tanto o percentual de fresado quanto os ciclos afetam significativamente o coeficiente "b", enquanto o teor de emulsão e as interações entre as variáveis não mostraram influência significativa.

Tabela 62: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre b para o solo 2

ANOVA: b	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado	0.05599	2	0.02800	21.63144	< .001
Ciclos	0.09157	4	0.02289	17.68671	< .001
Teor de emulsão	7.58e-6	1	7.58e-6	0.00586	0.941
Percentual de Fresado * Ciclos	0.03137	8	0.00392	3.02943	0.069
Percentual de Fresado * Teor de emulsão	0.00626	2	0.00313	2.41676	0.151

ANOVA: b	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Ciclos * Teor de emulsão	0.00790	4	0.00197	1.52562	0.283
Resíduos	0.01035	8	0.00129		

O gráfico mostra que o composto com 30% de fresado é o mais eficaz na redução do fator de forma "b", proporcionando consistentemente os menores valores ao longo dos ciclos de carregamento. O composto com de 50% de fresado também contribui para a redução de "b", mas com um desempenho ligeiramente inferior ao composto com 30% de fresado. A estabilização com 1% de emulsão (TERL) apresenta um efeito sutil sobre o fator de forma, com pequenas diferenças em relação ao solo controle (TE0%), principalmente nos ciclos iniciais. Nos ciclos finais, a influência da emulsão se estabiliza, com o fresado desempenhando um papel mais importante na modificação de "b".

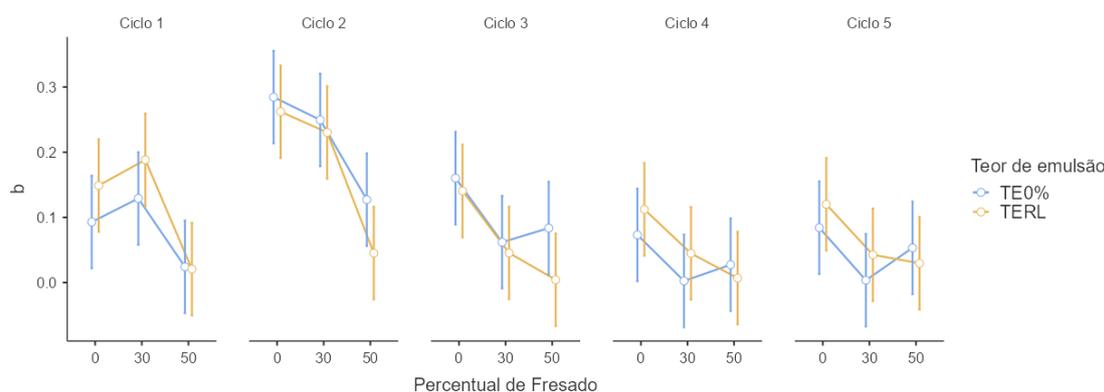


Figura 230: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a b para o solo 2

A análise de variância (ANOVA), Tabela 63, para a variável "Módulo Resiliente" (MR) revelou os seguintes resultados. O percentual de fresado apresentou um efeito altamente significativo sobre o MR, com F de 164.373 e  $p < 0.001$ , indicando que diferentes percentuais de fresado influenciam fortemente o módulo resiliente. Já a variável ciclos não teve um efeito significativo, com F de 0.649 e  $p = 0.644$ , sugerindo que o número de ciclos não afeta de forma relevante o MR. O teor de emulsão apresentou um efeito significativo sobre o MR, com F de 25.093 e  $p = 0.001$ , indicando que a variação no teor de emulsão influencia de maneira relevante o módulo resiliente. A interação entre o percentual de fresado e os ciclos não foi significativa, com F de 1.893 e  $p = 0.193$ , sugerindo que o efeito do fresado no MR não depende significativamente do número de ciclos. Por outro lado, a interação entre o percentual de fresado e o teor de emulsão foi significativa, com F de 20.351 e  $p < 0.001$ , mostrando que a influência do fresado no MR depende do teor de emulsão. A interação entre ciclos e teor de emulsão não foi significativa, com F de 0.466 e  $p = 0.760$ , indicando que a combinação de ciclos e teor de

emulsão não tem efeito significativo sobre o MR. Por fim, os resíduos apresentaram uma soma dos quadrados baixa (7879) e um quadrado médio residual de 985, o que indica que o modelo explica grande parte da variação observada no MR. Em resumo, o percentual de fresado e o teor de emulsão têm efeitos significativos no módulo resiliente, enquanto os ciclos e as interações entre ciclos e outras variáveis não mostram influência relevante. A interação entre o percentual de fresado e o teor de emulsão também foi significativa, destacando a interdependência desses fatores na determinação do MR.

Tabela 63: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre b para o solo 2

ANOVA: MR	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Fresado	323770	2	161885	164.373	< .001
Ciclos	2556	4	639	0.649	0.644
Teor de emulsão	24713	1	24713	25.093	0.001
Percentual de Fresado * Ciclos	14913	8	1864	1.893	0.193
Percentual de Fresado * Teor de emulsão	40086	2	20043	20.351	< .001
Ciclos * Teor de emulsão	1837	4	459	0.466	0.760
Resíduos	7879	8	985		

O gráfico da Figura 231 indica que o composto com 50% de fresado oferece a maior resistência resiliente ao longo dos ciclos de carregamento, com os maiores valores de Módulo Resiliente (MR), seguido pelo composto com 30% de fresado. O solo controle (TE0%) apresenta consistentemente melhores resultados em termos de MR em comparação ao material com 1% de emulsão (TERL), especialmente nos ciclos iniciais. À medida que os ciclos progridem, a diferença entre o solo controle e o material com emulsão diminui, mas o solo controle mantém uma vantagem em termos de rigidez, particularmente para os compostos com fresado. A adição de fresado, especialmente em 50%, é fundamental para melhorar o desempenho do MR.

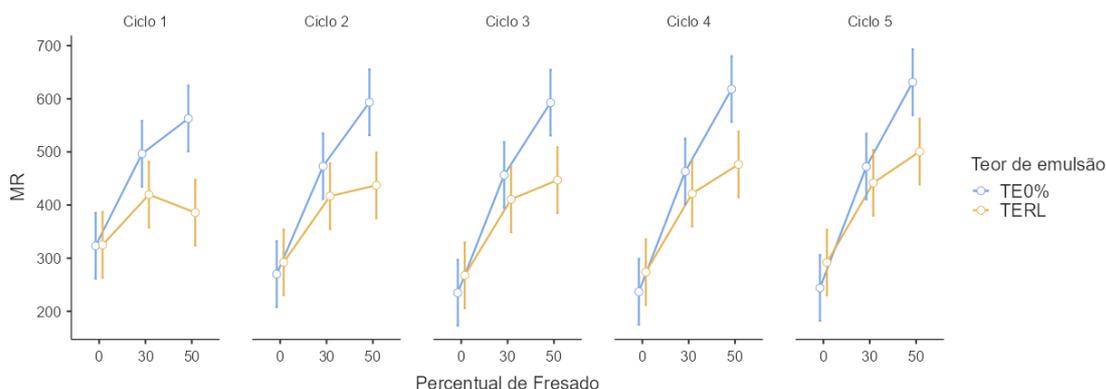


Figura 231: Efeito da interação entre ciclos teor de emulsão e fresado sobre a b para o solo 2

### 5.8.3 Experimento 3

#### 5.8.3.1 Solo 1

O percentual de emulsão teve um impacto altamente significativo sobre o MR, com um valor de  $p < 0,001$  e uma estatística F de 489,46. Isso indica que a quantidade de emulsão utilizada afeta substancialmente o MR, aumentando a resistência resiliente do solo. O efeito da emulsão é um dos principais fatores de variação no desempenho do solo, com um impacto muito elevado. Os ciclos de carregamento também apresentaram um efeito altamente significativo sobre o MR, com  $p < 0,001$  e uma estatística F de 295,72. Isso sugere que o número de ciclos tem uma influência marcante na rigidez do solo, contribuindo para o aumento do MR à medida que mais ciclos são aplicados. Esse efeito mostra que o material se torna progressivamente mais resistente com o aumento da repetição de cargas. A interação entre o percentual de emulsão e os ciclos de carregamento também foi significativa, com  $p < 0,001$  e uma estatística F de 7,48. Isso sugere que o efeito da emulsão sobre o MR varia conforme o número de ciclos de carregamento, ou seja, o comportamento do solo em termos de resistência resiliente é influenciado pela combinação desses dois fatores. A interação indica que o efeito da emulsão é modificado pelo número de ciclos, sendo mais ou menos pronunciado conforme o solo é submetido a um maior número de cargas. O valor residual, ou seja, a variação não explicada pelos fatores analisados, é relativamente pequeno (Soma de Quadrados = 23.414), indicando que o modelo explica bem a maior parte da variação observada no MR, conforme dados da ANOVA da Tabela 64.

Tabela 64: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o MR segundo norma DNIT 134 para o solo 1

ANOVA: MR(DNIT134)	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Emulsão	716267	3	238756	489.46	<.001
Ciclos	721255	5	144251	295.72	<.001
Percentual de Emulsão * Ciclos	54703	15	3647	7.48	<.001
Resíduos	23414	48	488		

O gráfico da Figura 232 revela que tanto o percentual de emulsão quanto o número de ciclos de carregamento são fatores determinantes no comportamento resiliente do solo. Materiais com maiores teores de emulsão tendem a apresentar maior resistência e se tornam mais rígidos com o aumento dos ciclos, enquanto o solo controle, sem emulsão, tem o pior desempenho. O solo estabilizado com 2,5% de emulsão é o que mostra o melhor comportamento em termos de aumento de MR, indicando que a adição de emulsão é altamente eficaz na melhoria da resistência resiliente do material ao longo do tempo e dos ciclos de carregamento.

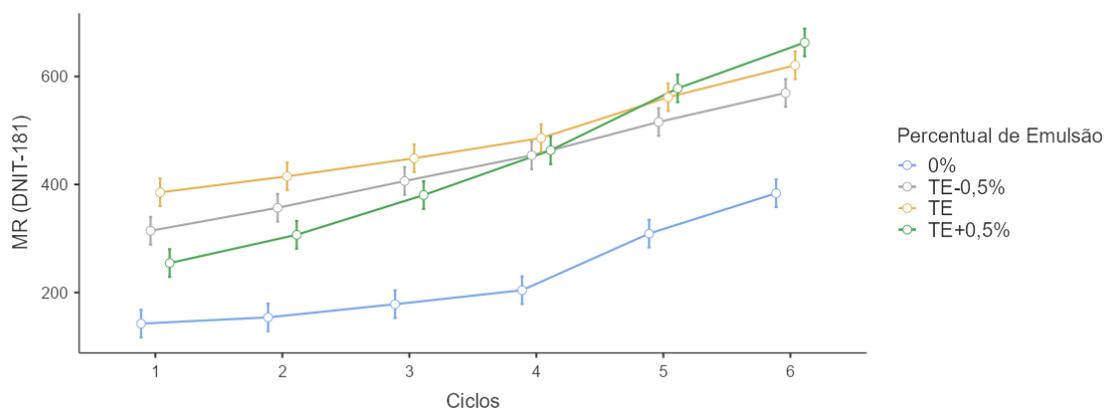


Figura 232: Efeito da interação entre o teor de emulsão e os ciclos no MR do solo 1

### 5.8.3.2 Solo 2

O percentual de emulsão não apresentou um impacto significativo sobre o MR, com um valor de  $p = 0,505$  e uma estatística F de 0,790. Isso indica que, para o Solo 2, a variação no teor de emulsão (dentro dos níveis analisados) não tem uma influência estatisticamente significativa sobre o Módulo Resiliente. Nesse caso, a hipótese nula, que assume que o percentual de emulsão não afeta o MR, não pode ser rejeitada. Os **ciclos de carregamento** também não apresentaram uma influência significativa sobre o MR, com um valor de  $p = 0,129$  e uma estatística F de 1,807. Embora haja uma tendência de aumento no MR com o número de

ciclos, ela não é forte o suficiente para ser considerada significativa, sugerindo que o comportamento resiliente do Solo 2 não é altamente sensível à repetição de cargas. A interação entre o percentual de emulsão e os ciclos de carregamento também não foi significativa, com um valor de  $p = 0,999$  e uma estatística F de 0,212. Isso significa que o efeito combinado do teor de emulsão e do número de ciclos de carregamento não tem um impacto significativo sobre o MR para o Solo 2. Em outras palavras, a resistência resiliente do Solo 2 não é afetada de maneira relevante pela interação entre esses dois fatores, conforme dados da ANOVA da Tabela 65

Tabela 65: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão e dos ciclos sobre o MR segundo norma DNIT 134 para o solo 2

ANOVA: MR(DNIT134)	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Emulsão	2596	3	865	0.790	0.505
Ciclos	9890	5	1978	1.807	0.129
Percentual de Emulsão * Ciclos	3475	15	232	0.212	0.999
Resíduos	52549	48	1095		

O gráfico da Figura 233 demonstra que, para o Solo 2, os percentuais de emulsão não parecem ter um impacto significativo sobre o Módulo Resiliente (MR) ao longo dos ciclos de carregamento, com todas as curvas apresentando comportamentos muito próximos. Embora haja uma leve tendência de queda nos valores de MR nos primeiros ciclos, o comportamento se estabiliza após o ciclo 3, sugerindo que o Solo 2 atinge um estado estável de rigidez, independentemente do teor de emulsão. Esses resultados estão alinhados com a análise ANOVA anterior, que mostrou a ausência de efeitos significativos do percentual de emulsão e dos ciclos sobre o MR para este solo.

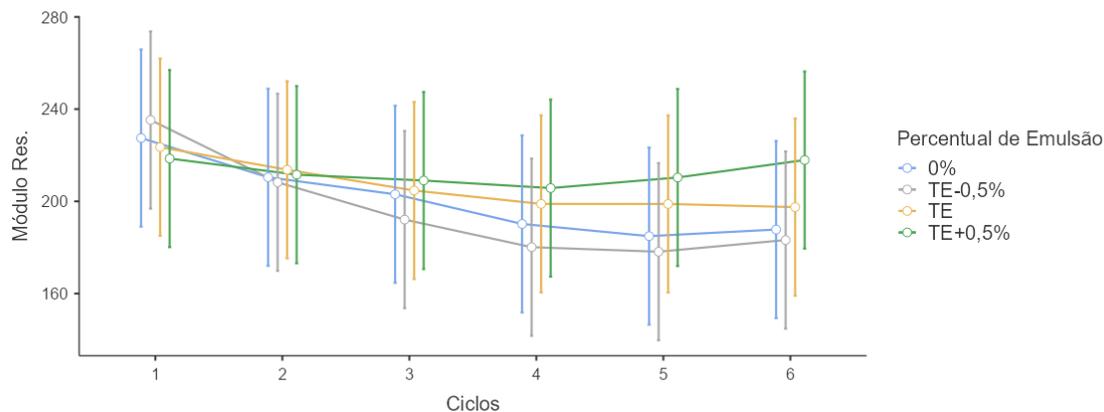


Figura 233: Efeito da interação entre o teor de emulsão e os ciclos no MR do solo 2

#### 5.8.4 Experimento 4

##### 5.8.4.1 Solo 1

Os ciclos de carregamento apresentaram um impacto altamente significativo sobre o MR, com um valor de  $p < 0,001$  e uma estatística F de 525,31. Isso indica que o número de ciclos afeta substancialmente o comportamento resiliente do solo com fresado, aumentando o MR à medida que mais ciclos são aplicados. O aumento progressivo do MR sugere que o material se torna mais rígido e resistente conforme é submetido a múltiplas cargas. O percentual de fresado também foi um fator altamente significativo, com  $p < 0,001$  e uma estatística F de 463,54. A variação no teor de fresado afeta diretamente o MR, com maiores percentuais de fresado levando a um aumento significativo na rigidez do material. Isso sugere que o fresado melhora o desempenho mecânico do solo em termos de resistência resiliente. O percentual de emulsão teve um efeito significativo sobre o MR, com  $p < 0,001$  e uma estatística F de 524,46. A emulsão aumenta o MR de forma significativa, indicando que a adição de emulsão contribui para uma maior rigidez do solo com fresado. Esse efeito é comparável ao do fresado, mostrando que ambos os fatores têm impacto significativo na melhoria do desempenho do material. A interação entre ciclos e percentual de fresado foi significativa ( $p < 0,001$ ,  $F = 13,71$ ), sugerindo que o efeito dos ciclos sobre o MR varia de acordo com o teor de fresado. Isso implica que o fresado modula a forma como o material reage ao aumento no número de ciclos de carregamento. Esta interação também foi significativa ( $p < 0,001$ ,  $F = 12,19$ ), indicando que o efeito dos ciclos no MR depende do percentual de emulsão utilizado. O comportamento resiliente do material é afetado pela combinação desses dois fatores. Percentual de Fresado \*

Percentual de Emulsão: A interação entre o fresado e a emulsão foi altamente significativa ( $p < 0,001$ ,  $F = 486,20$ ), sugerindo que a combinação desses dois fatores tem um impacto substancial no MR. Isso indica que a emulsão e o fresado, juntos, proporcionam uma melhoria sinérgica no desempenho do material. A interação tripla entre ciclos, fresado e emulsão foi significativa ( $p = 0,002$ ,  $F = 3,17$ ), sugerindo que a influência combinada dos três fatores afeta o MR, embora de forma menos pronunciada do que as interações duplas. O valor residual (Soma de Quadrados = 43.304) é relativamente baixo, indicando que o modelo explica bem a maior parte da variação observada no MR, conforme dados da ANOVA da Tabela 65.

Tabela 66: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre o MR segundo norma DNIT 134 para o solo 1

ANOVA: Módulo Res.	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Ciclos	1.58e+6	5	315944	525.31	<.001
Percentual de Fresado	557591	2	278795	463.54	<.001
Percentual de Emulsão	315434	1	315434	524.46	<.001
Ciclos * Percentual de Fresado	82435	10	8244	13.71	<.001
Ciclos * Percentual de Emulsão	36656	5	7331	12.19	<.001
Percentual de Fresado * Percentual de Emulsão	584848	2	292424	486.20	<.001
Ciclos * Percentual de Fresado * Percentual de Emulsão	19093	10	1909	3.17	0.002
Resíduos	43304	72	601		

Na Figura 234, observa-se que a adição de emulsão (TE) melhora substancialmente o módulo resiliente, independentemente do percentual de fresado. Um maior percentual de fresado (50%) está associado a um maior módulo resiliente, especialmente quando combinado com emulsão. À medida que os ciclos avançam, o comportamento do módulo resiliente se torna mais variável, mas o efeito positivo da combinação de emulsão e fresado se destaca mais claramente.

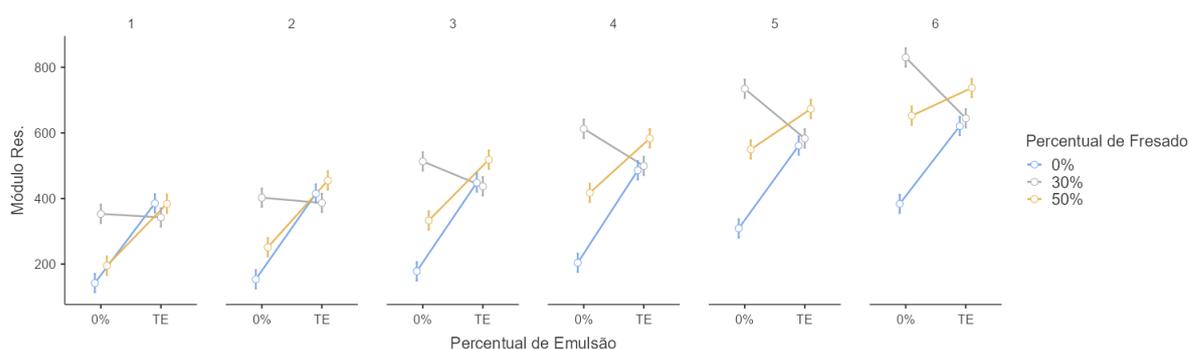


Figura 234: Efeito da interação entre o teor de emulsão, ciclos e fresado no MR do solo 1

#### 5.8.4.2 Solo 2

O percentual de emulsão apresentou um efeito altamente significativo no desempenho do material, com um valor F elevado (77.606) e um p-valor menor que 0,001, o que indica que essa variável tem uma influência clara sobre o comportamento da estrutura avaliada. Esse resultado sugere que a adição de emulsão ao composto afeta diretamente a estabilidade e resistência do material ao longo dos ciclos de carregamento. A emulsão, sendo um agente estabilizador, contribui para a melhoria da coesão do composto, o que pode refletir na redução de deformações permanentes. O percentual de fresado teve o maior impacto isolado entre as variáveis testadas, com um valor F extremamente alto (254.104), mostrando que essa variável é a mais influente no modelo. A presença do fresado altera as características do composto, possivelmente aumentando a rigidez do material e influenciando diretamente sua capacidade de resistir aos ciclos de carga. O fresado, ao ser incorporado, pode aumentar a resistência estrutural, já que se trata de um material recuperado que contém propriedades de rigidez inerentes. Os ciclos de carga também apresentaram um efeito significativo, embora de menor magnitude em comparação com o fresado e a emulsão. Com um valor F de 15.066, o número de ciclos afeta significativamente o desempenho do material, indicando que, à medida que a quantidade de ciclos aumenta, o comportamento do material se altera, possivelmente devido à acumulação de deformações permanentes. Esse resultado é importante porque reflete a degradação do material ao longo do tempo, conforme é submetido a esforços repetitivos, um fator crítico em pavimentação. A interação entre o percentual de emulsão e o percentual de fresado é significativa, com um valor F de 64.229. Isso indica que o efeito da emulsão varia dependendo da quantidade de fresado no composto, o que sugere uma sinergia entre essas duas variáveis. A emulsão pode melhorar a coesão entre as partículas do fresado, otimizando a performance do material. Esse resultado evidencia que o comportamento do material não é determinado apenas por cada fator isoladamente, mas pela combinação de ambos, o que pode ser essencial para desenvolver uma mistura ideal de fresado e emulsão para aplicações rodoviárias. A interação entre o percentual de emulsão e o número de ciclos não foi significativa ( $p = 0.984$ ). Isso indica que o efeito da emulsão no desempenho do material não depende do número de ciclos. Em outras palavras, a adição de emulsão afeta o comportamento do material de maneira consistente ao longo dos ciclos, sem grandes variações ao longo do tempo ou com a repetição de cargas. Esse resultado sugere que, embora a emulsão tenha um impacto inicial

significativo, o aumento do número de ciclos não intensifica ou modifica sua influência. A interação entre o percentual de fresado e o número de ciclos é significativa ( $p < .001$ ), indicando que o efeito do fresado varia com o número de ciclos. Este resultado pode sugerir que, à medida que o número de ciclos aumenta, o material com maiores percentuais de fresado apresenta um desempenho distinto. Isso poderia estar relacionado à rigidez aumentada do material fresado, que pode proporcionar resistência inicial, mas que, com o tempo, pode se deteriorar de forma diferente dependendo do número de ciclos aplicados. A interação tripla entre o percentual de emulsão, o percentual de fresado e o número de ciclos não foi significativa ( $p = 0.672$ ). Isso indica que o efeito combinado dessas três variáveis não é relevante para o comportamento do material. Portanto, embora as interações duplas tenham sido significativas, a adição do terceiro fator (ciclos) à combinação de fresado e emulsão não altera significativamente o resultado final. Os resíduos, que representam a variação não explicada pelo modelo, são relativamente baixos, sugerindo que o modelo captura bem a variação total nos dados. Isso confirma a adequação do modelo ANOVA para explicar o comportamento observado na Tabela 67.

Tabela 67: (ANOVA) para avaliar o efeito do teor de emulsão, dos ciclos e do fresado sobre o MR segundo norma DNIT 134 para o solo 2

ANOVA: Módulo Res.	Soma de Quadrados	gl	Quadrado médio	F	p
Percentual de Emulsão	78263	1	78263	77.606	<.001
Percentual de Fresado	512508	2	256254	254.104	<.001
Ciclos	75968	5	15194	15.066	<.001
Percentual de Emulsão * Percentual de Fresado	129545	2	64773	64.229	<.001
Percentual de Emulsão * Ciclos	671	5	134	0.133	0.984
Percentual de Fresado * Ciclos	85408	10	8541	8.469	<.001
Percentual de Emulsão * Percentual de Fresado * Ciclos	7602	10	760	0.754	0.672
Resíduos	72609	72	1008		

A análise do gráfico da Figura 234 sugere que, ao longo dos ciclos, o uso de fresado em altas proporções (50%) combinado com emulsão (TE) resulta em uma redução significativa do módulo resiliente. A combinação de 30% de fresado com emulsão também afeta o desempenho, mas em menor grau, enquanto o comportamento do material com 0% de fresado se mantém mais estável ao longo dos ciclos. Esses resultados indicam que a utilização de altas quantidades de fresado com emulsão pode reduzir a rigidez do material ao longo do tempo. Isso sugere a necessidade de otimização no uso de fresado e emulsão para manter o desempenho adequado do pavimento ao longo dos ciclos de carga.

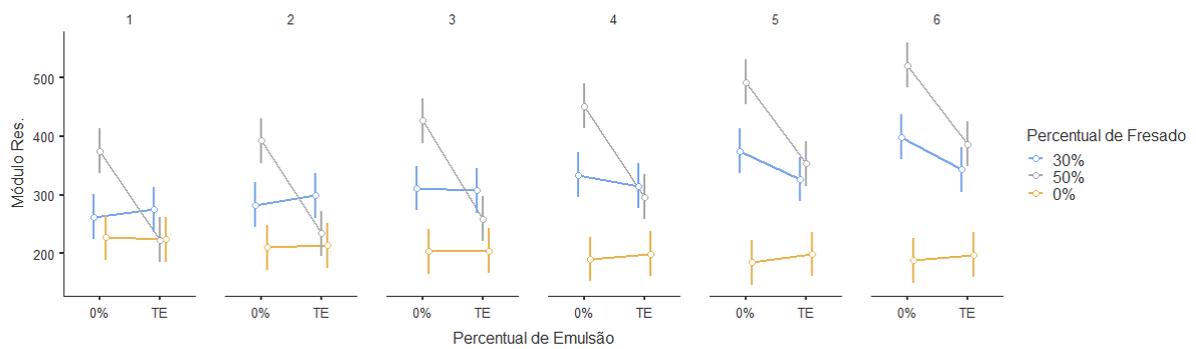


Figura 235: Efeito da interação entre o teor de emulsão, ciclos e fresado no MR do solo 2

Com base no que foi apresentado e na análise estatística utilizando o JAMOVI, é possível se delinear uma conclusão sobre a influência da emulsão, do fresado e da combinação fresado + emulsão na estabilização dos solos 1 e 2.

Sobre o solo 1, a análise ANOVA mostra que o teor de emulsão exerce um impacto significativo sobre várias variáveis, como a deformação permanente (DP), a deformação resiliente (DR), o módulo resiliente (MR) e o fator de forma "b". A emulsão afeta de forma consistente o comportamento mecânico do solo, reduzindo a resistência à DP, mas aumentando a DR e o MR. Em particular, o solo controle (sem emulsão) apresenta melhor desempenho em DP e MR, enquanto a adição de emulsão, especialmente em níveis mais elevados, pode aumentar a deformabilidade. Contudo, a emulsão parece melhorar o comportamento resiliente do solo, especialmente em termos de aumento de rigidez com mais ciclos de carregamento.

O fresado tem um efeito significativo sobre todas as variáveis analisadas, com o percentual de fresado de 30% sendo o mais eficaz para aumentar a resistência à deformação resiliente (DR) e o módulo resiliente (MR). O fresado também apresenta efeito moderador nas interações, com maiores porcentagens (50%) tendendo a reduzir a deformação permanente. O fresado desempenha um papel essencial na melhoria da rigidez e no desempenho resiliente do solo.

A combinação de fresado e emulsão também exerce um impacto relevante, com a interação entre esses dois fatores sendo significativa para várias variáveis. Em especial, a interação fresado + emulsão oferece resultados benéficos para aumentar o módulo resiliente (MR) e melhorar o desempenho geral do solo, embora a quantidade de fresado seja um fator determinante. A combinação de 30% de fresado e emulsão parece proporcionar os melhores resultados em termos de resistência e rigidez, porém com desempenho inferior ao solo fresado.

Já o para solo 2, diferentemente do solo 1, a emulsão não apresenta impacto significativo sobre a maioria das variáveis no solo 2, como a DP, DR e MR. O comportamento deste solo parece ser menos influenciado pela adição de emulsão, sugerindo que o solo 2 não se beneficia de maneira relevante com a estabilização via emulsão. A resistência e rigidez do solo 2 não são afetadas pela variação no teor de emulsão, e a interação entre emulsão e ciclos também não mostrou significância.

O percentual de fresado foi o fator mais influente para o solo 2, exercendo um impacto significativo sobre o comportamento mecânico do solo, especialmente em termos de módulo resiliente (MR) e deformação permanente (DP). O fresado, principalmente na proporção de 50%, melhora substancialmente o desempenho do solo 2, aumentando a resistência à deformação e melhorando a rigidez, mesmo em ciclos avançados.

A combinação de fresado e emulsão mostrou efeitos importantes, com o fresado modulando o efeito da emulsão. No entanto, a interação entre esses dois fatores não é tão significativa quanto no solo 1. A presença de fresado parece ser o fator mais determinante para a melhoria do desempenho do solo 2, e a emulsão tem uma influência menos pronunciada nesse contexto.

O solo 1 é mais sensível à adição de emulsão e fresado, com ambos os fatores influenciando significativamente as propriedades mecânicas. A interação entre fresado e emulsão proporciona um desempenho mais equilibrado, especialmente em termos de módulo resiliente e deformação resiliente.

O solo 2, por outro lado, mostra-se menos afetado pela emulsão, mas o fresado desempenha um papel essencial na melhora do comportamento do material. O percentual de fresado, especialmente em 50%, é o fator chave para aumentar a resistência e rigidez do solo 2.

Essas conclusões reforçam que, para ambos os solos, o fresado exerce uma influência mais consistente, enquanto a emulsão é mais eficaz na estabilização do solo 1. A escolha adequada das porcentagens de fresado e emulsão, dependendo do tipo de solo, é essencial para otimizar o desempenho em projetos de pavimentação.

## 6 CONCLUSÃO

A pesquisa realizada buscou avaliar hipóteses relacionadas ao comportamento mecânico (resiliente e plástico) de solos estabilizados com emulsão asfáltica e fresado asfáltico, submetidos a carregamento multiestágio. Os resultados obtidos permitiram confirmar parcialmente algumas das hipóteses propostas, enquanto outras apresentaram limitações ou comportamentos divergentes.

1: A hipótese se confirmou em partes. Para o ensaio de módulo resiliente, houve uma melhora absoluta em todos os ciclos de carregamento. Todavia o incremento numérico não se observou em todas as variáveis do modelo composto, visto que os coeficientes  $k_3$  de todos os modelos se tornou negativo, indicando uma perda de resistência com o aumento da tensão desvio para o solo 1, solo granular. O solo 2, mais fino, não obteve aumento do MR com o uso da emulsão. O incremento do MR se deu com a inserção de fresado.

2: Com relação ao desempenho plástico do carregamento multiestágio, a hipótese não foi ratificada para todos os ciclos de carregamento. Há de se observar que o desempenho dos solos estabilizados piorara muito no quarto e quinto ciclos de carregamento. Para o solo 2, houve uma melhora significativa da redução da deformação plástica com uso do fresado. Não é possível se aferir uma melhoria ou piora do solo 2 estabilizado com emulsão, esta não influenciou a resposta mecânica deste solo.

3: Com relação ao desempenho elástico, os solos estabilizados se tornaram mais flexíveis, com um MR por ciclo menor, devido ao aumento da resposta viscoelástica do material estabilizado.

4: A análise do *shakedown* demonstrou mais claramente a perda da resistência do material, principalmente no quarto e quinto ciclos de carregamento. A exceção com resultados mais proeminente, ocorreu com a utilização de 50% de fresado com o solo 2. De maneira geral, a emulsão diminui a resistência a DP dos compostos (solo e fresado) e do solo 1 nos ciclos finais.

5: Quanto a análise secundária do uso do fresado, este não melhorou a DP e DR do solo 1, mas houve um ganho de resistência a DP significativo no seu uso com o solo mais fino (solo 2). A mudança da granulometria do solo mais fino, com a inserção de material com granulometria mais grossa melhorou sua resposta mecânica.

6: A análise estatística demonstrou que os resultados refutaram a hipótese nula, e, assim, atestaram a validade do experimento e a influência da emulsão e do fresado na resposta plástica

do solo estabilizado. Porém o mesmo não ocorreu com a resposta elástica. A emulsão influenciou a resposta mecânica do solo 1 e seus compostos e dos compostos do solo 2. Porém a análise estatística demonstrou que o solo 2 é pouco influenciado pela adição de emulsão, isto só ocorre quando há uma mudança na sua granulometria.

7: A emulsão conferiu ao solo 1 e ao composto coesão que o protegeu da desagregação ao contato com a umidade, mas o mesmo não ocorreu com o solo 2 e os seus compostos.

8: Observou-se nos resultados que o MR realizado pela norma 134 do DNIT e o MR médio do multiestágio possuem resultados divergentes. O MR balizado pela norma utiliza um número menor de ciclos de carregamento e verificou-se que o solo muda seu comportamento após realizar o carregamento multiestágio, tanto na resposta plástica quanto na elástica. Portanto, o ensaio de MR balizado pela norma DNIT pode não ser um bom indicador para o desempenho do solo à longo prazo.

9: O carregamento multiestágio demonstrou ser uma técnica promissora para estudo do comportamento de solos e compostos em laboratório, conferindo ao projetista informações importantes num curto espaço de tempo e utilizando uma quantidade menor de material.

## **7 CONSIDERAÇÕES FINAIS, LIMITAÇÕES E PROPOSIÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS**

1- Explorar métodos adicionais ou combinados de estabilização para reduzir a deformação permanente do solo estabilizado. Experimentar com diferentes aditivos ou técnicas, como a adição de fibras, polímeros ou outros estabilizantes químicos.

2 - Determinar a dosagem ótima de emulsão asfáltica para diferentes tipos de solo. Realizar estudos detalhados de dosagem para uma variedade de solos, incluindo solos de granulometria variada, e verificar a influência da dosagem em diferentes condições de carregamento.

3 - Analisar o comportamento viscoelástico dos solos estabilizados ao longo de períodos prolongados. Implementar testes de longo prazo para observar como a resposta viscoelástica do material estabilizado evolui com o tempo e sob diferentes condições ambientais.

4 - Examinar a eficácia do fresado em uma variedade maior de tipos de solo. Testar o uso de fresado em solos com diferentes composições e texturas para entender melhor as condições em que o fresado melhora a resposta plástica e elástica do solo sob carregamento multiestágio, controlando a granulometria das amostras.

5 - Combinar a emulsão asfáltica com outras técnicas de estabilização, como estabilização com cimento, cal ou geossintéticos, e avaliar o desempenho mecânico resultante.

6 - Criar modelos numéricos mais robustos para prever o comportamento do solo estabilizado. Utilizar software de modelagem geotécnica avançado para desenvolver e validar modelos que possam prever com precisão o desempenho do solo estabilizado sob diferentes cargas e condições.

7 - Avaliar os impactos ambientais do uso de emulsão asfáltica e fresado na estabilização do solo. Realizar análises de ciclo de vida e estudos de impacto ambiental para garantir que as técnicas de estabilização utilizadas sejam sustentáveis e ecologicamente corretas.

8 - Investigar novos materiais e tecnologias para a estabilização do solo. Estudar materiais inovadores, como nanomateriais, resíduos industriais reciclados ou biopolímeros, para avaliar sua eficácia na estabilização do solo.

9 – Outros estudos abordando o MR precisam ser realizados. Uma sugestão seria uma avaliação com um maior ciclo de carregamento e em tensões limítrofes calculadas pelo triaxial estático.

10 – Estudar o comportamento hidráulico dos solos e compostos estabilizados, visando compreender melhor a interação entre a umidade, os materiais e os ligantes asfálticos. Além

disso, é essencial investigar a estabilidade do comportamento dinâmico sob diferentes condições de carregamento e ciclos avançados, ampliando o conhecimento sobre a durabilidade e o desempenho desses materiais em longo prazo.

## REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, Gamil M. S.; AL-ABDUL WAHHAB, H. I. Stabilisation of soils with emulsified sulphur asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 2019. DOI: 10.1080/14680629.2018.1436465.
- ABNT. NBR 14376:2010. Emulsão asfáltica: determinação da viscosidade Saybolt-Furol. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT. NBR 14393:2010. Emulsão asfáltica: determinação da carga de ruptura. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT. NBR 14491:2011. Emulsão asfáltica: determinação da estabilidade de armazenamento. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT. NBR 6297:2011. Asfalto diluído de petróleo: determinação da destilação. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT. NBR 6299:2011. Asfalto diluído de petróleo: determinação da solubilidade em tricloroetileno. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT. NBR 6567:2011. Emulsão asfáltica: determinação do resíduo por evaporação. Rio de Janeiro, 2011.
- ABNT. NBR 6570:2011. Asfalto diluído de petróleo: determinação da recuperação da penetração e do ponto de amolecimento. Rio de Janeiro, 2011.
- ADOMAKO, S.; ENGELSEN, C. J.; THORSTENSEN, R. T.; BARBIERI, D. M. Repeated load triaxial testing of recycled excavation materials blended with recycled phyllite materials. *Materials*, v. 15, n. 3, p. 621, 2022. DOI: 10.3390/ma15030621.
- AG:PT/T053. Determination of Permanent Deformation and Resilient Modulus Characteristics of Unbound Granular Materials under Drained Conditions. Sydney: AustRoads, 2000.
- AL-DULAIMI, Y. F.; AWED, A. M.; GABR, A. R.; EL-BADAWY, S. M. Predicting Resilient Modulus of Unbound Granular Base/Subbase Material. (Dept. C). *Mansoura Engineering Journal*, v. 47, p. 1-10, 2022.
- ALIZADEH, A.; MODARRES, A. Mechanical and Microstructural Study of RAP–Clay Composites Containing Bitumen Emulsion and Lime. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 31, n. 2, p. 4015107, 2019. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002583.
- ALNEDAWI, A.; NEPAL, K. P.; AL-AMERI, R. Performance of unstabilized and cement-stabilized pavement materials subjected to cyclic triaxial loading. *Transportation Geotechnics*, v. 20, p. 100234, 2019.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (AASHTO). Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing. 23. ed. Washington, DC: AASHTO, 2003.

- ANDAVAN, S.; KUMAR, B. M. Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions: A review. *Materials Today: Proceedings*, v. 22, n. 3, p. 1200–1202, 2020. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.121.
- ARULRAJAH, A.; GHORBANI, B.; NARSILIO, G.; HORPIBULSUK, S.; LEONG, M. Thermal performance of geothermal pavements constructed with demolition wastes. *Geomechanics for Energy and the Environment*, v. 28, p. 100253, 2021. DOI: 10.1016/j.gete.2021.100253.
- ARULRAJAH, Arul; GHORBANI, Behnam; NARSILIO, Guillermo; HORPIBULSUK, Suksun; LEONG, Melvyn. Geothermal Cyclic Testing of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 146, n. 2, p. 04019110, 2020.
- AS 1289.5.2.1: STANDARDS AUSTRALIA. *Methods of Testing Soils for Engineering Purposes: Soil Compaction and Density Tests: Determination of the Dry Density/Moisture Content Relationship of a Soil Using Modified Compaction Effort*. Sydney: Standards Australia, 2003.
- AS 1289.5.2.1-2017. *Methods of Testing Soils for Engineering Purposes, Method 5.2.1: Soil Compaction and Density Tests: Determination of the Dry Density/Moisture Content Relationship of a Soil Using Modified Compaction*. Sydney: Standards Australia, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMULSÕES ASFÁLTICAS (ABEDA). *Manual básico de emulsões asfálticas: soluções para pavimentar sua cidade*. Rio de Janeiro: ABEDA, 2001.
- ASTM D1557: ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- ASTM D1557-12e1. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (2,700 kN-m/m<sup>3</sup>))*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- ASTM D6913/D6913M: ASTM INTERNATIONAL. *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ASTM D6913/D6913M-17. *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ASTM D698-12e2. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>))*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2012.
- BABBIE, E. *The practice of social research*. Cengage Learning, 2016.
- BARBIERI, D. M.; LOU, B.; DYKE, R. J.; CHEN, H.; CHANDRA SAHOO, U.; TINGLE, J. S.; HOFF, I. Dataset of mechanical properties of coarse aggregates stabilized with traditional and nontraditional additives: Stiffness, deformation, resistance to freezing and stripping. *Data in Brief*, v. 46, p. 1087813, 2023. DOI: 10.1016/j.dib.2022.108781.

- BIBLIOMETRIX. Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. Disponível em: [Bibliometrix Official Site](https://www.bibliometrix.org). Acesso em: 12 jul. 2024.
- Bonfim, Valmir. *Fresagem de Pavimentos Asfálticos*. 3ª ed., São Paulo: Exceção Editorial, 2010.
- BRITO, N. J. C. O. et al. Evaluation of curing time in shear strength of soil-emulsion mixtures with emulsion contents greater than 10%. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 27, n. 2, p. 1-10, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-rmat-2022-0088.
- BS EN 13286-7: BRITISH STANDARDS INSTITUTION. Unbound and hydraulically bound mixtures. Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. London: BSI, 2004.
- BUNGA, E. A model of sandy clay erosion rate stabilized with emulsion asphalt. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, v. 13, n. 1, p. 42-51, 2018.
- CABRAL, Wendel Silva; BARROSO, Suelly Helena de Araújo; SILVA, Samuel de Almeida Torquato e. Consideração da deformação permanente de solos ocorridos na região nordeste na análise mecanística-empírica de pavimentos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, v. 26, n. 4, e-1396, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1396>.
- CEN EN 13286-7: Unbound and hydraulically bound mixtures: Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- CHOWDHURY, S. R. M. Evaluation of resilient modulus constitutive equations for unbound coarse materials. *Construction and Building Materials*, v. 296, p. 123688, 2021.
- DARYATI, D.; WIDIASANTI, I.; SEPTIANDINI, E.; RAMADHAN, M.A.; SAMBOWO, K.A.; PURNOMO, A. Soil characteristics analysis based on the unified soil classification system. *J. Phys. Conf. Ser.*, v. 1402, p. 022028, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1402/2/022028.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Análise granulométrica por sedimentação. Norma DNER-ME 051/94. 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Análise granulométrica por peneiramento. Norma DNER-ME 080/94. 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Determinação da densidade real dos solos. Norma DNER-ME 093/94. 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Determinação do Limite de Liquidez. Norma DNER-ME 122/94. 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Determinação do Limite de Plasticidade. Norma DNER-ME 082/94. 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Solos: Compactação em equipamento miniatura: ensaios mini-cbr e perda de massa por imersão: método de ensaio. Norma DNER-ME 258/23. 2023.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). Solos: Determinação do teor de umidade. Norma DNER-ME 213/94. 1994.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 134/2018 – ME: Solos – Determinação do módulo de resiliência. Brasília, 2018.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Compactação utilizando amostras não trabalhadas. Norma DNIT 164/2013: ME. 2013.
- DUNN, O. J. Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, v. 6, n. 3, p. 241-252, 1964.
- EMBRAPA SOLOS. Proposta de atualização da 5ª edição do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2023.
- EN 13286-7: EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Unbound and hydraulically bound mixtures: Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. Brussels: CEN, 2004.
- EN 13286-7:2004. *Unbound and Hydraulically Bound Mixtures: Part 7: Cyclic Load Triaxial Test for Unbound Mixtures*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2004.
- ERLINGSSON, S.; RAHMAN, M. S. Evaluation of Permanent Deformation Characteristics of Unbound Granular Materials by Means of Multistage Repeated-Load Triaxial Tests. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2369, p. 11–19, 2013.
- FEDAKAR, H. I. Developing New Empirical Formulae for the Resilient Modulus of Fine-Grained Subgrade Soils Using a Large Long-Term Pavement Performance Dataset and Artificial Neural Network Approach. *Transportation Research Record*, v. 2676, p. 58-75, 2022.
- FERREIRA, A. M. Estudo de três solos estabilizados com uma emulsão asfáltica catiônica. Dissertação (Mestrado): Centro de Ciências e Tecnologia: Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1980.
- FOUAD, A.; HASSAN, R.; MAHMOOD, A. Effect of crushed stone aggregate type and plastic fines on permanent deformation of unbound granular material under cyclic triaxial loading. *Transportation Geotechnics*, v. 31, p. 100446, 2021.
- FOUAD, Ali; HASSAN, Rayya; MAHMOOD, Abdulrahman. Resilient Modulus and Permanent Deformation of Granular Materials under Cyclic Loading Conditions. *Transportation Research Record*, v. 2673, n. 3, p. 208-218, 2019.
- Franco, F. A. C. P. (2007). Method of mechanistic-empirical design of asphalt pavements: SISPAV. Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil. (In Portuguese). Available online: <http://www.coc.ufrj.br/es/documents2/doutorado/2007-2/887-filipe-augusto-cinque-de-proenca-franco-doutorado/file>
- GÁLVEZ-COOPER, Amanda Gabriela. Stabilization of clayey soils using asphalt emulsion and steel filings. *DYNA*, 2023. DOI: 10.15446/dyna.v90n226.105839.

- GHORBANI, B.; ARULRAJAH, A.; NARSILIO, G.; HORPIBULSUK, S.; BO, M. W. Dynamic characterization of recycled glass-recycled concrete blends using experimental analysis and artificial neural network modeling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, v. 142, p. 106544, 2021. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106544.
- GHORBANI, B.; ARULRAJAH, A.; NARSILIO, G.; HORPIBULSUK, S.; BO, M. W. Permanent deformation behavior of recycled construction and demolition materials under multistage repeated load triaxial testing. *Transportation Geotechnics*, v. 28, p. 100383, 2021.
- GHORBANI, B.; ARULRAJAH, A.; NARSILIO, G.; HORPIBULSUK, S.; BURITATUM, A. Geothermal Pavements: Experimental Testing, Prototype Testing, and Numerical Analysis of Recycled Demolition Wastes. *Sustainability (Switzerland)*, v. 15, n. 3, p. 2680, 2023. DOI: 10.3390/su15032680.
- HANANDEH, S.; ARDAH, A.; ABU-FARSAKH, M. Using artificial neural network and genetics algorithm to estimate the resilient modulus for stabilized subgrade and propose new empirical formula. *Transportation Geotechnics*, v. 24, p. 100358, 2020.
- HICKS, R. G. *Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials*. Berkeley: University of California, 1970.
- HICKS, R.G.; MONISMITH, C.L. *Factors Influencing the Resilient Response of Granular Materials*. *Highway Research Record*, v. 345, p. 15-31, 1971.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Disponível em: [INMET: Portal Oficial](https://www.inmet.gov.br). Acesso em: 12 jul. 2024.
- JAMOVI. The JAMOVI Project. Disponível em: [https://www.jamovi.org](https://www.jamovi.org). Acesso em: dez. 2023.
- JING, Peng; NOWAMOOZ, Hossein. Multistage Triaxial Testing of Granular Materials in Unsaturated Conditions: Effect of Suction and Fine Content. *International Journal of Geomechanics*, v. 19, n. 4, p. 04019010, 2019.
- JTG E40-2007: MINISTRY OF TRANSPORT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. *Test Methods of Soils for Highway Engineering*. Beijing: Ministry of Transport, 2007.
- KAMRAN, F.; BASAVARAJAPPA, M.; BALA, N.; HASHEMIAN, L. Laboratory evaluation of stabilized base course using asphalt emulsion and asphaltenes derived from Alberta oil sands. *Construction and Building Materials*, v. 283, p. 122735, 2021. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122735.
- KHAWLA, H. Comparison between Effect of Adding Asphalt Emulsion and Portland Cement in Sandy Soils. 2016. DOI: 10.15224/978-1-63248-093-4-19.
- Lee, W., Bohra, N. C., Altschaeffl, A. G., & White, T. D. (1997). Resilient Modulus of Cohesive Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2), 131–136. doi:10.1061/(asce)1090-0241(1997)123:2(131).

- LIN, B.; ZHANG, F.; FENG, D.; TANG, K.; FENG, X. Accumulative plastic strain of thawed saturated clay under long-term cyclic loading. *Engineering Geology*, v. 231, p. 230–237, 2017. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.09.028.
- LIN, Bo; ZHANG, Feng; FENG, Decheng; TANG, Kangwei; FENG, Xin. Cyclic Loading Behavior of Thawed Saturated Clay under Different Confining Pressures. *Cold Regions Science and Technology*, v. 173, p. 102999, 2020.
- MACEDO, J. A. F. G. Interpretação de ensaios defletométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis. Tese (Doutorado): COPPE: UFRJ, Rio de Janeiro, 1996.
- MAGHOOL, F.; ARULRAJAH, A.; GHORBANI, B.; HORPIBULSUK, S. Stabilized recycled demolition aggregates as pavement subbase materials: Laboratory assessment of permanent deformation behavior. *Construction and Building Materials*, v. 323, p. 126563, 2022.
- MAGHOOL, F.; ARULRAJAH, A.; GHORBANI, B.; HORPIBULSUK, S. Strength and permanent deformation properties of demolition wastes, glass, and plastics stabilized with foamed bitumen for pavement bases. *Construction and Building Materials*, v. 320, p. 126266, 2022.
- MAGHOOL, F.; ARULRAJAH, A.; GHORBANI, B.; HORPIBULSUK, S.; SUDARSANAN, N. Strength and permanent deformation properties of demolition wastes, glass, and plastics stabilized with foamed bitumen for pavement bases. *Construction and Building Materials*, v. 320, p. 121213, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126108.
- MEDEIROS, A. S. de; SANTANA, C. S. A.; SILVA, M. A. V. da. Permanent Deformation Analysis of Three Tropical Soils at Different Humidities Using Multistage Loading. *Journal of Engineering Research*, v. 3, n. 15, p. 2–17, 2023. DOI: 10.22533/at.ed.3173152308055.
- MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. *Mecânica dos Pavimentos*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.
- MICELI, G. J. Comportamento de Solos do Estado do Rio de Janeiro Estabilizados com Emulsão Asfáltica. Dissertação (Mestrado): Engenharia de Transportes do Instituto Militar de Engenharia, 2006.
- NBR 7182: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.
- NCHRP 1-28A: NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2004.
- NGUYEN, Tan Hung; AHN, Jaehun. Permanent Deformation Behavior of Open-Graded Aggregates for Road Base. *Transportation Geotechnics*, v. 20, p. 100240, 2019.
- NI, B.; HOPKINS, T.C.; SUN, L.; BECKHAM, T.L. Modeling the resilient modulus of soils. In: *Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields*. Boca Raton: CRC Press, 2020. p. 1131-1142. DOI: 10.1201/9781003048023-146.

- OLUYEMI-AYIBIOWU, B. D. Stabilization of lateritic soils with asphalt-emulsion. *Nigerian Journal of Technology*, v. 38, n. 3, p. 603, 2019. DOI: 10.4314/njt.v38i3.9.
- OLUYEMI-AYIBIOWU, B. Stabilization of lateritic soils with asphalt-emulsion. *Nigerian Journal of Technology*, 2019. DOI: 10.4314/njt.v38i3.9.
- OROSA, P.; PÉREZ, I.; PASANDÍN, A. R. Evaluation of the shear and permanent deformation properties of cold in-place recycled mixtures with bitumen emulsion using triaxial tests. *Construction and Building Materials*, v. 328, p. 127054, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127054.
- PAHNO, S.; YANG, J.J.; KIM, S.S. Use of machine learning algorithms to predict subgrade resilient modulus. *Infrastructures*, v. 6, p. 78, 2021. DOI: 10.3390/infrastructures6080078.
- Parreira, A.B, Cunto, F.J.C., Carmo, C.A.T. and Rodrigues, J.K.G. (1998). The modulus of resilience of some paving materials and their estimation from simple compression tests. XI Brazilian Congress of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 5-10 November, 1998, Brasília, Brazil. (In Portuguese)
- PÉREZ-GONZÁLEZ, E.; BILODEAU, J.-P. An Optimized Approach to Multistage Permanent Deformation Testing of Granular Materials. *Materials*, v. 17, n. 3384, p. 1-15, 2024.
- PINTO, S.; PINTO, I. Pavimentação Asfáltica: Conceitos Fundamentais sobre Materiais e Revestimentos Asfálticos. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
- PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais sobre Pavimentos Flexíveis. 2. ed. Rio de Janeiro: IBP, 2010.
- PORTAL DO GOVERNO BRASILEIRO. Subsistema Rodoviário Federal. Disponível em: [Ministério dos Transportes](https://www.gov.br/transportes). Acesso em: 12 jul. 2024.
- RAHIM, A. M.; GEORGE, K. P. Models to estimate subgrade resilient modulus for pavement design. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 6, p. 89-96, 2005.
- RAHMAN, M. S.; ERLINGSSON, S.; AHMED, A. Modelling the permanent deformation of unbound granular materials in pavements. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 8, p. 1917–1938, 2023. DOI: 10.1080/14680629.2022.2108883.
- RAHMAN, Mohammad Shafiqur; ERLINGSSON, Sigurdur; AHMED, Abubeker. Resilient Modulus and Deformation Characteristics of Granular Materials at Different Moisture Contents and Stress Levels. *Road Materials and Pavement Design*, v. 17, n. 4, p. 953-974, 2016.
- SALOUR, F.; ERLINGSSON, S. Permanent deformation behavior of silty sand subgrades under repeated loading in unsaturated conditions. *Transportation Geotechnics*, v. 5, p. 31–42, 2015.
- SALOUR, F.; ERLINGSSON, S. Permanent deformation characteristics of silty sand subgrades from multistage RLT tests. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 18, n. 3, p. 236–246, 2017. DOI: 10.1080/10298436.2015.1065991.

- SANT'ANA, W. C. Contribuição ao estudo de solo-emulsão em pavimentos de rodovias de baixo volume de tráfego para o Estado do Maranhão. Tese (Doutorado): Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- SHESKIN, D. J. Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- SILVEIRA, P. L. Contribuição para Utilização de Rejeito de Mineração de Ferro em Pavimentação Asfáltica com Foco em Técnicas de Baixo Custo. Tese (Doutorado): Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- SKUODIS, Š.; KARPIS, R.; ZAKARKA, M.; GEDVILAS, M.; RAGINIS, V.; ORLOVA, K.; KATAUSKAS, M. Grunto, veikiame periodinėmis apkrovomis, elgsenos tyrimai. *Geol. Geogr.*, v. 4, p. 159-167, 2018. DOI: 10.3390/infrastructures6040159.
- SOAREZ, A. D. A. Estabilização de solo laterítico com emulsão asfáltica. Dissertação (Mestrado): Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: [<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07042008-111017/en.php>](<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-07042008-111017/en.php>).
- SOLIZ, V. V. P. Estudo de três solos estabilizados com emulsão asfáltica. Dissertação (Mestrado): Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- SOUTHERN AFRICAN BITUMEN ASSOCIATION (SABITA). Manual for the Design and Construction of Bitumen Emulsion Stabilised Materials. Pretoria: South African National Roads Agency, 2020.
- TEBALDI, G.; CANESTRARI, F.; PARTL, M.N.; DI BENEDETTO, H.; POROT, L.; MARZAK, P.; RILEM, S. Cold Recycling of Reclaimed Asphalt Pavements. In: PARTL, M. et al. Testing and Characterization of Sustainable Innovative Bituminous Materials and Systems. Cham: Springer, 2018. p. 123-148. DOI: 10.1007/978-3-319-71023-5\_6.
- THAJEEL, Jawad K.; SHAIA, Hussein A.; AL-MAHMUOD, S. K. Effect of Emulsified Asphalt on Expansive Soils. *E3S Web of Conferences*, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202342703009.
- ULLAH, S.; TANYU, B. F.; DAWSON, A. Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) as an Unbound Base Course Material: A Mechanistic Design Approach Based on Multi-stage Repeated Load Triaxial Tests. *Transportation Geotechnics*, v. 33, p. 100729, 2022a.
- UZAN, J. Characterization of granular material. *Transportation Research Record*, v. 1022, p. 52-59, 1985.
- VicRoads Section 820: Crushed Concrete for Pavement Subbase and Light Duty Base. Melbourne: VicRoads, 2013.
- VOGT, J. C. Estabilização Betuminosa. 7º Simpósio sobre Pesquisas Rodoviárias. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, DNER, Rio de Janeiro, 1971.

- WANG, C.; CHAZALLON, C.; HORNYCH, P.; BRAYMAND, S. Permanent and resilient deformation behavior of recycled concrete aggregates from different sources, in pavement base and subbase. *Road Materials and Pavement Design*, v. 24, n. 9, p. 2245–2262, 2023. DOI: 10.1080/14680629.2022.2134048.
- WERKMEISTER, S.; DAWSON, A.; WELLNER, F. Pavement Design for Unbound Granular Materials. *Journal of Transportation Engineering*, v. 130, n. 5, p. 665-674, 2004. DOI: 10.1061/ASCE/0733-947X(2004)130:5(665).
- XIAO, Y.; WANG, Z.; AMINU, U. F.; et al. Permanent deformation characteristics and shakedown behavior of coarse-grained fill materials incorporating different proportions of aggregates recycled from building demolition wastes. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, v. 55, n. 3, p. 1008-1022, 2024.
- YAGHOUBI, E.; GHORBANI, B.; SABERIAN, M.; VAN STADEN, R.; GUERRIERI, M.; FRAGOMENI, S. Permanent deformation response of demolition wastes stabilised with bitumen emulsion as pavement base/subbase. *Transportation Geotechnics*, v. 39, p. 100934, 2023. DOI: 10.1016/j.trgeo.2023.100934.
- YODER, E. J.; WITCZAK, M. W. Chapter 2: Stresses in flexible pavements. In: *Principles of Pavement Design*. New York: John Wiley and Sons Inc., 1975. p. 24-76.
- ZAR, J. H. *Biostatistical Analysis*. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2010.
- ZARONI, M. J.; SANTOS, R. D. Tropical soil formation. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Brasília, Brazil, 2021. Disponível em: [<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/formacao-do-solo-tropical>](<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/formacao-do-solo-tropical>). Acesso em: nov. 2023.
- ZHANG, J.; PENG, J.; ZENG, L.; LI, J.; LI, F. Rapid estimation of resilient modulus of subgrade soils using performance-related soil properties. *International Journal of Pavement Engineering*, v. 22, p. 732-739, 2021.

## ANEXO A

O Anexo A desta obra fornece um roteiro para a realização de uma revisão bibliométrica utilizando a linguagem de programação R, com foco na integração das bases de dados Web of Science e Scopus. Os scripts em R apresentados permitem automatizar o processo de coleta, limpeza, e análise de dados, que seriam tarefas manuais e demoradas se realizadas sem a ajuda de ferramentas programáticas.

Neste anexo, encontra-se uma sequência de comandos em R que foram elaborados para otimizar a integração dessas bases de dados, possibilitando uma análise bibliométrica robusta e abrangente. O conteúdo cobre desde a instalação de bibliotecas específicas, como a "bibliometrix", até a execução de análises interativas por meio da interface gráfica Biblioshiny.

Além disso, o anexo explora a aplicação de técnicas bibliométricas avançadas, como a análise de citação e cocorrência de palavras-chave, que são essenciais para identificar tendências e padrões de pesquisa. Exemplos práticos ilustram como os dados são processados, desde a extração inicial até a geração de gráficos e relatórios que auxiliam na interpretação dos resultados.

Esse material serve como um guia prático para pesquisadores que desejam aplicar metodologias bibliométricas em seus estudos, utilizando o R como ferramenta central para a análise de dados acadêmicos. Ao seguir os passos descritos no anexo, é possível replicar o processo e adaptar os scripts às suas próprias necessidades de pesquisa.

### A.1 Script do R

O R é uma linguagem de programação estatística amplamente utilizada na análise de dados e na visualização gráfica. Um dos benefícios do R é sua capacidade de automatizar tarefas repetitivas e trabalhosas, como a integração de informações de diferentes bases de dados acadêmicas. Nesse contexto, a combinação das bases de dados Web of Science e Scopus é um exemplo valioso de como os scripts em R podem facilitar a revisão bibliométrica.

A Web of Science e a Scopus são plataformas reconhecidas que abrangem uma ampla gama de disciplinas acadêmicas e indexam uma vasta quantidade de artigos científicos. A combinação dessas bases de dados pode enriquecer significativamente a análise bibliométrica, fornecendo uma visão mais abrangente das tendências de pesquisa. No entanto, a integração manual de informações de diferentes fontes pode ser demorada e propensa a erros.

Nesse cenário, a utilização de um script em R se torna uma solução eficaz. O script é um conjunto de instruções programáticas que automatizam a coleta, a limpeza e a integração dos dados provenientes da Web of Science e da Scopus. O processo de integração das bases de dados começa com a extração dos dados de ambas as fontes. Os scripts em R podem ser configurados para extrair informações específicas, como título do artigo, autores, palavras-chave e informações de citação. Em seguida, os dados podem ser limpos e formatados de maneira consistente, garantindo que os diferentes formatos e convenções das bases de dados sejam harmonizados.

Após a limpeza, os dados são combinados de acordo com critérios específicos, como nomes de autores ou títulos de artigos. Esse processo de união dos dados é automatizado pelo script, garantindo a precisão e a eficiência da análise. Uma vez que os dados estão integrados, os pesquisadores podem aplicar técnicas bibliométricas, como análise de cocitação, coocorrência de palavras-chave e análise de tendências, para obter insights valiosos sobre o panorama da pesquisa em sua área de estudo.

A revisão bibliométrica é uma abordagem essencial para compreender a evolução da pesquisa científica. O uso de scripts em R para unir as bases acadêmicas Web of Science e Scopus oferece uma maneira eficiente e precisa de realizar essa análise. Essa abordagem automatizada libera os pesquisadores de tarefas manuais tediosas e permite que eles concentrem seus esforços na interpretação dos resultados, contribuindo assim para o avanço do conhecimento em suas respectivas áreas.

Esse processo envolve a conversão dos dados das bases em data frames, a unificação dos dados, a eliminação de duplicatas e a realização de análises bibliométricas.

i. Instalação da biblioteca "bibliometrix":

```
install.packages("bibliometrix")
```

Isso instala a biblioteca "bibliometrix" no seu ambiente R, caso ainda não esteja instalada.

ii. Carregamento da biblioteca "bibliometrix":

```
library(bibliometrix)
```

Essa linha carrega a biblioteca "bibliometrix" para que você possa usar suas funções.

iii. Conversão das bases em data frames:

```
s <- convert2df("C:/Users/RIO/Desktop/bases/scopus.csv", dbsource = "scopus", format = "csv")
```

```
w <- convert2df("C:/Users/RIO/Desktop/bases/savedrecs.txt", dbsource = "wos", format = "plaintext")
```

Essas linhas convertem os dados das bases Scopus e Web of Science em data frames, que são estruturas de dados tabulares usadas pelo R.

iv. Unificação das bases e eliminação de duplicatas:

```
u <- mergeDbSources(s, w, remove.duplicated = TRUE)
```

Essa linha combina os data frames das bases Scopus e Web of Science em um único data frame chamado "u". A opção "remove.duplicated = TRUE" elimina as entradas duplicadas.

v. Escrita dos dados unificados em um arquivo CSV:

```
write.table(u, "C:/Users/RIO/Desktop/bases/baseunida.csv", sep = ";", row.names = FALSE)
```

Essa linha escreve os dados unificados no arquivo CSV "baseunida.csv" com ponto e vírgula como separador.

vi. Seleção de colunas específicas e escrita em outro arquivo CSV:

```
p <- u[, c("DI", "PY", "AU", "TI", "SO", "DT", "DE", "TC")]
```

```
write.table(p, "C:/Users/RIO/Desktop/bases/basefiltro.csv", sep = ";", row.names = FALSE)
```

Essas linhas selecionam colunas específicas do data frame "u" e as armazenam em um novo data frame "p". Os dados desse novo data frame são escritos no arquivo CSV "basefiltro.csv".

vii. Realização de análise bibliométrica:

```
Res <- biblioAnalysis(u)
```

Essa linha realiza uma análise bibliométrica usando a função "biblioAnalysis" da biblioteca "bibliometrix" no data frame "u", e os resultados são armazenados no objeto "Res".

viii. Resumo da análise e criação de gráficos:

```
DS <- summary(object = Res, K = 20)
```

```
plot(Res, k = 20)
```

Essas linhas geram um resumo dos resultados da análise bibliométrica, especificando que os principais 20 termos devem ser exibidos, e depois plotam gráficos a partir do objeto "Res".

ix. Inicialização da interface "biblioshiny":

```
biblioshiny()
```

Essa linha inicia a interface "biblioshiny", que é uma interface gráfica interativa para análise bibliométrica baseada na biblioteca "bibliometrix".

Em resumo, o script realiza a integração de dados das bases Scopus e Web of Science, realiza análises bibliométricas básicas e interativas e gera gráficos para visualizar os resultados.

## **A.2 Interface gráfica Biblioshiny**

A interface gráfica Biblioshiny uma parte integrante da biblioteca "bibliometrix" em R e foi projetada para fornecer uma experiência interativa na análise bibliométrica. Ela oferece uma maneira mais visual e amigável de explorar os resultados obtidos a partir da análise bibliométrica realizada com a biblioteca. Aqui estão alguns aspectos importantes sobre a interface "biblioshiny":

**Visualização interativa:** A interface "biblioshiny" permite que os usuários interajam com os resultados da análise bibliométrica por meio de gráficos, tabelas e visualizações dinâmicas. Isso facilita a compreensão dos padrões, tendências e insights presentes nos dados.

**Gráficos e tabelas:** A interface fornece uma variedade de gráficos e tabelas, como redes de coautoria, mapas de coocorrência de palavras-chave, distribuições temporais de publicações e muitos outros. Essas representações visuais ajudam os pesquisadores a identificarem padrões e relações importantes nos dados.

**Customização:** Os usuários podem personalizar os parâmetros dos gráficos e tabelas, permitindo que ajustem a visualização de acordo com suas necessidades e interesses específicos.

**Exploração detalhada:** A interface permite a exploração mais detalhada dos resultados, como identificar os principais autores, instituições, palavras-chave ou periódicos em uma determinada área de pesquisa.

**Comparação:** É possível comparar resultados de diferentes análises, identificando mudanças ao longo do tempo ou entre diferentes grupos de dados.

**Análise em tempo real:** Como a interface é interativa, as mudanças nos parâmetros de análise são refletidas em tempo real nos gráficos e tabelas, permitindo que os usuários ajustem a análise conforme necessário.

Facilidade de uso: A interface "biblioshiny" é projetada para ser acessível a usuários sem experiência prévia em programação. Isso torna a análise bibliométrica mais acessível a pesquisadores de diferentes áreas de estudo.

Apoio à tomada de decisões: Ao oferecer uma visualização clara e envolvente dos resultados, a interface ajuda os pesquisadores a tomarem decisões informadas sobre suas estratégias de pesquisa e colaboração.

É importante notar que, embora a interface "biblioshiny" seja uma ferramenta poderosa, ela depende da qualidade dos dados e da análise subjacente. Uma configuração adequada da análise bibliométrica e a compreensão dos conceitos por trás das métricas são fundamentais para extrair insights significativos.

Em resumo, a interface gráfica "biblioshiny" é uma extensão valiosa da biblioteca "bibliometrix", proporcionando aos pesquisadores uma maneira interativa e visualmente atraente de explorar os resultados da análise bibliométrica, identificando tendências e padrões relevantes em suas áreas de pesquisa.

### **A.3 Análise bibliométrica**

A análise bibliométrica tem várias finalidades e pode ser aplicada em diversas áreas, incluindo ciência, tecnologia, medicina, economia, sociologia, entre outras. Algumas das principais informações que podem ser obtidas por meio da análise bibliométrica incluem:

- **Produtividade Científica:** Quantidade de publicações, autores mais prolíficos e instituições com maior produção.
- **Citações:** Número de vezes que um artigo é citado por outros trabalhos, indicando sua influência e relevância na comunidade científica.
- **Redes de Colaboração:** Identificação de colaborações entre autores, instituições ou países por meio da coautoria.
- **Evolução Temporal:** Análise das tendências ao longo do tempo, como mudanças de foco em determinados temas ou campos de pesquisa.
- **Temas e Palavras-Chave:** Identificação das palavras-chave mais frequentemente usadas, o que ajuda a entender os principais temas abordados.
- **Difusão Geográfica:** Identificação dos países ou regiões de origem dos trabalhos publicados.

- Jornais e Revistas Mais Relevantes: Identificação das fontes mais citadas ou mais relevantes na área de estudo.
- Análise de Citações: Avaliação das relações entre artigos por meio de análise de cocitação ou coocorrência de palavras-chave.
- Impacto e Influência: Uso de indicadores bibliométricos para medir o impacto de autores, periódicos e instituições.

Devido à compacidade e alta densidade de materiais como brita e areia, o consumo energético para o transporte desses materiais é substancialmente elevado. Por outro lado, uma emulsão asfáltica, que possui uma densidade semelhante à da água e requer doses reduzidas para a realização da estabilização asfáltica, pode ser transportada de maneira mais eficiente.

Um congresso ambiental importante que ocorreu em 2006 foi a Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática de 2006, também conhecida como a 12ª Conferência das Partes (COP 12) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC). Esta conferência foi realizada em Nairóbi, Quênia, de 6 a 17 de novembro de 2006.

A COP 12 foi um evento significativo no contexto das negociações internacionais sobre mudança climática, onde os líderes mundiais e representantes de países se reuniram para discutir estratégias e acordos para lidar com as questões ambientais e as mudanças climáticas globais. Durante a COP 12, foram discutidos temas como mitigação das emissões de gases de efeito estufa, adaptação às mudanças climáticas, financiamento, tecnologia e outras questões relacionadas ao meio ambiente.

Este evento poderia justificar a busca por otimizar a estabilização asfáltica na pavimentação e o aumento da produção de trabalho com este tema, conforme pode ser visto no gráfico da Figura A.1.

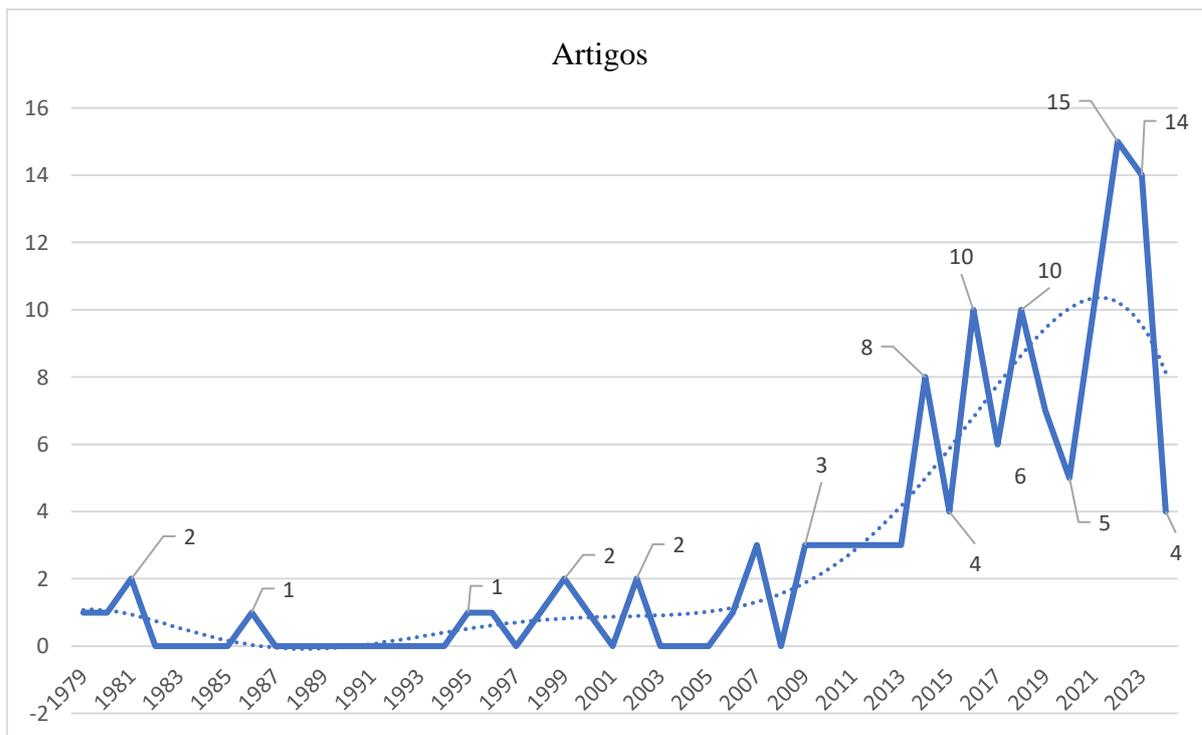


Figura A. 1: Produção acadêmica anual

É possível se identificar a formação de clustres na Figura A. 2. O Cluster Azul indica um foco significativo na pesquisa de reciclagem de misturas asfálticas e técnicas de emulsificação. Isso sugere uma tendência para a sustentabilidade e a reutilização de materiais em pavimentação. O Cluster Vermelho destaca a importância das propriedades mecânicas do asfalto, como resistência à tração e compressão. Pesquisas nesse cluster provavelmente estão explorando como melhorar a durabilidade e o desempenho do asfalto através da utilização de diferentes agregados e aditivos. O Cluster Verde aponta para a utilização de emulsões e betume na construção de pavimentos, indicando uma pesquisa voltada para melhorar a adesão e durabilidade do pavimento. O Cluster Roxo foca nos problemas estruturais comuns no cimentoasfáltico, como rachaduras e deformações. Isso sugere uma busca por soluções para melhorar a integridade estrutural e vida útil das pavimentações.

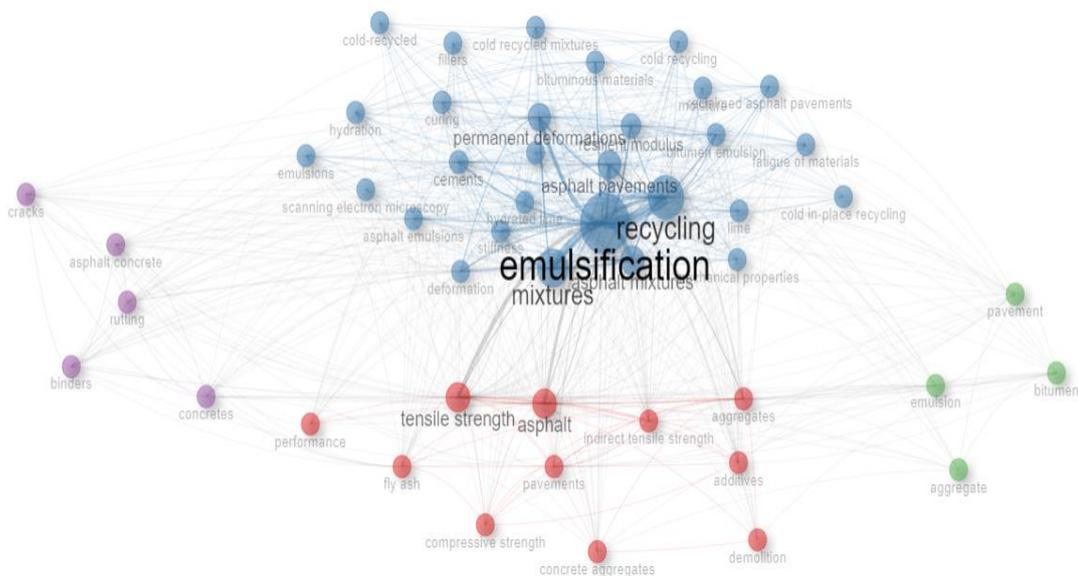


Figura A. 2: Clusters da análise da revisão da literatura

**Betweenness (Centralidade de Intermediação):** Mede quantas vezes um nó atua como ponte ao longo do caminho mais curto entre dois outros nós. Nó com alto betweenness é crucial para o fluxo de informação na rede.

**Closeness (Centralidade de Proximidade):** Mede a distância média do nó até todos os outros nós na rede. Nó com alto closeness pode espalhar informações de forma eficiente.

**PageRank:** Mede a importância de um nó com base no número e na qualidade dos links recebidos. Nó com alto PageRank é considerado importante na rede.

#### Cluster 1: Reciclagem e Emulsificação de Misturas Asfálticas

A emulsificação é o nó central e mais importante deste cluster, apresentando a maior centralidade de intermediação (156,24), centralidade de proximidade (0,02) e PageRank (0,09). Isso indica que a emulsificação é um conceito chave na rede de pesquisa sobre misturas asfálticas, servindo como um ponto crucial de conexão entre vários subtemas. Pesquisas neste nó provavelmente estão focadas em como a emulsificação pode melhorar as propriedades das misturas asfálticas, facilitando a reciclagem e aumentando a durabilidade do pavimento.

A reciclagem de materiais asfálticos é um tema central, com uma centralidade de intermediação de 47,96, centralidade de proximidade de 0,02 e PageRank de 0,06. Este nó destaca a importância das técnicas de reciclagem para a sustentabilidade na pavimentação. A pesquisa nesta área tende a explorar métodos para reutilizar materiais asfálticos, reduzindo os custos e o impacto ambiental, ao mesmo tempo que mantém ou melhora a qualidade do pavimento.

As misturas asfálticas representam um nó significativo, com centralidade de intermediação de 42,46, centralidade de proximidade de 0,02 e PageRank de 0,05. Este nó reflete a diversidade de composições e técnicas utilizadas para criar misturas asfálticas otimizadas. Pesquisas aqui investigam diferentes combinações de materiais para melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade dos pavimentos, considerando fatores como a inclusão de materiais reciclados e aditivos.

#### Cluster 2: Resistência do Asfalto e Propriedades Mecânicas

O asfalto é um nó fundamental neste cluster, com centralidade de intermediação de 32,16, centralidade de proximidade de 0,02 e PageRank de 0,04. Este nó sugere que o asfalto é uma área central de estudo, com foco em suas propriedades e aplicações. A pesquisa nesta área envolve a análise das características do asfalto e como elas afetam o desempenho dos pavimentos, considerando fatores como composição, processamento e condições ambientais.

A resistência à tração é um nó importante, com centralidade de intermediação de 28,16, centralidade de proximidade de 0,02 e PageRank de 0,04. Este nó indica que a resistência à tração do asfalto é crucial para a integridade estrutural dos pavimentos. Pesquisas aqui estão focadas em como aumentar a resistência à tração através de modificações na composição do asfalto, uso de aditivos e técnicas de processamento.

O módulo resiliente é um nó significativo com centralidade de intermediação de 16,48, centralidade de proximidade de 0,02 e PageRank de 0,03. Este nó reflete a importância do módulo resiliente como uma medida da capacidade do asfalto de recuperar-se após ser deformado sob carga. A pesquisa nesta área investiga como melhorar o módulo resiliente para aumentar a durabilidade e a performance dos pavimentos asfálticos.

#### Cluster 3: Pavimentos Reciclados e Materiais Relacionados

As misturas recicladas a frio são um nó central neste cluster, com centralidade de intermediação de 1,149, centralidade de proximidade de 0,015 e PageRank de 0,015. Este nó indica a relevância da reciclagem a frio na construção de pavimentos sustentáveis. Pesquisas aqui estão focadas em técnicas para reutilizar materiais asfálticos em misturas recicladas a frio, visando reduzir os custos e o impacto ambiental, ao mesmo tempo que mantém a qualidade do pavimento.

A reciclagem a frio é um nó importante, com centralidade de intermediação de 0,746, centralidade de proximidade de 0,014 e PageRank de 0,015. Este nó sugere que a reciclagem a frio é uma técnica valiosa para a reutilização de materiais asfálticos. A pesquisa nesta área

examina métodos de reciclagem a frio que podem ser aplicados para melhorar a sustentabilidade e a eficiência na construção de pavimentos.

A hidratação é um nó relevante com centralidade de intermediação de 0,811, centralidade de proximidade de 0,014 e PageRank de 0,012. Este nó reflete a importância da hidratação nos processos de cura e fortalecimento de misturas asfálticas. Pesquisas aqui investigam como a hidratação afeta as propriedades mecânicas e a durabilidade dos pavimentos.

#### Cluster 4: Resistência à Compressão e Aditivos

Os pavimentos são um nó central neste cluster, com centralidade de intermediação de 3,841, centralidade de proximidade de 0,016 e PageRank de 0,018. Este nó sugere que a pesquisa sobre pavimentos é essencial para a melhoria das infraestruturas rodoviárias. Estudos aqui focam em diversos aspectos dos pavimentos, desde materiais utilizados até métodos de construção e manutenção para melhorar a performance e durabilidade.

A resistência à tração indireta é um nó significativo, com centralidade de intermediação de 3,608, centralidade de proximidade de 0,016 e PageRank de 0,021. Este nó indica que a resistência à tração indireta é crucial para avaliar a integridade estrutural dos pavimentos. Pesquisas nesta área buscam métodos para aumentar a resistência à tração indireta, garantindo que os pavimentos possam suportar cargas e tensões sem falhar.

A resistência à compressão é um nó importante com centralidade de intermediação de 0,461, centralidade de proximidade de 0,014 e PageRank de 0,010. Este nó reflete a importância da resistência à compressão na construção de pavimentos duráveis. A pesquisa nesta área examina como aumentar a resistência à compressão das misturas asfálticas para melhorar a durabilidade e a capacidade de carga dos pavimentos.

#### Cluster 5: Pavimentação com Emulsões e Betume

A emulsão é um nó relevante neste cluster, com centralidade de intermediação de 0,950, centralidade de proximidade de 0,013 e PageRank de 0,011. Este nó sugere que o uso de emulsões é uma técnica importante na pavimentação. A pesquisa aqui está focada em como as emulsões podem ser utilizadas para melhorar a adesão, flexibilidade e durabilidade dos pavimentos.

O pavimento é um nó central com centralidade de intermediação de 1,224, centralidade de proximidade de 0,013 e PageRank de 0,011. Este nó indica que a pesquisa sobre pavimentação é fundamental para desenvolver infraestruturas rodoviárias eficientes e duráveis. Estudos aqui abrangem uma ampla gama de tópicos, desde materiais e técnicas de construção até métodos de manutenção.

O betume é um nó significativo, com centralidade de intermediação de 0,777, centralidade de proximidade de 0,013 e PageRank de 0,010. Este nó sugere que o betume é um material crucial na construção de pavimentos. Pesquisas aqui investigam as propriedades do betume e como ele pode ser modificado ou melhorado para aumentar a performance dos pavimentos asfálticos.

Estas informações podem ser conferidas na Tabela A. 1, gerada pelo programa bibliometrix.

Tabela A. 1– Análise dos clusters

Node	Cluster	Betweenness	Closeness	PageRank	Node	Cluster	Betweenness	Closeness	PageRank
emulsification	1	156,24	0,02	0,09	<i>bitumen emulsion</i>	2	4,105	0,016	0,022
recycling	1	47,96	0,02	0,06	curing	2	3,281	0,016	0,021
mixtures	1	42,46	0,02	0,05	lime	2	6,078	0,018	0,022
<i>permanent deformations</i>	1	15,71	0,02	0,04	fatigue of materials	2	2,361	0,015	0,015
asphalt pavements	1	21,19	0,02	0,04	moisture	2	0,801	0,014	0,014
asphalt mixtures	1	15,89	0,02	0,04	performance	2	0,493	0,013	0,009
stiffness	1	6,94	0,02	0,03	mechanical properties	2	0,690	0,014	0,013
cements	1	17,02	0,02	0,03	reclamation	2	0,030	0,012	0,007
<i>deformation</i>	1	1,06	0,01	0,02	roads and streets	2	0,178	0,013	0,009
<i>asphalt emulsions</i>	1	5,05	0,02	0,02	portland cement	3	0,911	0,014	0,015
fly ash	1	1,88	0,01	0,01	cold recycled mixtures	3	1,149	0,015	0,015
<i>reclaimed asphalt pavements</i>	1	2,59	0,02	0,02	cold recycling	3	0,746	0,014	0,015
binders	1	0,89	0,01	0,01	fillers	3	0,139	0,013	0,010
emulsions	1	0,66	0,01	0,01	cold-recycled	3	0,043	0,013	0,010
scanning electron microscopy	1	0,90	0,01	0,01	hydrated lime	3	0,437	0,014	0,011
<i>asphalt concrete</i>	1	0,50	0,01	0,01	hydration	3	0,811	0,014	0,012
concretes	1	0,26	0,01	0,01	pavements	4	3,841	0,016	0,018
flexible pavements	1	0,13	0,01	0,01	indirect tensile strength	4	3,608	0,016	0,021
cold in-place recycling	1	0,02	0,01	0,01	compressive strength	4	0,461	0,014	0,010
concrete aggregates	1	0,23	0,01	0,01	additives	4	0,886	0,014	0,012
asphalt	2	32,16	0,02	0,04	rutting resistance	4	0,389	0,013	0,009
tensile strength	2	28,16	0,02	0,04	emulsion	5	0,950	0,013	0,011
<i>resilient modulus</i>	2	16,48	0,02	0,03	pavement	5	1,224	0,013	0,011
bituminous materials	2	4,51	0,02	0,02	bitumen	5	0,777	0,013	0,010
aggregates	2	4,71	0,02	0,02					

## ANEXO B

### B.1 Preparação dos materiais e equipamento para ensaio

- Materiais: Membrana seca e limpa, base cilíndrica para suporte das amostras, ligas de borracha, suporte metálico da membrana, nível quadrado; pincel, equipamento para registro fotográfico, pen drive, material para anotação;
- A prensa deve estar limpa e desligada, com as mangueiras desobstruídas, o nicho da borracha de vedação na base da célula de carga deve estar limpo e a borracha de vedação hidratada;
- A câmara triaxial dever estar limpa e com os parafusos de fixação intactos, firmes e sem avarias;
- A célula de carga deve estar limpa, com o sistema de fixação completo e sem avarias;
- A membrana deve estar seca e limpa.

### B.2 Montagem do corpo de prova no equipamento

- Coloque a amostra no suporte cilíndrico, registre a amostra;
- Engate a membrana nas duas bordas do suporte cilindro, puxe o ar pelo orifício para que não haja vazios entre o suporte e a membrana, tampe o orifício com o dedo para evitar entrar ar e encaixe a membrana cuidadosamente na amostra compactada;
- Solte o dedo do orifício desengate a membrana das bordas e retire o suporte da membrana;
- Pronto, a amostra já está coberta corretamente com a membrana;
- Colocar pedra porosa com dois papéis filtro na base de apoio, na seguinte ordem: papel filtro, pedra porosa e cobrir com outro papel filtro
- Apoiar o corpo de prova envolto com a membrana sobre a base de apoio da prensa.
- Desenrolar a membrana para baixo e prendê-la com elástico na base de apoio.
- Colocar papel filtro e pedra porosa no topo da amostra na seguinte ordem: papel filtro, pedra porosa e cobrir com outro papel filtro;
- Colocar o topcap sobre o corpo de prova e desenrolar a membrana no topcap e, em seguida, prendê-la com elástico.
- Colocar o pendrive no slot do equipamento e ligá-lo.

- Na tela de ajustes, nivelar os LVDTs. Eles precisam estar marcando uma deformação de 300 mm no mínimo para que o ensaio ocorra sem intercorrência. Esta fase de ajuste leva algum tempo para que o operador consiga o melhor nivelamento possível, utilize o nível de bolha para garantir o melhor nivelamento horizontal possível,

- Passar um pano umedecido na base da câmara triaxial e verificar se não há nenhum resíduo impedindo a vedação;

- Verificar se todos os cabos do LVDT estão fixos e se as mangueiras estão bem fixadas.

- Afrouxar o parafuso que segura a base que fica na parte inferior esquerda e puxar a bandeja em sua direção, para facilitar na montagem da câmara triaxial.

- Colocar a câmara triaxial, se possível com apoio de 2 pessoas, desça-a suavemente (cuidado para não colidir na célula de carga) e fixá-la apertando todos os parafusos igualmente.

- Verificar se o compressor está ligado e se o barômetro (o barômetro fica no lado esquerdo do monitor ao fundo da prensa) está registrando uma pressão mínima de 4,5 psi.

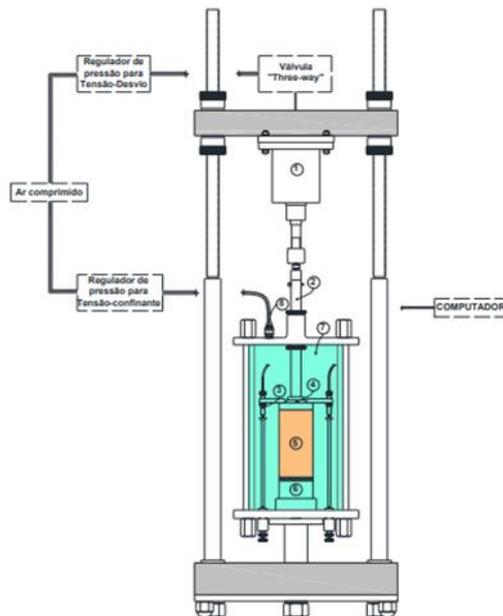
### B.3 Ajustes do ensaio

- Passar para tela de ensaios, escolher o ensaio de Deformação Permanente e frequência de 2Hz, colocar o nome do corpo de prova e selecionar parâmetros.

<p>- Para o primeiro ciclo de acomodação: Tensão confinante: 0,03 MPa Tensão Desvio: 0,03 MPa Ciclos: 50</p> <p>- Para tensões do ensaio, primeiro ciclo: Tensão confinante: 0,07 MPa Tensão Desvio: 0,035 MPa Ciclos: 10.000 Tempo de ensaio: 1h 24min</p>	<p>- Para o segundo ciclo de acomodação: Tensão confinante: 0,03 MPa Tensão Desvio: 0,03 MPa Ciclos: 0</p> <p>- Para tensões do ensaio, segundo ciclo: Tensão confinante: 0,07 MPa Tensão Desvio: 0,07 MPa Ciclos: 10.000 Tempo de ensaio: 1h 24min</p>
<p>- Para o terceiro ciclo de acomodação: Tensão confinante: 0,03 MPa Tensão Desvio: 0,03 MPa Ciclos: 0</p> <p>- Para tensões do ensaio, terceiro ciclo: Tensão confinante: 0,07 MPa Tensão Desvio: 0,14 MPa Ciclos: 10.000 Tempo de ensaio: 1h 24min</p>	<p>- Para o quarto ciclo de acomodação: Tensão confinante: 0,03 MPa Tensão Desvio: 0,03 MPa Ciclos: 0</p> <p>- Para tensões do ensaio, quarto ciclo: Tensão confinante: 0,07 MPa Tensão Desvio: 0,21 MPa Ciclos: 10.000 Tempo de ensaio: 1h 24min</p>
<p>- Para o quinto e último ciclo de acomodação: Tensão confinante: 0,03 MPa Tensão Desvio: 0,03 MPa Ciclos: 0</p> <p>- Para tensões do ensaio, quinto ciclo: Tensão confinante: 0,07 MPa Tensão Desvio: 0,28 MPa Ciclos: 10.000 Tempo de ensaio: 1h 24min</p>	

#### B.4 Após o ensaio

- Desmonte a prensa seguindo a ordem inversa do tópico 2;
- Retire o topcap com cuidado juntamente com os LVDT's e os apoie em um local que não implique força em suas agulhas;
- Retire a amostra da base da prensa com a membrana, coloque a amostra na base cilíndrica para suporte das amostras e retire, de baixo para cima a membrana da amostra;
- Lave a membrana, seque e passe talco para garantir a vida útil da membrana;
- Limpe toda a prensa de resquícios de solos, que tenham ficado do manuseio da amostra, desligue o compressor e retire-o da tomada, desligue a prensa, retire da tomada e retire o pen drive.



## ANEXO C

### C.1 Script para realizar o teste não paramétrico no R

```
# Dados para a Região Plástica
data_30FR <- c(1127, 1140, 1125, 1135, 1128)
data_50FR <- c(1129, 1132, 1130, 1134, 1126)
data_0 <- c(1263, 1259, 1262, 1260, 1265)
data_15 <- c(2042, 2045, 2040, 2041, 2043)
data_2 <- c(2469, 2471, 2468, 2470, 2467)
data_25 <- c(2111, 2110, 2112, 2109, 2113)
data_30FRL <- c(1535, 1537, 1534, 1536, 1533)
data_50FRL <- c(1276, 1275, 1277, 1274, 1278)

# Criar um dataframe
data <- data.frame(
  value = c(data_30FR, data_50FR, data_0, data_15, data_2, data_25, data_30FRL, data_50FRL),
  group = factor(rep(c("30FR", "50FR", "0", "1.5", "2", "2.5", "30FRL", "50FRL"), each = 5))
)

# Aplicar o teste de Kruskal-Wallis
kruskal_test <- kruskal.test(value ~ group, data = data)
print(kruskal_test)

# Instalar o pacote 'dunn.test' se ainda não estiver instalado
if (!require("dunn.test")) {
  install.packages("dunn.test")
  library(dunn.test)
}

# Executar o teste de Dunn para comparações múltiplas
posthoc_results <- dunn.test(data$value, data$group, method="bonferroni")

# Mostrar os resultados
print(posthoc_results)

# Carregar ggplot2 para visualização
if (!require("ggplot2")) {
  install.packages("ggplot2")
  library(ggplot2)
}

# Criar o boxplot
ggplot(data, aes(x = group, y = value)) +
  geom_boxplot() +
  theme_minimal() +
  labs(title = "Distribuição dos Grupos na Região Plástica", x = "Grupo", y = "Valor")
```

## ANEXO D

### D.1 DP e DR em múltiplos estágios do solo 1

Tabela D.1: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 1,5% RL(ciclo1)

Estágio 1	Deformação Plástica			Deformação Elástica			Estágio 1	Deformação Plástica			Deformação Elástica		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,105	0,006	0,099	0,121	0,006	0,116	a	0,088	0,009	0,080	0,102	0,009	0,094
b	0,056	-0,944	1,056	0,047	-0,953	1,047	b	0,099	-0,901	1,099	0,088	-0,912	1,088
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,124	3,49E-04	2,347	0,140	3,28E-04	0,324	20	0,118	5,82E-04	2,145	0,133	5,80E-04	0,293
50	0,131	1,47E-04	6,178	0,146	1,37E-04	0,793	50	0,129	2,55E-04	5,869	0,144	2,51E-04	0,732
100	0,136	7,64E-05	12,848	0,151	7,08E-05	1,556	100	0,138	1,36E-04	12,570	0,153	1,34E-04	1,459
200	0,141	3,97E-05	26,718	0,156	3,66E-05	3,042	200	0,148	7,30E-05	26,921	0,162	7,09E-05	2,892
500	0,149	1,67E-05	70,334	0,163	1,53E-05	7,339	500	0,162	3,20E-05	73,674	0,176	3,07E-05	7,080
1000	0,155	8,70E-06	146,269	0,168	7,89E-06	14,216	1000	0,173	1,71E-05	157,785	0,187	1,63E-05	13,823
3000	0,164	3,09E-06	466,821	0,177	2,77E-06	40,125	3000	0,193	6,36E-06	527,584	0,205	5,99E-06	39,189
5000	0,169	1,91E-06	800,748	0,181	1,70E-06	64,673	5000	0,203	4,01E-06	924,788	0,215	3,76E-06	63,014
10000	0,176	9,91E-07	1665,266	0,187	8,79E-07	122,843	10000	0,218	2,15E-06	1980,577	0,228	2,00E-06	118,563

Tabela D.2: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 1,5% RL(ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,050	0,011	0,040	0,079	0,012	0,069	a	0,040	0,010	0,032	0,066	0,011	0,056
b	0,227	-0,773	1,227	0,146	-0,854	1,146	b	0,252	-0,748	1,252	0,169	-0,831	1,169
a	0,085	0,005	0,081	0,111	0,004	0,107	a	0,064	0,007	0,058	0,087	0,008	0,080
b	0,054	-0,946	1,054	0,040	-0,960	1,040	b	0,109	-0,891	1,109	0,088	-0,912	1,088
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,098	1,12E-03	1,599	0,122	8,94E-04	0,532	20	0,084	1,06E-03	1,344	0,109	9,20E-04	0,517
50	0,105	1,12E-04	4,677	0,130	1,04E-04	1,295	50	0,098	2,15E-04	4,432	0,123	2,16E-04	1,001
100	0,109	5,82E-05	10,026	0,134	5,34E-05	2,551	100	0,106	1,16E-04	9,562	0,130	1,15E-04	2,217
200	0,113	3,02E-05	21,127	0,137	2,75E-05	5,029	200	0,114	6,25E-05	20,627	0,139	6,09E-05	4,641
500	0,119	1,27E-05	55,951	0,143	1,14E-05	12,324	500	0,126	2,76E-05	56,997	0,150	2,64E-05	11,826
1000	0,123	6,58E-06	116,447	0,147	5,86E-06	24,232	1000	0,136	1,49E-05	122,960	0,160	1,40E-05	23,569
3000	0,130	2,33E-06	371,138	0,153	2,04E-06	70,432	3000	0,154	5,60E-06	415,912	0,176	5,16E-06	68,741
5000	0,134	1,43E-06	635,914	0,156	1,25E-06	115,406	5000	0,163	3,55E-06	732,966	0,184	3,24E-06	112,061
10000	0,139	7,44E-07	1320,203	0,161	6,42E-07	224,923	10000	0,175	1,92E-06	1581,236	0,195	1,72E-06	215,289

Tabela D.3: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 1,5% RL(ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,050	0,009	0,043	0,096	0,009	0,088	a	0,043	0,010	0,035	0,089	0,012	0,078
b	0,185	-0,815	1,185	0,097	-0,903	1,097	b	0,233	-0,767	1,233	0,136	-0,864	1,136
a	0,077	0,005	0,072	0,118	0,005	0,114	a	0,067	0,009	0,059	0,105	0,010	0,096
b	0,064	-0,936	1,064	0,041	-0,959	1,041	b	0,129	-0,871	1,129	0,098	-0,902	1,098
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,088	8,12E-04	1,481	0,129	6,27E-04	0,873	20	0,086	1,00E-03	1,394	0,133	9,10E-04	0,954
50	0,099	1,25E-04	4,365	0,139	1,14E-04	1,278	50	0,106	4,95E-04	4,313	0,151	4,12E-04	2,337
100	0,103	6,55E-05	9,414	0,143	5,88E-05	3,289	100	0,122	1,57E-04	10,766	0,165	1,61E-04	3,853
200	0,108	3,43E-05	19,969	0,147	3,02E-05	7,265	200	0,133	8,60E-05	23,550	0,177	8,64E-05	9,071
500	0,114	1,45E-05	53,362	0,153	1,26E-05	18,984	500	0,150	3,87E-05	66,282	0,193	3,78E-05	22,125
1000	0,119	7,59E-06	111,829	0,157	6,46E-06	38,135	1000	0,164	2,12E-05	144,996	0,207	2,02E-05	43,703
3000	0,128	2,71E-06	360,379	0,164	2,25E-06	112,499	3000	0,189	8,14E-06	501,392	0,230	7,50E-06	127,869
5000	0,132	1,68E-06	620,676	0,168	1,38E-06	184,900	5000	0,202	5,21E-06	892,720	0,242	4,73E-06	209,453
10000	0,138	8,79E-07	1297,640	0,173	7,10E-07	361,158	10000	0,221	2,85E-06	1952,872	0,259	2,53E-06	405,630

Tabela D.4: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 1,5% RL(ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,023	0,007	0,018	0,077	0,009	0,069	a	0,0392	0,0105	0,0310	0,0983	0,0142	0,0859
b	0,309	-0,691	1,309	0,122	-0,878	1,122	b	0,2673	-0,7327	1,2673	0,1445	-0,8555	1,1445
a	0,048	0,005	0,043	0,098	0,006	0,093	a	0,0712	0,0108	0,0618	0,1178	0,0136	0,1057
b	0,101	-0,899	1,101	0,058	-0,942	1,058	b	0,1520	-0,8480	1,1520	0,1152	-0,8848	1,1152
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,058	8,97E-04	0,887	0,111	6,79E-04	1,094	20	0,087	1,17E-03	1,379	0,152	1,10E-03	1,270
50	0,071	1,43E-04	3,205	0,123	1,42E-04	2,335	50	0,112	5,97E-04	4,406	0,173	5,00E-04	3,157
100	0,076	7,66E-05	6,875	0,128	7,40E-05	3,730	100	0,134	3,59E-04	10,605	0,191	2,77E-04	6,113
200	0,081	4,11E-05	14,750	0,134	3,85E-05	8,981	200	0,162	2,16E-04	25,528	0,212	1,53E-04	11,431
500	0,089	1,80E-05	40,456	0,141	1,62E-05	24,595	500	0,183	5,57E-05	79,487	0,241	5,56E-05	28,793
1000	0,096	9,67E-06	86,790	0,147	8,45E-06	50,274	1000	0,203	3,09E-05	176,634	0,261	3,01E-05	57,710
3000	0,107	3,60E-06	290,980	0,156	3,00E-06	150,472	3000	0,240	1,22E-05	626,194	0,296	1,14E-05	171,248
5000	0,112	2,28E-06	510,690	0,161	1,86E-06	248,161	5000	0,260	7,90E-06	1127,911	0,314	7,24E-06	281,583
10000	0,121	1,22E-06	1095,577	0,167	9,66E-07	485,683	10000	0,289	4,39E-06	2506,431	0,340	3,92E-06	546,688

Tabela D.5: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 1,5% RL(ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,013	0,004	0,009	0,076	0,007	0,070	a	0,022	0,007	0,017	0,090	0,011	0,080
b	0,348	-0,652	1,348	0,089	-0,911	1,089	b	0,300	-0,700	1,300	0,127	-0,873	1,127
a	0,029	0,004	0,025	0,086	0,006	0,080	a	0,038	0,008	0,031	0,083	0,013	0,072
b	0,146	-0,854	1,146	0,074	-0,926	1,074	b	0,214	-0,786	1,214	0,152	-0,848	1,152
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,036	6,26E-04	0,535	0,099	4,42E-04	1,826	20	0,054	8,14E-04	0,836	0,132	8,34E-04	2,337
50	0,051	1,50E-04	2,242	0,115	1,69E-04	2,463	50	0,072	4,29E-04	2,751	0,148	3,75E-04	6,563
100	0,057	8,30E-05	4,962	0,121	8,91E-05	5,670	100	0,088	2,64E-04	6,773	0,161	2,05E-04	14,331
200	0,063	4,59E-05	10,979	0,128	4,69E-05	12,124	200	0,108	1,62E-04	16,672	0,176	1,12E-04	31,294
500	0,072	2,10E-05	31,374	0,136	2,01E-05	31,514	500	0,143	6,11E-05	58,804	0,214	6,51E-05	32,791
1000	0,080	1,16E-05	69,426	0,144	1,06E-05	63,654	1000	0,166	3,54E-05	136,418	0,238	3,62E-05	76,076
3000	0,093	4,54E-06	244,489	0,156	3,81E-06	189,823	3000	0,210	1,49E-05	517,744	0,281	1,42E-05	221,062
5000	0,101	2,94E-06	439,012	0,162	2,38E-06	313,025	5000	0,234	1,00E-05	962,605	0,304	9,23E-06	363,494
10000	0,111	1,62E-06	971,468	0,170	1,25E-06	611,967	10000	0,271	5,80E-06	2233,111	0,338	5,13E-06	706,446

Tabela D.6: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2% RL(ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,105	0,006	0,099	0,121	0,006	0,116	a	0,097	0,010	0,088	0,111	0,011	0,101
b	0,056	-0,944	1,056	0,047	-0,953	1,047	b	0,106	-0,894	1,106	0,095	-0,905	1,095
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,124	3,49E-04	2,347	0,140	3,28E-04	0,324	20	0,133	7,05E-04	2,412	0,148	7,04E-04	0,283
50	0,131	1,47E-04	6,178	0,146	1,37E-04	0,793	50	0,147	3,11E-04	6,644	0,161	3,07E-04	0,711
100	0,136	7,64E-05	12,848	0,151	7,08E-05	1,556	100	0,158	1,67E-04	14,299	0,172	1,64E-04	1,416
200	0,141	3,97E-05	26,718	0,156	3,66E-05	3,042	200	0,170	9,00E-05	30,773	0,184	8,77E-05	2,805
500	0,149	1,67E-05	70,334	0,163	1,53E-05	7,339	500	0,187	3,96E-05	84,759	0,201	3,83E-05	6,853
1000	0,155	8,70E-06	146,269	0,168	7,89E-06	14,216	1000	0,202	2,13E-05	182,409	0,214	2,05E-05	13,337
3000	0,164	3,09E-06	466,821	0,177	2,77E-06	40,125	3000	0,227	7,99E-06	614,641	0,238	7,57E-06	37,475
5000	0,169	1,91E-06	800,748	0,181	1,70E-06	64,673	5000	0,239	5,06E-06	1081,259	0,250	4,77E-06	59,869
10000	0,176	9,91E-07	1665,266	0,187	8,79E-07	122,843	10000	0,257	2,72E-06	2326,977	0,267	2,55E-06	111,270

Tabela D.7: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2% RL(ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico			
	Função	f(x)	f(x)	F(x)	f(x)	f(x)		Função	f(x)	f(x)	F(x)	f(x)	f(x)	Função
a	0,050	0,011	0,040	0,079	0,012	0,012	a	0,050	0,011	0,040	0,079	0,012	a	0,050
b	0,227	-0,773	1,227	0,146	-0,854	-0,854	b	0,227	-0,773	1,227	0,146	-0,854	b	0,227
a	0,085	0,005	0,081	0,111	0,004	0,004	a	0,085	0,005	0,081	0,111	0,004	a	0,085
b	0,054	-0,946	1,054	0,040	-0,960	-0,960	b	0,054	-0,946	1,054	0,040	-0,960	b	0,054
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	
20	0,098	1,12E-03	1,599	0,122	8,94E-04	8,94E-04	20	0,098	1,12E-03	1,599	0,122	8,94E-04	20	0,098
50	0,105	1,12E-04	4,677	0,130	1,04E-04	1,04E-04	50	0,105	1,12E-04	4,677	0,130	1,04E-04	50	0,105
100	0,109	5,82E-05	10,026	0,134	5,34E-05	5,34E-05	100	0,109	5,82E-05	10,026	0,134	5,34E-05	100	0,109
200	0,113	3,02E-05	21,127	0,137	2,75E-05	2,75E-05	200	0,113	3,02E-05	21,127	0,137	2,75E-05	200	0,113
500	0,119	1,27E-05	55,951	0,143	1,14E-05	1,14E-05	500	0,119	1,27E-05	55,951	0,143	1,14E-05	500	0,119
1000	0,123	6,58E-06	116,447	0,147	5,86E-06	5,86E-06	1000	0,123	6,58E-06	116,447	0,147	5,86E-06	1000	0,123
3000	0,130	2,33E-06	371,138	0,153	2,04E-06	2,04E-06	3000	0,130	2,33E-06	371,138	0,153	2,04E-06	3000	0,130
5000	0,134	1,43E-06	635,914	0,156	1,25E-06	1,25E-06	5000	0,134	1,43E-06	635,914	0,156	1,25E-06	5000	0,134
10000	0,139	7,44E-07	1320,203	0,161	6,42E-07	6,42E-07	10000	0,139	7,44E-07	1320,203	0,161	6,42E-07	10000	0,139

Tabela D.8: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2% RL(ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f(x)	F(x)	f(x)	f(x)		Função	f(x)	f(x)	F(x)	f(x)	f(x)
a	0,050	0,009	0,043	0,096	0,009	0,088	a	0,043	0,011	0,035	0,084	0,013	0,073
b	0,185	-0,815	1,185	0,097	-0,903	1,097	b	0,245	-0,755	1,245	0,157	-0,843	1,157
a	0,077	0,005	0,072	0,118	0,005	0,114	a	0,078	0,010	0,069	0,111	0,012	0,100
b	0,064	-0,936	1,064	0,041	-0,959	1,041	b	0,131	-0,869	1,131	0,107	-0,893	1,107
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,088	8,12E-04	1,481	0,129	6,27E-04	0,873	20	0,090	1,10E-03	1,450	0,134	1,05E-03	0,875
50	0,099	1,25E-04	4,365	0,139	1,14E-04	1,278	50	0,113	5,53E-04	4,537	0,155	4,87E-04	2,174
100	0,103	6,55E-05	9,414	0,143	5,88E-05	3,289	100	0,142	1,85E-04	12,545	0,181	1,93E-04	2,417
200	0,108	3,43E-05	19,969	0,147	3,02E-05	7,265	200	0,155	1,01E-04	27,469	0,195	1,04E-04	5,893
500	0,114	1,45E-05	53,362	0,153	1,26E-05	18,984	500	0,175	4,57E-05	77,405	0,215	4,59E-05	17,973
1000	0,119	7,59E-06	111,829	0,157	6,46E-06	38,135	1000	0,192	2,50E-05	169,485	0,232	2,47E-05	38,136
3000	0,128	2,71E-06	360,379	0,164	2,25E-06	112,499	3000	0,221	9,63E-06	586,931	0,261	9,26E-06	117,884
5000	0,132	1,68E-06	620,676	0,168	1,38E-06	184,900	5000	0,236	6,18E-06	1045,731	0,275	5,86E-06	196,134
10000	0,138	8,79E-07	1297,640	0,173	7,10E-07	361,158	10000	0,259	3,38E-06	2289,703	0,296	3,16E-06	386,607

Tabela D.9: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2% RL(ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,023	0,007	0,018	0,077	0,009	0,069	a	0,028	0,009	0,021	0,084	0,013	0,072
b	0,309	-0,691	1,309	0,122	-0,878	1,122	b	0,313	-0,687	1,313	0,155	-0,845	1,155
a	0,048	0,005	0,043	0,098	0,006	0,093	a	0,053	0,010	0,045	0,096	0,013	0,085
b	0,101	-0,899	1,101	0,058	-0,942	1,058	b	0,183	-0,817	1,183	0,137	-0,863	1,137
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,058	8,97E-04	0,887	0,111	6,79E-04	1,094	20	0,071	1,11E-03	1,075	0,133	1,03E-03	1,230
50	0,071	1,43E-04	3,205	0,123	1,42E-04	2,335	50	0,094	5,89E-04	3,581	0,153	4,76E-04	3,061
100	0,076	7,66E-05	6,875	0,128	7,40E-05	3,730	100	0,117	3,66E-04	8,899	0,171	2,49E-04	5,893
200	0,081	4,11E-05	14,750	0,134	3,85E-05	8,981	200	0,145	2,27E-04	22,115	0,190	1,37E-04	11,684
500	0,089	1,80E-05	40,456	0,141	1,62E-05	24,595	500	0,166	6,10E-05	70,325	0,226	6,21E-05	29,420
1000	0,096	9,67E-06	86,790	0,147	8,45E-06	50,274	1000	0,189	3,46E-05	159,694	0,248	3,42E-05	59,199
3000	0,107	3,60E-06	290,980	0,156	3,00E-06	150,472	3000	0,231	1,41E-05	585,895	0,289	1,32E-05	176,708
5000	0,112	2,28E-06	510,690	0,161	1,86E-06	248,161	5000	0,254	9,30E-06	1072,289	0,310	8,52E-06	290,809
10000	0,121	1,22E-06	1095,577	0,167	9,66E-07	485,683	10000	0,288	5,28E-06	2434,956	0,341	4,69E-06	563,201

Tabela D.10: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2% RL(ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Plástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,013	0,004	0,009	0,076	0,007	0,070	a	0,032	0,010	0,024	0,095	0,016	0,081
b	0,348	-0,652	1,348	0,089	-0,911	1,089	b	0,319	-0,681	1,319	0,170	-0,830	1,170
a	0,029	0,004	0,025	0,086	0,006	0,080	a	0,070	0,013	0,058	0,116	0,018	0,101
b	0,146	-0,854	1,146	0,074	-0,926	1,074	b	0,193	-0,807	1,193	0,153	-0,847	1,153
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,036	6,26E-04	0,535	0,099	4,42E-04	1,826	20	0,083	1,33E-03	1,264	0,159	1,35E-03	2,712
50	0,051	1,50E-04	2,242	0,115	1,69E-04	2,463	50	0,112	7,12E-04	4,234	0,185	6,31E-04	7,924
100	0,057	8,30E-05	4,962	0,121	8,91E-05	5,670	100	0,139	4,44E-04	10,563	0,209	3,55E-04	17,832
200	0,063	4,59E-05	10,979	0,128	4,69E-05	12,124	200	0,174	2,77E-04	26,353	0,235	2,00E-04	40,128
500	0,072	2,10E-05	31,374	0,136	2,01E-05	31,514	500	0,231	8,89E-05	96,613	0,301	9,20E-05	54,060
1000	0,080	1,16E-05	69,426	0,144	1,06E-05	63,654	1000	0,263	5,08E-05	220,871	0,334	5,11E-05	89,316
3000	0,093	4,54E-06	244,489	0,156	3,81E-06	189,823	3000	0,326	2,09E-05	819,036	0,395	2,02E-05	230,064
5000	0,101	2,94E-06	439,012	0,162	2,38E-06	313,025	5000	0,359	1,39E-05	1506,431	0,428	1,31E-05	367,928
10000	0,111	1,62E-06	971,468	0,170	1,25E-06	611,967	10000	0,411	7,93E-06	3443,911	0,475	7,28E-06	699,423

Tabela D.11: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2,5% RL(ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,105	0,006	0,099	0,121	0,006	0,116	a	0,078	0,008	0,070	0,093	0,009	0,085
b	0,056	-0,944	1,056	0,047	-0,953	1,047	b	0,109	-0,891	1,109	0,095	-0,905	1,095
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,124	3,49E-04	2,347	0,140	3,28E-04	0,324	20	0,108	5,88E-04	1,949	0,124	5,90E-04	0,318
50	0,131	1,47E-04	6,178	0,146	1,37E-04	0,793	50	0,119	2,60E-04	5,384	0,135	2,58E-04	0,800
100	0,136	7,64E-05	12,848	0,151	7,08E-05	1,556	100	0,129	1,40E-04	11,611	0,145	1,38E-04	1,599
200	0,141	3,97E-05	26,718	0,156	3,66E-05	3,042	200	0,139	7,56E-05	25,044	0,155	7,35E-05	3,177
500	0,149	1,67E-05	70,334	0,163	1,53E-05	7,339	500	0,153	3,34E-05	69,178	0,169	3,21E-05	7,796
1000	0,155	8,70E-06	146,269	0,168	7,89E-06	14,216	1000	0,165	1,80E-05	149,204	0,180	1,71E-05	15,235
3000	0,164	3,09E-06	466,821	0,177	2,77E-06	40,125	3000	0,186	6,77E-06	504,496	0,200	6,34E-06	43,146
5000	0,169	1,91E-06	800,748	0,181	1,70E-06	64,673	5000	0,197	4,29E-06	888,924	0,210	3,99E-06	69,246
10000	0,176	9,91E-07	1665,266	0,187	8,79E-07	122,843	10000	0,213	2,32E-06	1917,235	0,224	2,13E-06	129,675

Tabela D.12: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2,5% RL(ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,050	0,011	0,040	0,079	0,012	0,069	a	0,037	0,009	0,029	0,066	0,011	0,056
b	0,227	-0,773	1,227	0,146	-0,854	1,146	b	0,254	-0,746	1,254	0,169	-0,831	1,169
a	0,085	0,005	0,081	0,111	0,004	0,107	a	0,061	0,005	0,056	0,087	0,008	0,080
b	0,054	-0,946	1,054	0,040	-0,960	1,040	b	0,086	-0,914	1,086	0,088	-0,912	1,088
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,098	1,12E-03	1,599	0,122	8,94E-04	0,532	20	0,078	0,000995891	1,249	0,109	0,000920214	0,612
50	0,105	1,12E-04	4,677	0,130	1,04E-04	1,295	50	0,086	0,000147253	3,950	0,123	0,000215772	1,680
100	0,109	5,82E-05	10,026	0,134	5,34E-05	2,551	100	0,091	7,81398E-05	8,384	0,130	0,000114668	3,591
200	0,113	3,02E-05	21,127	0,137	2,75E-05	5,029	200	0,097	4,14648E-05	17,797	0,139	6,09382E-05	7,669
500	0,119	1,27E-05	55,951	0,143	1,14E-05	12,324	500	0,105	1,7943E-05	48,132	0,150	2,64211E-05	20,888
1000	0,123	6,58E-06	116,447	0,147	5,86E-06	24,232	1000	0,111	9,52143E-06	102,165	0,160	1,4041E-05	44,561
3000	0,130	2,33E-06	371,138	0,153	2,04E-06	70,432	3000	0,122	3,48765E-06	336,801	0,176	5,15515E-06	148,050
5000	0,134	1,43E-06	635,914	0,156	1,25E-06	115,406	5000	0,127	2,18638E-06	586,493	0,184	3,23523E-06	258,731
10000	0,139	7,44E-07	1320,203	0,161	6,42E-07	224,923	10000	0,135	1,1602E-06	1244,889	0,195	1,7193E-06	551,833

Tabela D.13: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2,5% RL(ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,050	0,009	0,043	0,096	0,009	0,088	a	0,041	0,010	0,033	0,097	0,012	0,086
b	0,185	-0,815	1,185	0,097	-0,903	1,097	b	0,236	-0,764	1,236	0,123	-0,877	1,123
a	0,077	0,005	0,072	0,118	0,005	0,114	a	0,068	0,008	0,061	0,115	0,010	0,106
b	0,064	-0,936	1,064	0,041	-0,959	1,041	b	0,123	-0,877	1,123	0,088	-0,912	1,088
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,088	8,12E-04	1,481	0,129	6,27E-04	0,873	20	0,082	9,70E-04	1,330	0,140	8,56E-04	1,156
50	0,099	1,25E-04	4,365	0,139	1,14E-04	1,278	50	0,102	4,82E-04	4,128	0,156	3,83E-04	2,826
100	0,103	6,55E-05	9,414	0,143	5,88E-05	3,289	100	0,120	1,47E-04	10,714	0,172	1,52E-04	4,428
200	0,108	3,43E-05	19,969	0,147	3,02E-05	7,265	200	0,131	8,03E-05	23,329	0,183	8,10E-05	10,708
500	0,114	1,45E-05	53,362	0,153	1,26E-05	18,984	500	0,147	3,59E-05	65,256	0,199	3,51E-05	26,434
1000	0,119	7,59E-06	111,829	0,157	6,46E-06	38,135	1000	0,160	1,96E-05	142,089	0,211	1,87E-05	52,494
3000	0,128	2,71E-06	360,379	0,164	2,25E-06	112,499	3000	0,183	7,46E-06	487,732	0,233	6,86E-06	154,745
5000	0,132	1,68E-06	620,676	0,168	1,38E-06	184,900	5000	0,194	4,76E-06	865,429	0,244	4,31E-06	254,554

Tabela D.14: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2,5% RL(ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,023	0,007	0,018	0,077	0,009	0,069	a	0,047	0,011	0,038	0,115	0,015	0,101
b	0,309	-0,691	1,309	0,122	-0,878	1,122	b	0,240	-0,760	1,240	0,130	-0,870	1,130
a	0,048	0,005	0,043	0,098	0,006	0,093	a	0,076	0,011	0,066	0,129	0,015	0,116
b	0,101	-0,899	1,101	0,058	-0,942	1,058	b	0,150	-0,850	1,150	0,113	-0,887	1,113
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,058	8,97E-04	0,887	0,111	6,79E-04	1,094	20	0,096	1,15E-03	1,550	0,169	1,10E-03	1,444
50	0,071	1,43E-04	3,205	0,123	1,42E-04	2,335	50	0,120	5,75E-04	4,828	0,191	4,97E-04	3,605
100	0,076	7,66E-05	6,875	0,128	7,40E-05	3,730	100	0,141	3,39E-04	11,404	0,209	2,72E-04	7,057
200	0,081	4,11E-05	14,750	0,134	3,85E-05	8,981	200	0,167	2,00E-04	26,937	0,228	1,49E-04	13,474
500	0,089	1,80E-05	40,456	0,141	1,62E-05	24,595	500	0,193	5,78E-05	83,783	0,260	5,88E-05	33,521
1000	0,096	9,67E-06	86,790	0,147	8,45E-06	50,274	1000	0,214	3,21E-05	185,932	0,281	3,18E-05	67,128
3000	0,107	3,60E-06	290,980	0,156	3,00E-06	150,472	3000	0,252	1,26E-05	657,749	0,318	1,20E-05	200,513
5000	0,112	2,28E-06	510,690	0,161	1,86E-06	248,161	5000	0,272	8,17E-06	1183,571	0,337	7,63E-06	331,548
10000	0,121	1,22E-06	1095,577	0,167	9,66E-07	485,683	10000	0,302	4,53E-06	2626,575	0,365	4,13E-06	650,273

Tabela D.15: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 2,5% RL(ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,013	0,004	0,009	0,076	0,007	0,070	a	0,035	0,010	0,028	0,113	0,015	0,100
b	0,348	-0,652	1,348	0,089	-0,911	1,089	b	0,274	-0,726	1,274	0,131	-0,869	1,131
a	0,029	0,004	0,025	0,086	0,006	0,080	a	0,057	0,011	0,048	0,111	0,016	0,097
b	0,146	-0,854	1,146	0,074	-0,926	1,074	b	0,197	-0,803	1,197	0,146	-0,854	1,146
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,036	6,26E-04	0,535	0,099	4,42E-04	1,826	20	0,080	1,10E-03	1,260	0,167	1,09E-03	2,953
50	0,051	1,50E-04	2,242	0,115	1,69E-04	2,463	50	0,103	5,66E-04	4,049	0,188	4,93E-04	8,324
100	0,057	8,30E-05	4,962	0,121	8,91E-05	5,670	100	0,125	3,42E-04	9,793	0,206	2,70E-04	18,229
200	0,063	4,59E-05	10,979	0,128	4,69E-05	12,124	200	0,151	2,07E-04	23,688	0,226	1,48E-04	39,923
500	0,072	2,10E-05	31,374	0,136	2,01E-05	31,514	500	0,194	7,66E-05	81,105	0,276	8,06E-05	56,146
1000	0,080	1,16E-05	69,426	0,144	1,06E-05	63,654	1000	0,223	4,39E-05	185,977	0,305	4,46E-05	97,264
3000	0,093	4,54E-06	244,489	0,156	3,81E-06	189,823	3000	0,277	1,82E-05	692,941	0,358	1,74E-05	262,025
5000	0,101	2,94E-06	439,012	0,162	2,38E-06	313,025	5000	0,306	1,21E-05	1277,341	0,386	1,13E-05	424,094
10000	0,111	1,62E-06	971,468	0,170	1,25E-06	611,967	10000	0,351	6,92E-06	2928,990	0,427	6,24E-06	815,875

Tabela D.16: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,105	0,006	0,099	0,121	0,006	0,116	a	0,150	0,005	0,145	0,163	0,005	0,158
b	0,056	-0,944	1,056	0,047	-0,953	1,047	b	0,035	-0,965	1,035	0,030	-0,970	1,030
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,124	3,49E-04	2,347	0,140	3,28E-04	0,324	20	0,166	2,89E-04	3,210	0,178	2,70E-04	0,250
50	0,131	1,47E-04	6,178	0,146	1,37E-04	0,793	50	0,171	1,19E-04	8,285	0,183	1,11E-04	0,609
100	0,136	7,64E-05	12,848	0,151	7,08E-05	1,556	100	0,176	6,11E-05	16,973	0,187	5,68E-05	1,192
200	0,141	3,97E-05	26,718	0,156	3,66E-05	3,042	200	0,180	3,13E-05	34,775	0,191	2,90E-05	2,327
500	0,149	1,67E-05	70,334	0,163	1,53E-05	7,339	500	0,186	1,29E-05	89,754	0,197	1,19E-05	5,617
1000	0,155	8,70E-06	146,269	0,168	7,89E-06	14,216	1000	0,190	6,62E-06	183,889	0,201	6,09E-06	10,907
3000	0,164	3,09E-06	466,821	0,177	2,77E-06	40,125	3000	0,198	2,29E-06	573,156	0,208	2,10E-06	31,038
5000	0,169	1,91E-06	800,748	0,181	1,70E-06	64,673	5000	0,201	1,40E-06	972,386	0,211	1,28E-06	50,333
10000	0,176	9,91E-07	1665,266	0,187	8,79E-07	122,843	10000	0,206	7,17E-07	1992,231	0,215	6,53E-07	96,678

Tabela D.17: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD (ciclo 1)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,050	0,011	0,040	0,079	0,012	0,069	a	0,036	0,002	0,034	0,056	0,002	0,054		
b	0,227	-0,773	1,227	0,146	-0,854	1,146	b	0,061	-0,939	1,061	0,040	-0,960	1,040		
a	0,085	0,005	0,081	0,111	0,004	0,107	a	0,020	0,003	0,017	0,036	0,004	0,033		
b	0,054	-0,946	1,054	0,040	-0,960	1,040	b	0,138	-0,862	1,138	0,098	-0,902	1,098		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,098	1,12E-03	1,599	0,122	8,94E-04	0,532	20	0,042	3,47E-04	0,713	0,062	2,89E-04	0,422		
50	0,105	1,12E-04	4,677	0,130	1,04E-04	1,295	50	0,048	1,62E-04	2,078	0,068	1,26E-04	1,013		
100	0,109	5,82E-05	10,026	0,134	5,34E-05	2,551	100	0,048	2,90E-05	4,496	0,068	2,72E-05	2,024		
200	0,113	3,02E-05	21,127	0,137	2,75E-05	5,029	200	0,050	1,51E-05	9,379	0,070	1,40E-05	4,032		
500	0,119	1,27E-05	55,951	0,143	1,14E-05	12,324	500	0,053	6,39E-06	24,789	0,072	5,81E-06	10,001		
1000	0,123	6,58E-06	116,447	0,147	5,86E-06	24,232	1000	0,055	3,33E-06	51,710	0,074	2,99E-06	19,837		
3000	0,130	2,33E-06	371,138	0,153	2,04E-06	70,432	3000	0,059	1,19E-06	165,840	0,078	1,04E-06	58,491		
5000	0,134	1,43E-06	635,914	0,156	1,25E-06	115,406	5000	0,064	1,76E-06	281,348	0,083	1,62E-06	96,270		
10000	0,139	7,44E-07	1320,203	0,161	6,42E-07	224,923	10000	0,070	9,69E-07	619,000	0,089	8,69E-07	188,470		

Tabela D.18: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,050	0,009	0,043	0,096	0,009	0,088	a	0,028	0,003	0,025	0,062	0,004	0,059		
b	0,185	-0,815	1,185	0,097	-0,903	1,097	b	0,108	-0,892	1,108	0,058	-0,942	1,058		
a	0,077	0,005	0,072	0,118	0,005	0,114	a	0,019	0,003	0,016	0,043	0,004	0,039		
b	0,064	-0,936	1,064	0,041	-0,959	1,041	b	0,155	-0,845	1,155	0,103	-0,897	1,103		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,088	8,12E-04	1,481	0,129	6,27E-04	0,873	20	0,037	2,95E-04	0,643	0,074	2,49E-04	0,740		
50	0,099	1,25E-04	4,365	0,139	1,14E-04	1,278	50	0,043	1,36E-04	1,859	0,079	1,06E-04	1,818		
100	0,103	6,55E-05	9,414	0,143	5,88E-05	3,289	100	0,045	4,88E-05	4,086	0,081	4,66E-05	2,893		
200	0,108	3,43E-05	19,969	0,147	3,02E-05	7,265	200	0,049	2,63E-05	8,806	0,084	2,43E-05	6,460		
500	0,114	1,45E-05	53,362	0,153	1,26E-05	18,984	500	0,054	1,16E-05	24,300	0,089	1,02E-05	17,053		
1000	0,119	7,59E-06	111,829	0,157	6,46E-06	38,135	1000	0,058	6,25E-06	52,369	0,093	5,33E-06	34,442		
3000	0,128	2,71E-06	360,379	0,164	2,25E-06	112,499	3000	0,065	2,35E-06	176,852	0,099	1,89E-06	102,082		
5000	0,132	1,68E-06	620,676	0,168	1,38E-06	184,900	5000	0,071	2,21E-06	307,850	0,104	2,13E-06	167,255		
10000	0,138	8,79E-07	1297,640	0,173	7,10E-07	361,158	10000	0,079	1,23E-06	685,666	0,111	1,15E-06	328,843		

Tabela D.19: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,023	0,007	0,018	0,077	0,009	0,069	a	0,016	0,004	0,013	0,064	0,005	0,059
b	0,309	-0,691	1,309	0,122	-0,878	1,122	b	0,234	-0,766	1,234	0,080	-0,920	1,080
a	0,048	0,005	0,043	0,098	0,006	0,093	a	0,021	0,004	0,017	0,060	0,006	0,054
b	0,101	-0,899	1,101	0,058	-0,942	1,058	b	0,175	-0,825	1,175	0,097	-0,903	1,097
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,058	8,97E-04	0,887	0,111	6,79E-04	1,094	20	0,033	3,83E-04	0,531	0,082	3,29E-04	0,980
50	0,071	1,43E-04	3,205	0,123	1,42E-04	2,335	50	0,041	1,90E-04	1,646	0,088	1,42E-04	2,422
100	0,076	7,66E-05	6,875	0,128	7,40E-05	3,730	100	0,048	1,12E-04	3,872	0,093	7,48E-05	4,769
200	0,081	4,11E-05	14,750	0,134	3,85E-05	8,981	200	0,056	6,57E-05	9,106	0,098	3,96E-05	9,528
500	0,089	1,80E-05	40,456	0,141	1,62E-05	24,595	500	0,061	2,14E-05	25,976	0,109	2,11E-05	23,918
1000	0,096	9,67E-06	86,790	0,147	8,45E-06	50,274	1000	0,069	1,21E-05	58,662	0,117	1,13E-05	47,850
3000	0,107	3,60E-06	290,980	0,156	3,00E-06	150,472	3000	0,084	4,88E-06	213,344	0,130	4,19E-06	141,637
5000	0,112	2,28E-06	510,690	0,161	1,86E-06	248,161	5000	0,091	3,20E-06	388,868	0,136	2,64E-06	232,630
10000	0,121	1,22E-06	1095,577	0,167	9,66E-07	485,683	10000	0,103	1,81E-06	878,173	0,146	1,41E-06	450,901

Tabela D.20: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,013	0,004	0,009	0,076	0,007	0,070	a	0,013	0,004	0,009	0,067	0,008	0,060
b	0,348	-0,652	1,348	0,089	-0,911	1,089	b	0,336	-0,664	1,336	0,121	-0,879	1,121
a	0,029	0,004	0,025	0,086	0,006	0,080	a	0,031	0,006	0,027	0,071	0,009	0,063
b	0,146	-0,854	1,146	0,074	-0,926	1,074	b	0,185	-0,815	1,185	0,127	-0,873	1,127
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,036	6,26E-04	0,535	0,099	4,42E-04	1,826	20	0,035	5,82E-04	0,518	0,097	5,88E-04	1,726
50	0,051	1,50E-04	2,242	0,115	1,69E-04	2,463	50	0,047	3,17E-04	1,764	0,108	2,63E-04	4,824
100	0,057	8,30E-05	4,962	0,121	8,91E-05	5,670	100	0,060	2,00E-04	4,453	0,118	1,43E-04	10,495
200	0,063	4,59E-05	10,979	0,128	4,69E-05	12,124	200	0,075	1,26E-04	11,244	0,128	7,77E-05	22,832
500	0,072	2,10E-05	31,374	0,136	2,01E-05	31,514	500	0,100	3,70E-05	42,066	0,157	3,97E-05	28,513
1000	0,080	1,16E-05	69,426	0,144	1,06E-05	63,654	1000	0,113	2,10E-05	95,675	0,171	2,17E-05	57,210
3000	0,093	4,54E-06	244,489	0,156	3,81E-06	189,823	3000	0,139	8,60E-06	351,898	0,197	8,31E-06	172,711
5000	0,101	2,94E-06	439,012	0,162	2,38E-06	313,025	5000	0,153	5,67E-06	644,786	0,210	5,32E-06	287,218
10000	0,111	1,62E-06	971,468	0,170	1,25E-06	611,967	10000	0,174	3,22E-06	1466,500	0,229	2,90E-06	567,388

Tabela D.21: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD + 2% de emulsão (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,105	0,006	0,099	0,121	0,006	0,116	a	0,038	0,003	0,034	0,049	0,004	0,045
b	0,056	-0,944	1,056	0,047	-0,953	1,047	b	0,092	-0,908	1,092	0,073	-0,927	1,073
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,124	3,49E-04	2,347	0,140	3,28E-04	0,324	20	0,049	2,28E-04	0,906	0,061	2,23E-04	0,225
50	0,131	1,47E-04	6,178	0,146	1,37E-04	0,793	50	0,054	9,94E-05	2,464	0,065	9,53E-05	0,559
100	0,136	7,64E-05	12,848	0,151	7,08E-05	1,556	100	0,057	5,30E-05	5,255	0,068	5,01E-05	1,108
200	0,141	3,97E-05	26,718	0,156	3,66E-05	3,042	200	0,061	2,83E-05	11,204	0,072	2,64E-05	2,186
500	0,149	1,67E-05	70,334	0,163	1,53E-05	7,339	500	0,067	1,23E-05	30,483	0,077	1,13E-05	5,320
1000	0,155	8,70E-06	146,269	0,168	7,89E-06	14,216	1000	0,071	6,56E-06	64,995	0,081	5,94E-06	10,349
3000	0,164	3,09E-06	466,821	0,177	2,77E-06	40,125	3000	0,079	2,42E-06	215,806	0,088	2,15E-06	29,213
5000	0,169	1,91E-06	800,748	0,181	1,70E-06	64,673	5000	0,082	1,52E-06	377,050	0,091	1,34E-06	46,922
10000	0,176	9,91E-07	1665,266	0,187	8,79E-07	122,843	10000	0,088	8,11E-07	803,946	0,096	7,03E-07	88,266

Tabela D.22: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD + 2% de emulsão (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
									a	0,037	0,005	0,033	0,056	0,005	0,051
b	0,127	-0,873	1,127	0,093	-0,907	1,093	b	0,162	-0,838	1,162	0,129	-0,871	1,129		
a	0,050	0,011	0,040	0,079	0,012	0,069	a	0,043	0,004	0,039	0,060	0,004	0,056		
b	0,227	-0,773	1,227	0,146	-0,854	1,146	b	0,090	-0,910	1,090	0,068	-0,932	1,068		
a	0,085	0,005	0,081	0,111	0,004	0,107	a	0,025	0,004	0,021	0,039	0,005	0,034		
b	0,054	-0,946	1,054	0,040	-0,960	1,040	b	0,064	-0,838	1,162	0,129	-0,871	1,129		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,098	1,12E-03	1,599	0,122	8,94E-04	0,532	20	0,055	3,46E-04	0,968	0,073	3,41E-04	0,375		
50	0,105	1,12E-04	4,677	0,130	1,04E-04	1,295	50	0,060	1,09E-04	2,775	0,079	1,07E-04	0,920		
100	0,109	5,82E-05	10,026	0,134	5,34E-05	2,551	100	0,064	5,77E-05	5,907	0,082	5,61E-05	1,826		
200	0,113	3,02E-05	21,127	0,137	2,75E-05	5,029	200	0,068	3,07E-05	12,572	0,086	2,94E-05	3,626		
500	0,119	1,27E-05	55,951	0,143	1,14E-05	12,324	500	0,074	1,33E-05	34,121	0,092	1,25E-05	8,956		
1000	0,123	6,58E-06	116,447	0,147	5,86E-06	24,232	1000	0,079	7,10E-06	72,619	0,096	6,56E-06	17,681		
3000	0,130	2,33E-06	371,138	0,153	2,04E-06	70,432	3000	0,091	4,92E-06	234,991	0,108	4,64E-06	52,443		
5000	0,134	1,43E-06	635,914	0,156	1,25E-06	115,406	5000	0,099	3,20E-06	425,441	0,115	2,97E-06	86,105		
10000	0,139	7,44E-07	1320,203	0,161	6,42E-07	224,923	10000	0,111	1,79E-06	952,001	0,126	1,63E-06	166,473		

Tabela D.23: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD + 2% de emulsão (ciclo 3)

Estágio 3		Plástico			Elástico			Estágio 3		Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)		
	a	0,024	0,005	0,019	0,058	0,006		0,053							
	b	0,221	-0,779	1,221	0,105	-0,895		1,105							
a	0,050	0,009	0,043	0,096	0,009	0,088	a	0,032	0,004	0,028	0,063	0,005	0,058		
b	0,185	-0,815	1,185	0,097	-0,903	1,097	b	0,128	-0,872	1,128	0,083	-0,917	1,083		
a	0,077	0,005	0,072	0,118	0,005	0,114	a	0,017	0,004	0,014	0,036	0,006	0,031		
b	0,064	-0,936	1,064	0,041	-0,959	1,041	b	0,222	-0,778	1,222	0,163	-0,837	1,163		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,088	8,12E-04	1,481	0,129	6,27E-04	0,873	20	0,046	5,09E-04	0,753	0,080	4,18E-04	0,695		
50	0,099	1,25E-04	4,365	0,139	1,14E-04	1,278	50	0,053	1,35E-04	2,344	0,086	1,43E-04	1,697		
100	0,103	6,55E-05	9,414	0,143	5,88E-05	3,289	100	0,058	7,37E-05	5,122	0,092	7,55E-05	3,381		
200	0,108	3,43E-05	19,969	0,147	3,02E-05	7,265	200	0,063	4,03E-05	11,191	0,097	4,00E-05	6,761		
500	0,114	1,45E-05	53,362	0,153	1,26E-05	18,984	500	0,071	1,81E-05	31,450	0,105	1,72E-05	16,873		
1000	0,119	7,59E-06	111,829	0,157	6,46E-06	38,135	1000	0,079	1,76E-05	64,859	0,112	1,83E-05	26,712		
3000	0,128	2,71E-06	360,379	0,164	2,25E-06	112,499	3000	0,101	7,50E-06	248,385	0,134	7,28E-06	92,858		
5000	0,132	1,68E-06	620,676	0,168	1,38E-06	184,900	5000	0,113	5,04E-06	463,744	0,146	4,75E-06	158,311		
10000	0,138	8,79E-07	1297,640	0,173	7,10E-07	361,158	10000	0,132	2,94E-06	1081,957	0,163	2,66E-06	316,889		

Tabela D.24: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD + 2% de emulsão (ciclo 4)

Estágio 4		Plástico			Elástico			Estágio 4		Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)		
	a	0,023	0,007	0,018	0,077	0,009		0,069	a	0,024	0,005	0,020	0,071	0,007	0,065
	b	0,309	-0,691	1,309	0,122	-0,878		1,122	b	0,206	-0,794	1,206	0,094	-0,906	1,094
a	0,048	0,005	0,043	0,098	0,006	0,093	a	0,013	0,004	0,010	0,032	0,007	0,026		
b	0,101	-0,899	1,101	0,058	-0,942	1,058	b	0,316	-0,684	1,316	0,234	-0,766	1,234		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,058	8,97E-04	0,887	0,111	6,79E-04	1,094	20	0,045	4,65E-04	0,750	0,093	4,39E-04	0,959		
50	0,071	1,43E-04	3,205	0,123	1,42E-04	2,335	50	0,055	2,25E-04	2,263	0,102	1,91E-04	2,393		
100	0,076	7,66E-05	6,875	0,128	7,40E-05	3,730	100	0,063	1,30E-04	5,220	0,109	1,02E-04	4,718		
200	0,081	4,11E-05	14,750	0,134	3,85E-05	8,981	200	0,073	7,47E-05	12,042	0,116	5,44E-05	9,171		
500	0,089	1,80E-05	40,456	0,141	1,62E-05	24,595	500	0,090	5,70E-05	34,331	0,136	6,37E-05	22,446		
1000	0,096	9,67E-06	86,790	0,147	8,45E-06	50,274	1000	0,112	3,55E-05	85,449	0,160	3,75E-05	45,865		
3000	0,107	3,60E-06	290,980	0,156	3,00E-06	150,472	3000	0,159	1,67E-05	362,565	0,207	1,62E-05	142,196		
5000	0,112	2,28E-06	510,690	0,161	1,86E-06	248,161	5000	0,187	1,18E-05	709,970	0,233	1,09E-05	236,780		
10000	0,121	1,22E-06	1095,577	0,167	9,66E-07	485,683	10000	0,232	7,34E-06	1767,102	0,274	6,43E-06	457,990		

Tabela D.25: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 30% FRSD + 2% de emulsão (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,013	0,004	0,009	0,076	0,007	0,070	a	0,023	0,006	0,019	0,080	0,008	0,073
b	0,348	-0,652	1,348	0,089	-0,911	1,089	b	0,242	-0,758	1,242	0,101	-0,899	1,101
a	0,029	0,004	0,025	0,086	0,006	0,080	a	0,012	0,005	0,009	0,033	0,009	0,025
b	0,146	-0,854	1,146	0,074	-0,926	1,074	b	0,388	-0,612	1,388	0,288	-0,712	1,288
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,036	6,26E-04	0,535	0,099	4,42E-04	1,826	20	0,047	5,74E-04	0,764	0,108	5,45E-04	1,966
50	0,051	1,50E-04	2,242	0,115	1,69E-04	2,463	50	0,059	2,86E-04	2,384	0,119	2,39E-04	5,390
100	0,057	8,30E-05	4,962	0,121	8,91E-05	5,670	100	0,070	1,69E-04	5,639	0,127	1,28E-04	11,560
200	0,063	4,59E-05	10,979	0,128	4,69E-05	12,124	200	0,083	1,00E-04	13,337	0,136	6,87E-05	17,613
500	0,072	2,10E-05	31,374	0,136	2,01E-05	31,514	500	0,133	1,03E-04	47,796	0,196	1,13E-04	35,975
1000	0,080	1,16E-05	69,426	0,144	1,06E-05	63,654	1000	0,174	6,74E-05	125,110	0,240	6,91E-05	68,507
3000	0,093	4,54E-06	244,489	0,156	3,81E-06	189,823	3000	0,266	3,44E-05	574,973	0,329	3,16E-05	198,609
5000	0,101	2,94E-06	439,012	0,162	2,38E-06	313,025	5000	0,324	2,52E-05	1168,488	0,381	2,20E-05	318,331
10000	0,111	1,62E-06	971,468	0,170	1,25E-06	611,967	10000	0,425	1,65E-05	3058,603	0,465	1,34E-05	561,948

Tabela D.26: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo + 50% FRSD (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,105	0,006	0,099	0,121	0,006	0,116	a	0,107	0,005	0,103	0,125	0,004	0,121
b	0,056	-0,944	1,056	0,047	-0,953	1,047	b	0,043	-0,957	1,043	0,033	-0,967	1,033
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,124	3,49E-04	2,347	0,140	3,28E-04	0,324	20	0,122	2,61E-04	2,337	0,139	2,32E-04	0,343
50	0,131	1,47E-04	6,178	0,146	1,37E-04	0,793	50	0,127	1,09E-04	6,077	0,143	9,56E-05	0,833
100	0,136	7,64E-05	12,848	0,151	7,08E-05	1,556	100	0,131	5,60E-05	12,521	0,146	4,89E-05	1,624
200	0,141	3,97E-05	26,718	0,156	3,66E-05	3,042	200	0,135	2,88E-05	25,797	0,150	2,50E-05	3,156
500	0,149	1,67E-05	70,334	0,163	1,53E-05	7,339	500	0,140	1,20E-05	67,076	0,154	1,03E-05	7,563
1000	0,155	8,70E-06	146,269	0,168	7,89E-06	14,216	1000	0,144	6,18E-06	138,198	0,158	5,29E-06	14,584
3000	0,164	3,09E-06	466,821	0,177	2,77E-06	40,125	3000	0,151	2,16E-06	434,585	0,164	1,83E-06	40,933
5000	0,169	1,91E-06	800,748	0,181	1,70E-06	64,673	5000	0,154	1,32E-06	740,343	0,167	1,12E-06	65,857
10000	0,176	9,91E-07	1665,266	0,187	8,79E-07	122,843	10000	0,159	6,82E-07	1525,338	0,171	5,71E-07	124,915

Tabela D.27: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,032	0,004	0,029	0,060		0,005		0,056	b	0,137	-0,863	1,137	0,075
a	0,050	0,011	0,040	0,079	0,012	0,069	a	0,039	0,003	0,037	0,067	0,003	0,064		
b	0,227	-0,773	1,227	0,146	-0,854	1,146	b	0,067	-0,933	1,067	0,040	-0,960	1,040		
a	0,085	0,005	0,081	0,111	0,004	0,107	a	0,029	0,003	0,026	0,049	0,004	0,046		
b	0,054	-0,946	1,054	0,040	-0,960	1,040	b	0,113	-0,887	1,113	0,082	-0,918	1,082		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,098	1,12E-03	1,599	0,122	8,94E-04	0,532	20	0,049	3,36E-04	0,861	0,076	2,85E-04	0,544		
50	0,105	1,12E-04	4,677	0,130	1,04E-04	1,295	50	0,051	6,87E-05	2,405	0,078	6,20E-05	1,351		
100	0,109	5,82E-05	10,026	0,134	5,34E-05	2,551	100	0,054	3,60E-05	5,038	0,080	3,19E-05	2,684		
200	0,113	3,02E-05	21,127	0,137	2,75E-05	5,029	200	0,056	1,88E-05	10,554	0,083	1,64E-05	5,321		
500	0,119	1,27E-05	55,951	0,143	1,14E-05	12,324	500	0,060	8,01E-06	28,054	0,086	6,79E-06	13,106		
1000	0,123	6,58E-06	116,447	0,147	5,86E-06	24,232	1000	0,063	4,20E-06	58,772	0,088	3,49E-06	25,844		
3000	0,130	2,33E-06	371,138	0,153	2,04E-06	70,432	3000	0,071	2,68E-06	190,817	0,095	2,57E-06	73,764		
5000	0,134	1,43E-06	635,914	0,156	1,25E-06	115,406	5000	0,075	1,70E-06	337,012	0,099	1,61E-06	121,270		
10000	0,139	7,44E-07	1320,203	0,161	6,42E-07	224,923	10000	0,081	9,22E-07	729,190	0,104	8,51E-07	238,476		

Tabela D.28: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,024	0,004	0,020	0,071		0,004		0,067	b	0,183	-0,817	1,183	0,061
a	0,050	0,009	0,043	0,096	0,009	0,088	a	0,032	0,003	0,029	0,074	0,004	0,070		
b	0,185	-0,815	1,185	0,097	-0,903	1,097	b	0,095	-0,905	1,095	0,051	-0,949	1,051		
a	0,077	0,005	0,072	0,118	0,005	0,114	a	0,018	0,003	0,015	0,049	0,005	0,044		
b	0,064	-0,936	1,064	0,041	-0,959	1,041	b	0,174	-0,826	1,174	0,105	-0,895	1,105		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,088	8,12E-04	1,481	0,129	6,27E-04	0,873	20	0,042	3,80E-04	0,703	0,085	2,58E-04	0,900		
50	0,099	1,25E-04	4,365	0,139	1,14E-04	1,278	50	0,046	8,71E-05	2,095	0,090	9,16E-05	2,228		
100	0,103	6,55E-05	9,414	0,143	5,88E-05	3,289	100	0,049	4,65E-05	4,476	0,093	4,75E-05	4,449		
200	0,108	3,43E-05	19,969	0,147	3,02E-05	7,265	200	0,052	2,48E-05	9,561	0,097	2,46E-05	8,898		
500	0,114	1,45E-05	53,362	0,153	1,26E-05	18,984	500	0,057	1,08E-05	26,074	0,101	1,03E-05	22,225		
1000	0,119	7,59E-06	111,829	0,157	6,46E-06	38,135	1000	0,061	5,79E-06	55,694	0,105	5,33E-06	44,331		
3000	0,128	2,71E-06	360,379	0,164	2,25E-06	112,499	3000	0,071	4,11E-06	181,106	0,114	3,98E-06	87,187		
5000	0,132	1,68E-06	620,676	0,168	1,38E-06	184,900	5000	0,077	2,70E-06	329,907	0,120	2,52E-06	215,336		
10000	0,138	8,79E-07	1297,640	0,173	7,10E-07	361,158	10000	0,087	1,52E-06	744,407	0,129	1,35E-06	425,499		

Tabela D.29: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,019	0,004	0,016	0,079		0,005		0,074	b	0,220	-0,780	1,220	0,061
a	0,023	0,007	0,018	0,077	0,009	0,069	a	0,021	0,004	0,018	0,077	0,006	0,071		
b	0,309	-0,691	1,309	0,122	-0,878	1,122	b	0,178	-0,822	1,178	0,072	-0,928	1,072		
a	0,048	0,005	0,043	0,098	0,006	0,093	a	0,015	0,003	0,012	0,052	0,007	0,046		
b	0,101	-0,899	1,101	0,058	-0,942	1,058	b	0,232	-0,768	1,232	0,135	-0,865	1,135		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,058	8,97E-04	0,887	0,111	6,79E-04	1,094	20	0,036	3,19E-04	0,609	0,095	3,45E-04	1,164		
50	0,071	1,43E-04	3,205	0,123	1,42E-04	2,335	50	0,042	1,50E-04	1,793	0,102	1,47E-04	3,362		
100	0,076	7,66E-05	6,875	0,128	7,40E-05	3,730	100	0,048	8,49E-05	4,055	0,107	7,74E-05	5,996		
200	0,081	4,11E-05	14,750	0,134	3,85E-05	8,981	200	0,054	4,80E-05	9,174	0,112	4,07E-05	11,469		
500	0,089	1,80E-05	40,456	0,141	1,62E-05	24,595	500	0,063	2,92E-05	25,478	0,120	3,24E-05	22,881		
1000	0,096	9,67E-06	86,790	0,147	8,45E-06	50,274	1000	0,074	1,71E-05	59,859	0,132	1,78E-05	51,868		
3000	0,107	3,60E-06	290,980	0,156	3,00E-06	150,472	3000	0,095	7,37E-06	231,783	0,153	6,87E-06	168,321		
5000	0,112	2,28E-06	510,690	0,161	1,86E-06	248,161	5000	0,107	4,98E-06	434,976	0,164	4,41E-06	282,978		
10000	0,121	1,22E-06	1095,577	0,167	9,66E-07	485,683	10000	0,126	2,93E-06	1021,933	0,180	2,42E-06	559,950		

Tabela D.30: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,013	0,004	0,009	0,076		0,007		0,070	b	0,236	-0,764	1,236	0,077
a	0,013	0,004	0,009	0,076	0,007	0,070	a	0,019	0,004	0,015	0,088	0,007	0,082		
b	0,348	-0,652	1,348	0,089	-0,911	1,089	b	0,236	-0,764	1,236	0,077	-0,923	1,077		
a	0,029	0,004	0,025	0,086	0,006	0,080	a	0,015	0,004	0,011	0,055	0,010	0,046		
b	0,146	-0,854	1,146	0,074	-0,926	1,074	b	0,290	-0,710	1,290	0,175	-0,825	1,175		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,036	6,26E-04	0,535	0,099	4,42E-04	1,826	20	0,038	4,52E-04	0,620	0,111	4,26E-04	2,062		
50	0,051	1,50E-04	2,242	0,115	1,69E-04	2,463	50	0,048	2,24E-04	1,923	0,119	1,83E-04	5,530		
100	0,057	8,30E-05	4,962	0,121	8,91E-05	5,670	100	0,056	1,61E-04	4,308	0,122	2,14E-04	11,665		
200	0,063	4,59E-05	10,979	0,128	4,69E-05	12,124	200	0,068	9,84E-05	10,534	0,138	1,21E-04	19,184		
500	0,072	2,10E-05	31,374	0,136	2,01E-05	31,514	500	0,089	5,13E-05	34,342	0,162	5,67E-05	40,807		
1000	0,080	1,16E-05	69,426	0,144	1,06E-05	63,654	1000	0,108	3,14E-05	83,963	0,183	3,20E-05	77,875		
3000	0,093	4,54E-06	244,489	0,156	3,81E-06	189,823	3000	0,149	1,44E-05	346,307	0,222	1,29E-05	225,704		
5000	0,101	2,94E-06	439,012	0,162	2,38E-06	313,025	5000	0,173	1,00E-05	669,260	0,242	8,48E-06	368,130		
10000	0,111	1,62E-06	971,468	0,170	1,25E-06	611,967	10000	0,211	6,12E-06	1636,267	0,274	4,79E-06	698,300		

Tabela D.31: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% + 2% de emulsão (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,105	0,006	0,099	0,121	0,006	0,116	a	0,044	0,002	0,042	0,059	0,002	0,057
b	0,056	-0,944	1,056	0,047	-0,953	1,047	b	0,053	-0,947	1,053	0,038	-0,962	1,038
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,124	3,49E-04	2,347	0,140	3,28E-04	0,324	20	0,052	1,36E-04	0,985	0,066	1,23E-04	0,281
50	0,131	1,47E-04	6,178	0,146	1,37E-04	0,793	50	0,054	5,72E-05	2,584	0,068	5,10E-05	0,691
100	0,136	7,64E-05	12,848	0,151	7,08E-05	1,556	100	0,056	2,97E-05	5,360	0,070	2,62E-05	1,362
200	0,141	3,97E-05	26,718	0,156	3,66E-05	3,042	200	0,059	1,54E-05	11,119	0,072	1,34E-05	2,680
500	0,149	1,67E-05	70,334	0,163	1,53E-05	7,339	500	0,061	6,46E-06	29,170	0,074	5,56E-06	6,534
1000	0,155	8,70E-06	146,269	0,168	7,89E-06	14,216	1000	0,064	3,35E-06	60,506	0,076	2,85E-06	12,782
3000	0,164	3,09E-06	466,821	0,177	2,77E-06	40,125	3000	0,067	1,18E-06	192,318	0,079	9,91E-07	36,796
5000	0,169	1,91E-06	800,748	0,181	1,70E-06	64,673	5000	0,069	7,29E-07	329,261	0,081	6,06E-07	59,983
10000	0,176	9,91E-07	1665,266	0,187	8,79E-07	122,843	10000	0,072	3,78E-07	682,978	0,083	3,11E-07	116,017

Tabela D.32: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% + 2% de emulsão (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
b	0,056	-0,944	1,056	0,047	-0,953	1,047	b	0,053	-0,947	1,053	0,038	-0,962	1,038		
a	0,050	0,011	0,040	0,079	0,012	0,069	a	0,043	0,003	0,040	0,064	0,003	0,061		
b	0,227	-0,773	1,227	0,146	-0,854	1,146	b	0,068	-0,932	1,068	0,048	-0,952	1,048		
a	0,085	0,005	0,081	0,111	0,004	0,107	a	0,025	0,003	0,022	0,043	0,004	0,039		
b	0,054	-0,946	1,054	0,040	-0,960	1,040	b	0,138	-0,862	1,138	0,101	-0,899	1,101		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,098	1,12E-03	1,599	0,122	8,94E-04	0,532	20	0,052	3,96E-04	0,895	0,074	3,31E-04	0,463		
50	0,105	1,12E-04	4,677	0,130	1,04E-04	1,295	50	0,056	7,67E-05	2,619	0,078	7,50E-05	0,681		
100	0,109	5,82E-05	10,026	0,134	5,34E-05	2,551	100	0,059	4,02E-05	5,493	0,080	3,88E-05	1,769		
200	0,113	3,02E-05	21,127	0,137	2,75E-05	5,029	200	0,062	2,11E-05	11,520	0,083	2,00E-05	3,934		
500	0,119	1,27E-05	55,951	0,143	1,14E-05	12,324	500	0,066	8,98E-06	30,666	0,087	8,38E-06	10,374		
1000	0,123	6,58E-06	116,447	0,147	5,86E-06	24,232	1000	0,069	4,71E-06	64,314	0,090	4,33E-06	20,992		
3000	0,130	2,33E-06	371,138	0,153	2,04E-06	70,432	3000	0,076	3,52E-06	201,396	0,097	3,26E-06	41,921		
5000	0,134	1,43E-06	635,914	0,156	1,25E-06	115,406	5000	0,082	2,27E-06	60,223	0,102	2,06E-06	3,019		
10000	0,139	7,44E-07	1320,203	0,161	6,42E-07	224,923	10000	0,090	1,25E-06	92,908	0,110	1,10E-06	82,361		

Tabela D.33: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% + 2% de emulsão (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,027	0,004	0,023	0,066		0,005		0,062	b	0,161	-0,839	1,161	0,073
a	0,050	0,009	0,043	0,096	0,009	0,088	a	0,032	0,003	0,029	0,070	0,004	0,067		
b	0,185	-0,815	1,185	0,097	-0,903	1,097	b	0,108	-0,892	1,108	0,056	-0,944	1,056		
a	0,077	0,005	0,072	0,118	0,005	0,114	a	0,020	0,004	0,017	0,047	0,005	0,042		
b	0,064	-0,936	1,064	0,041	-0,959	1,041	b	0,177	-0,823	1,177	0,117	-0,883	1,117		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,088	8,12E-04	1,481	0,129	6,27E-04	0,873	20	0,044	3,53E-04	0,756	0,082	3,00E-04	0,779		
50	0,099	1,25E-04	4,365	0,139	1,14E-04	1,278	50	0,049	1,05E-04	2,194	0,087	9,71E-05	1,948		
100	0,103	6,55E-05	9,414	0,143	5,88E-05	3,289	100	0,052	5,65E-05	4,728	0,091	5,05E-05	3,881		
200	0,108	3,43E-05	19,969	0,147	3,02E-05	7,265	200	0,056	3,05E-05	10,190	0,094	2,62E-05	7,703		
500	0,114	1,45E-05	53,362	0,153	1,26E-05	18,984	500	0,062	1,34E-05	28,122	0,099	1,10E-05	18,946		
1000	0,119	7,59E-06	111,829	0,157	6,46E-06	38,135	1000	0,069	1,22E-05	58,647	0,105	1,23E-05	33,438		
3000	0,128	2,71E-06	360,379	0,164	2,25E-06	112,499	3000	0,084	4,96E-06	213,794	0,120	4,67E-06	105,668		
5000	0,132	1,68E-06	620,676	0,168	1,38E-06	184,900	5000	0,092	3,26E-06	390,116	0,127	2,97E-06	176,803		
10000	0,138	8,79E-07	1297,640	0,173	7,10E-07	361,158	10000	0,104	1,84E-06	882,303	0,138	1,61E-06	349,875		

Tabela D.34: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% + 2% de emulsão (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,023	0,007	0,018	0,077		0,009		0,069	a	0,020	0,005	0,016	0,068
b	0,309	-0,691	1,309	0,122	-0,878	1,122	b	0,232	-0,768	1,232	0,097	-0,903	1,097		
a	0,048	0,005	0,043	0,098	0,006	0,093	a	0,013	0,004	0,010	0,034	0,008	0,028		
b	0,101	-0,899	1,101	0,058	-0,942	1,058	b	0,310	-0,690	1,310	0,225	-0,775	1,225		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,058	8,97E-04	0,887	0,111	6,79E-04	1,094	20	0,040	4,67E-04	0,654	0,091	4,44E-04	0,427		
50	0,071	1,43E-04	3,205	0,123	1,42E-04	2,335	50	0,050	2,31E-04	2,023	0,100	1,94E-04	1,298		
100	0,076	7,66E-05	6,875	0,128	7,40E-05	3,730	100	0,059	1,36E-04	4,751	0,107	1,04E-04	3,012		
200	0,081	4,11E-05	14,750	0,134	3,85E-05	8,981	200	0,069	7,96E-05	11,158	0,114	5,56E-05	6,988		
500	0,089	1,80E-05	40,456	0,141	1,62E-05	24,595	500	0,089	5,52E-05	33,901	0,137	6,14E-05	20,892		
1000	0,096	9,67E-06	86,790	0,147	8,45E-06	50,274	1000	0,110	3,42E-05	84,085	0,160	3,59E-05	45,269		
3000	0,107	3,60E-06	290,980	0,156	3,00E-06	150,472	3000	0,155	1,60E-05	354,798	0,204	1,53E-05	144,755		
5000	0,112	2,28E-06	510,690	0,161	1,86E-06	248,161	5000	0,182	1,13E-05	692,969	0,229	1,03E-05	241,825		
10000	0,121	1,22E-06	1095,577	0,167	9,66E-07	485,683	10000	0,225	6,99E-06	1718,748	0,268	6,03E-06	467,544		

Tabela D.35: Comportamento mecânico do solo controle 1 de do solo +50% + 2% de emulsão (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,013	0,004	0,009	0,076	0,007	0,070	a	0,019	0,005	0,015	0,078	0,008	0,071
b	0,348	-0,652	1,348	0,089	-0,911	1,089	b	0,266	-0,734	1,266	0,099	-0,901	1,099
a	0,029	0,004	0,025	0,086	0,006	0,080	a	0,014	0,005	0,010	0,039	0,009	0,032
b	0,146	-0,854	1,146	0,074	-0,926	1,074	b	0,338	-0,662	1,338	0,239	-0,761	1,239
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,036	6,26E-04	0,535	0,099	4,42E-04	1,826	20	0,042	5,58E-04	0,662	0,105	5,18E-04	1,904
50	0,051	1,50E-04	2,242	0,115	1,69E-04	2,463	50	0,053	2,85E-04	2,112	0,115	2,27E-04	5,211
100	0,057	8,30E-05	4,962	0,121	8,91E-05	5,670	100	0,065	2,19E-04	4,830	0,118	2,83E-04	11,162
200	0,063	4,59E-05	10,979	0,128	4,69E-05	12,124	200	0,082	1,38E-04	12,212	0,140	1,67E-04	16,777
500	0,072	2,10E-05	31,374	0,136	2,01E-05	31,514	500	0,111	7,53E-05	41,619	0,174	8,33E-05	35,017
1000	0,080	1,16E-05	69,426	0,144	1,06E-05	63,654	1000	0,141	4,76E-05	105,222	0,205	4,92E-05	66,954
3000	0,093	4,54E-06	244,489	0,156	3,81E-06	189,823	3000	0,204	2,30E-05	457,666	0,267	2,13E-05	195,588
5000	0,101	2,94E-06	439,012	0,162	2,38E-06	313,025	5000	0,243	1,64E-05	906,584	0,302	1,45E-05	318,145
10000	0,111	1,62E-06	971,468	0,170	1,25E-06	611,967	10000	0,307	1,04E-05	2292,032	0,357	8,54E-06	590,902

## D.2 DP e DR em múltiplos estágios do solo 2

Tabela D.36: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 0,5% de emulsão (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,100	0,005	0,096	0,127	0,005	0,123	a	0,111	0,005	0,106	0,140	0,005	0,135
b	0,050	-0,950	1,050	0,038	-0,962	1,038	b	0,047	-0,953	1,047	0,036	-0,964	1,036
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,116	2,89E-04	2,219	0,143	2,71E-04	0,529	20	0,127	2,97E-04	2,430	0,156	2,81E-04	0,582
50	0,122	1,21E-04	5,805	0,148	1,12E-04	1,307	50	0,133	1,24E-04	6,340	0,161	1,16E-04	1,442
100	0,126	6,27E-05	12,017	0,152	5,75E-05	2,586	100	0,137	6,40E-05	13,097	0,165	5,95E-05	2,859
200	0,131	3,24E-05	24,876	0,156	2,95E-05	5,108	200	0,142	3,31E-05	27,056	0,169	3,05E-05	5,662
500	0,137	1,36E-05	65,086	0,161	1,22E-05	12,528	500	0,148	1,38E-05	70,597	0,175	1,26E-05	13,938
1000	0,141	7,02E-06	134,731	0,165	6,28E-06	24,636	1000	0,153	7,13E-06	145,841	0,180	6,46E-06	27,498
3000	0,149	2,47E-06	426,862	0,172	2,18E-06	71,603	3000	0,161	2,50E-06	460,565	0,187	2,24E-06	80,419
5000	0,153	1,52E-06	729,719	0,176	1,34E-06	117,326	5000	0,165	1,54E-06	786,146	0,190	1,37E-06	132,218
10000	0,159	7,88E-07	1510,562	0,181	6,85E-07	228,703	10000	0,170	7,94E-07	1624,038	0,195	7,02E-07	259,073

Tabela D.37: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 0,5% de emulsão (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,081	0,015	0,068	0,135	0,017	0,120	a	0,104	0,007	0,098	0,159	0,008	0,152
b	0,189	-0,811	1,189	0,126	-0,874	1,126	b	0,069	-0,931	1,069	0,048	-0,952	1,048
a	0,121	0,006	0,115	0,177	0,006	0,171	a	0,092	0,008	0,084	0,143	0,009	0,134
b	0,048	-0,952	1,048	0,033	-0,967	1,033	b	0,091	-0,909	1,091	0,066	-0,934	1,066
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,142	1,34E-03	2,390	0,197	1,24E-03	1,116	20	0,128	4,40E-04	2,396	0,184	4,42E-04	1,108
50	0,169	6,38E-04	6,674	0,221	5,56E-04	2,782	50	0,136	1,87E-04	6,379	0,192	1,85E-04	2,776
100	0,192	3,63E-04	14,085	0,241	3,03E-04	5,543	100	0,143	9,82E-05	13,379	0,198	9,56E-05	5,553
200	0,156	3,73E-05	29,409	0,210	3,45E-05	11,032	200	0,149	6,74E-05	27,241	0,203	6,66E-05	11,908
500	0,162	1,56E-05	77,260	0,217	1,42E-05	27,352	500	0,161	2,93E-05	74,007	0,215	2,83E-05	28,109
1000	0,168	8,07E-06	160,035	0,222	7,27E-06	54,282	1000	0,172	1,56E-05	157,620	0,225	1,48E-05	54,919
3000	0,177	2,83E-06	506,686	0,230	2,51E-06	160,417	3000	0,190	5,74E-06	522,419	0,242	5,30E-06	160,465
5000	0,181	1,74E-06	865,632	0,234	1,53E-06	265,174	5000	0,199	3,61E-06	912,000	0,250	3,29E-06	264,188
10000	0,188	9,01E-07	1790,131	0,239	7,84E-07	523,755	10000	0,212	1,92E-06	1942,387	0,262	1,72E-06	518,396

Tabela D.38: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 0,5% de emulsão (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,142	0,020	0,125	0,265	0,020	0,246	a	0,169	0,010	0,160	0,280	0,010	0,270
b	0,137	-0,863	1,137	0,075	-0,925	1,075	b	0,059	-0,941	1,059	0,036	-0,964	1,036
a	0,183	0,009	0,175	0,298	0,010	0,289	a	0,142	0,012	0,131	0,247	0,014	0,234
b	0,048	-0,952	1,048	0,032	-0,968	1,032	b	0,084	-0,916	1,084	0,056	-0,944	1,056
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,215	1,47E-03	3,772	0,331	1,24E-03	2,395	20	0,202	5,90E-04	3,813	0,312	5,69E-04	2,206
50	0,221	2,10E-04	10,266	0,339	2,18E-04	5,932	50	0,213	2,49E-04	10,056	0,323	2,35E-04	5,502
100	0,228	1,09E-04	21,498	0,346	1,12E-04	11,843	100	0,222	1,30E-04	20,945	0,331	1,21E-04	10,968
200	0,236	5,62E-05	44,715	0,354	5,71E-05	23,687	200	0,231	6,76E-05	43,625	0,339	6,19E-05	21,837
500	0,246	2,35E-05	117,196	0,365	2,35E-05	59,257	500	0,244	2,85E-05	115,070	0,351	2,56E-05	54,150
1000	0,254	1,21E-05	242,543	0,373	1,20E-05	118,554	1000	0,255	2,15E-05	239,404	0,364	2,04E-05	108,591
3000	0,268	4,26E-06	767,317	0,386	4,15E-06	355,472	3000	0,279	7,85E-06	777,247	0,387	7,22E-06	325,019
5000	0,275	2,62E-06	1310,575	0,393	2,53E-06	591,966	5000	0,292	4,91E-06	1348,969	0,398	4,45E-06	538,838
10000	0,284	1,35E-06	2709,502	0,402	1,30E-06	1181,813	10000	0,309	2,61E-06	2855,057	0,414	2,32E-06	1066,013

Tabela D.39: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 0,5% de emulsão (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,132	0,018	0,116	0,306	0,020	0,288	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
b	0,135	-0,865	1,135	0,064	-0,936	1,064							
a	0,163	0,011	0,153	0,327	0,014	0,314	a	0,069	0,013	0,058	0,195	0,018	0,178
b	0,067	-0,933	1,067	0,041	-0,959	1,041	b	0,188	-0,812	1,188	0,092	-0,908	1,092
a	0,126	0,013	0,114	0,282	0,018	0,265	a	0,059	0,012	0,049	0,142	0,020	0,124
b	0,104	-0,896	1,104	0,063	-0,937	1,063	b	0,209	-0,791	1,209	0,144	-0,856	1,144
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,198	1,34E-03	3,486	0,371	1,19E-03	3,485	20	0,121	1,13E-03	2,033	0,257	1,18E-03	2,669
50	0,212	2,86E-04	9,695	0,385	3,17E-04	8,636	50	0,143	5,38E-04	6,035	0,279	5,15E-04	6,756
100	0,223	1,50E-04	20,596	0,396	1,63E-04	17,284	100	0,163	3,06E-04	13,745	0,298	2,75E-04	13,524
200	0,233	7,85E-05	43,440	0,407	8,40E-05	34,672	200	0,186	1,74E-04	31,309	0,318	1,46E-04	26,831
500	0,248	3,34E-05	115,933	0,423	3,49E-05	87,103	500	0,221	8,29E-05	92,954	0,346	6,37E-05	65,216
1000	0,260	2,71E-05	243,143	0,435	2,74E-05	174,798	1000	0,252	5,29E-05	211,613	0,383	5,51E-05	77,596
3000	0,291	1,01E-05	798,890	0,466	9,78E-06	525,947	3000	0,318	2,22E-05	790,971	0,449	2,15E-05	392,199
5000	0,307	6,40E-06	1398,188	0,482	6,06E-06	875,911	5000	0,354	1,48E-05	1464,620	0,483	1,39E-05	652,639
10000	0,330	3,44E-06	2996,594	0,503	3,17E-06	1745,185	10000	0,409	8,56E-06	3382,956	0,534	7,67E-06	1287,743

Tabela D.35: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 0,5% de emulsão (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,149	0,027	0,126	0,367	0,031	0,339	a	0,629	0,065	0,570	0,809	0,065	0,749
b	0,179	-0,821	1,179	0,085	-0,915	1,085	b	0,103	-0,897	1,103	0,081	-0,919	1,081
a	0,178	0,022	0,158	0,363	0,030	0,335	a	0,749	0,046	0,706	0,914	0,048	0,868
b	0,125	-0,875	1,125	0,083	-0,917	1,083	b	0,061	-0,939	1,061	0,052	-0,948	1,052
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,255	2,29E-03	4,324	0,473	2,00E-03	4,406	20	0,856	4,39E-03	15,516	1,030	4,15E-03	3,549
50	0,290	7,24E-04	7,183	0,503	8,39E-04	10,848	50	0,940	1,93E-03	42,620	1,109	1,79E-03	8,693
100	0,316	3,95E-04	22,392	0,533	4,45E-04	21,607	100	0,994	6,09E-04	91,288	1,163	6,10E-04	17,151
200	0,345	2,15E-04	55,563	0,565	2,36E-04	43,466	200	1,037	3,18E-04	193,029	1,206	3,16E-04	34,092
500	0,386	9,66E-05	166,030	0,609	1,02E-04	110,011	500	1,097	1,34E-04	514,271	1,265	1,33E-04	84,817
1000	0,421	5,26E-05	368,830	0,646	5,39E-05	221,928	1000	1,144	7,01E-05	1075,702	1,312	6,88E-05	169,027
3000	0,483	2,01E-05	1283,216	0,708	1,97E-05	671,113	3000	1,224	2,50E-05	3456,993	1,390	2,43E-05	503,060
5000	0,515	1,29E-05	2284,083	0,739	1,23E-05	1118,853	5000	1,263	1,55E-05	5946,547	1,428	1,50E-05	834,140
10000	0,562	7,02E-06	4988,199	0,783	6,53E-06	2228,872	10000	1,317	8,07E-06	12411,693	1,480	7,76E-06	1653,734

Tabela D.36: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1% de emulsão (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,100	0,005	0,096	0,127	0,005	0,123	a	0,111	0,008	0,103	0,144	0,007	0,138
b	0,050	-0,950	1,050	0,038	-0,962	1,038	b	0,072	-0,928	1,072	0,049	-0,951	1,049
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,116	2,89E-04	2,219	0,143	2,71E-04	0,529	20	0,137	4,96E-04	2,560	0,167	4,08E-04	0,628
50	0,122	1,21E-04	5,805	0,148	1,12E-04	1,307	50	0,147	2,12E-04	6,839	0,175	1,71E-04	1,495
100	0,126	6,27E-05	12,017	0,152	5,75E-05	2,586	100	0,154	1,11E-04	14,381	0,181	8,83E-05	2,862
200	0,131	3,24E-05	24,876	0,156	2,95E-05	5,108	200	0,162	5,86E-05	30,239	0,187	4,57E-05	5,433
500	0,137	1,36E-05	65,086	0,161	1,22E-05	12,528	500	0,173	2,50E-05	80,771	0,196	1,91E-05	12,488
1000	0,141	7,02E-06	134,731	0,165	6,28E-06	24,636	1000	0,182	1,32E-05	169,839	0,202	9,88E-06	23,098
3000	0,149	2,47E-06	426,862	0,172	2,18E-06	71,603	3000	0,197	4,75E-06	551,614	0,214	3,47E-06	59,087
5000	0,153	1,52E-06	729,719	0,176	1,34E-06	117,326	5000	0,205	2,96E-06	953,925	0,219	2,14E-06	89,612
10000	0,159	7,88E-07	1510,562	0,181	6,85E-07	228,703	10000	0,215	1,55E-06	2005,840	0,226	1,11E-06	153,067

Tabela D.37: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1% de emulsão (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,081	0,015	0,068	0,135	0,017	0,120	a	0,108	0,018	0,093	0,160	0,019	0,143
b	0,189	-0,811	1,189	0,126	-0,874	1,126	b	0,165	-0,835	1,165	0,117	-0,883	1,117
a	0,121	0,006	0,115	0,177	0,006	0,171	a	0,157	0,007	0,151	0,209	0,007	0,202
b	0,048	-0,952	1,048	0,033	-0,967	1,033	b	0,044	-0,956	1,044	0,032	-0,968	1,032
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,142	1,34E-03	2,390	0,197	1,24E-03	1,116	20	0,177	1,46E-03	3,042	0,227	1,33E-03	1,028
50	0,169	6,38E-04	6,674	0,221	5,56E-04	2,782	50	0,206	6,81E-04	8,541	0,253	5,92E-04	2,547
100	0,192	3,63E-04	14,085	0,241	3,03E-04	5,543	100	0,231	3,82E-04	18,023	0,274	3,21E-04	5,058
200	0,156	3,73E-05	29,409	0,210	3,45E-05	11,032	200	0,198	4,34E-05	37,570	0,248	4,01E-05	10,040
500	0,162	1,56E-05	77,260	0,217	1,42E-05	27,352	500	0,206	1,81E-05	98,394	0,255	1,65E-05	24,821
1000	0,168	8,07E-06	160,035	0,222	7,27E-06	54,282	1000	0,213	9,30E-06	203,264	0,261	8,45E-06	49,161
3000	0,177	2,83E-06	506,686	0,230	2,51E-06	160,417	3000	0,223	3,25E-06	640,666	0,270	2,92E-06	144,837
5000	0,181	1,74E-06	865,632	0,234	1,53E-06	265,174	5000	0,228	2,00E-06	1092,192	0,275	1,78E-06	239,077
10000	0,188	9,01E-07	1790,131	0,239	7,84E-07	523,755	10000	0,235	1,03E-06	2252,078	0,281	9,10E-07	471,285

Tabela D.38: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1% de emulsão (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,142	0,020	0,125	0,265	0,020	0,246	a	0,152	0,016	0,137	0,262	0,017	0,247
b	0,137	-0,863	1,137	0,075	-0,925	1,075	b	0,104	-0,896	1,104	0,063	-0,937	1,063
a	0,183	0,009	0,175	0,298	0,010	0,289	a	0,177	0,011	0,167	0,281	0,012	0,269
b	0,048	-0,952	1,048	0,032	-0,968	1,032	b	0,061	-0,939	1,061	0,043	-0,957	1,043
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,215	1,47E-03	3,772	0,331	1,24E-03	2,395	20	0,207	1,08E-03	3,756	0,317	9,98E-04	2,208
50	0,221	2,10E-04	10,266	0,339	2,18E-04	5,932	50	0,228	4,75E-04	10,330	0,336	4,23E-04	5,464
100	0,228	1,09E-04	21,498	0,346	1,12E-04	11,843	100	0,235	1,44E-04	21,954	0,343	1,48E-04	10,837
200	0,236	5,62E-05	44,715	0,354	5,71E-05	23,687	200	0,245	7,53E-05	46,013	0,353	7,61E-05	21,622
500	0,246	2,35E-05	117,196	0,365	2,35E-05	59,257	500	0,259	3,18E-05	121,987	0,367	3,17E-05	54,012
1000	0,254	1,21E-05	242,543	0,373	1,20E-05	118,554	1000	0,271	1,66E-05	254,776	0,378	1,63E-05	107,963
3000	0,268	4,26E-06	767,317	0,386	4,15E-06	355,472	3000	0,289	5,93E-06	818,064	0,397	5,70E-06	323,068
5000	0,275	2,62E-06	1310,575	0,393	2,53E-06	591,966	5000	0,299	3,67E-06	1407,013	0,406	3,50E-06	537,268
10000	0,284	1,35E-06	2709,502	0,402	1,30E-06	1181,813	10000	0,312	1,91E-06	2936,572	0,418	1,80E-06	1070,017

Tabela D.39: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1% de emulsão (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,132	0,018	0,116	0,306	0,020	0,288	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
b	0,135	-0,865	1,135	0,064	-0,936	1,064							
a	0,163	0,011	0,153	0,327	0,014	0,314	a	0,128	0,024	0,108	0,290	0,027	0,265
b	0,067	-0,933	1,067	0,041	-0,959	1,041	b	0,186	-0,814	1,186	0,094	-0,906	1,094
a	0,126	0,013	0,114	0,282	0,018	0,265	a	0,177	0,016	0,162	0,323	0,020	0,304
b	0,104	-0,896	1,104	0,063	-0,937	1,063	b	0,093	-0,907	1,093	0,062	-0,938	1,062
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,198	1,34E-03	3,486	0,371	1,19E-03	3,485	20	0,223	2,07E-03	3,766	0,384	1,80E-03	3,247
50	0,212	2,86E-04	9,695	0,385	3,17E-04	8,636	50	0,265	9,84E-04	11,162	0,418	7,84E-04	7,943
100	0,223	1,50E-04	20,596	0,396	1,63E-04	17,284	100	0,271	2,51E-04	24,332	0,429	2,65E-04	15,819
200	0,233	7,85E-05	43,440	0,407	8,40E-05	34,672	200	0,289	1,34E-04	52,423	0,448	1,38E-04	31,662
00	0,248	3,34E-05	115,933	0,423	3,49E-05	87,103	500	0,315	5,84E-05	143,483	0,474	5,84E-05	79,363
1000	0,260	2,71E-05	243,143	0,435	2,74E-05	174,798	1000	0,335	3,11E-05	306,551	0,494	3,05E-05	158,880
3000	0,291	1,01E-05	798,890	0,466	9,78E-06	525,947	3000	0,371	1,15E-05	1019,403	0,529	1,09E-05	475,325
5000	0,307	6,40E-06	1398,188	0,482	6,06E-06	875,911	5000	0,390	7,23E-06	1781,803	0,546	6,73E-06	789,318
10000	0,330	3,44E-06	2996,594	0,503	3,17E-06	1745,185	10000	0,415	3,85E-06	3800,808	0,570	3,51E-06	1566,278

Tabela D.40: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1% de emulsão (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,149	0,027	0,126	0,367	0,031	0,339	a	0,157	0,038	0,126	0,354	0,048	0,312
b	0,179	-0,821	1,179	0,085	-0,915	1,085	b	0,240	-0,760	1,240	0,136	-0,864	1,136
a	0,178	0,022	0,158	0,363	0,030	0,335	a	0,271	0,034	0,241	0,433	0,042	0,394
b	0,125	-0,875	1,125	0,083	-0,917	1,083	b	0,126	-0,874	1,126	0,097	-0,903	1,097
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,255	2,29E-03	4,324	0,473	2,00E-03	4,406	20	0,322	3,86E-03	5,186	0,533	3,63E-03	4,192
50	0,290	7,24E-04	7,183	0,503	8,39E-04	10,848	50	0,401	1,93E-03	16,157	0,604	1,65E-03	10,408
100	0,316	3,95E-04	22,392	0,533	4,45E-04	21,607	100	0,484	6,10E-04	42,980	0,677	6,59E-04	15,417
200	0,345	2,15E-04	55,563	0,565	2,36E-04	43,466	200	0,528	3,33E-04	93,803	0,724	3,52E-04	34,900
500	0,386	9,66E-05	166,030	0,609	1,02E-04	110,011	500	0,593	1,49E-04	263,200	0,792	1,54E-04	94,280
1000	0,421	5,26E-05	368,830	0,646	5,39E-05	221,928	1000	0,647	8,15E-05	574,430	0,847	8,24E-05	194,165
000	0,483	2,01E-05	1283,216	0,708	1,97E-05	671,113	3000	0,743	3,12E-05	1979,080	0,943	3,06E-05	594,517
5000	0,515	1,29E-05	2284,083	0,739	1,23E-05	1118,853	5000	0,792	2,00E-05	3517,703	0,991	1,93E-05	992,652
10000	0,562	7,02E-06	4988,199	0,783	6,53E-06	2228,872	10000	0,864	1,09E-05	7677,347	1,060	1,03E-05	1976,394

Tabela D.41: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1,5% de emulsão (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,100	0,005	0,096	0,127	0,005	0,123	a	0,104	0,006	0,098	0,132	0,006	0,127
b	0,050	-0,950	1,050	0,038	-0,962	1,038	b	0,054	-0,946	1,054	0,042	-0,958	1,042
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,116	2,89E-04	2,219	0,143	2,71E-04	0,529	20	0,122	3,32E-04	2,318	0,149	3,12E-04	0,550
50	0,122	1,21E-04	5,805	0,148	1,12E-04	1,307	50	0,128	1,40E-04	6,090	0,155	1,30E-04	1,360
100	0,126	6,27E-05	12,017	0,152	5,75E-05	2,586	100	0,133	7,24E-05	12,647	0,160	6,68E-05	2,690
200	0,131	3,24E-05	24,876	0,156	2,95E-05	5,108	200	0,138	3,76E-05	26,264	0,164	3,44E-05	5,312
500	0,137	1,36E-05	65,086	0,161	1,22E-05	12,528	500	0,146	1,58E-05	69,012	0,171	1,43E-05	13,010
1000	0,141	7,02E-06	134,731	0,165	6,28E-06	24,636	1000	0,151	8,21E-06	143,321	0,176	7,35E-06	25,548
3000	0,149	2,47E-06	426,862	0,172	2,18E-06	71,603	3000	0,160	2,90E-06	456,404	0,184	2,57E-06	74,013
5000	0,153	1,52E-06	729,719	0,176	1,34E-06	117,326	5000	0,165	1,79E-06	782,078	0,188	1,57E-06	121,032
10000	0,159	7,88E-07	1510,562	0,181	6,85E-07	228,703	10000	0,171	9,30E-07	1624,175	0,194	8,10E-07	235,151

Tabela D.42: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1,5% de emulsão (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,081	0,015	0,068	0,135	0,017	0,120	a	0,094	0,014	0,082	0,149	0,015	0,136
b	0,189	-0,811	1,189	0,126	-0,874	1,126	b	0,152	-0,848	1,152	0,101	-0,899	1,101
a	0,121	0,006	0,115	0,177	0,006	0,171	a	0,120	0,007	0,113	0,174	0,007	0,167
b	0,048	-0,952	1,048	0,033	-0,967	1,033	b	0,060	-0,940	1,060	0,043	-0,957	1,043
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,142	1,34E-03	2,390	0,197	1,24E-03	1,116	20	0,149	1,13E-03	2,580	0,202	1,02E-03	1,092
50	0,169	6,38E-04	6,674	0,221	5,56E-04	2,782	50	0,171	5,19E-04	7,025	0,222	4,48E-04	2,722
100	0,192	3,63E-04	14,085	0,241	3,03E-04	5,543	100	0,190	2,88E-04	14,785	0,238	2,40E-04	5,432
200	0,156	3,73E-05	29,409	0,210	3,45E-05	11,032	200	0,165	4,92E-05	30,962	0,219	4,71E-05	10,830
500	0,162	1,56E-05	77,260	0,217	1,42E-05	27,352	500	0,174	2,08E-05	81,972	0,227	1,96E-05	26,912
1000	0,168	8,07E-06	160,035	0,222	7,27E-06	54,282	1000	0,181	1,08E-05	171,015	0,234	1,01E-05	53,486
3000	0,177	2,83E-06	506,686	0,230	2,51E-06	160,417	3000	0,194	3,86E-06	548,125	0,246	3,53E-06	158,284
5000	0,181	1,74E-06	865,632	0,234	1,53E-06	265,174	5000	0,200	2,39E-06	941,937	0,251	2,16E-06	261,691
10000	0,188	9,01E-07	1790,131	0,239	7,84E-07	523,755	10000	0,208	1,24E-06	1963,644	0,259	1,11E-06	516,702

Tabela D.43: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1,5% de emulsão (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
									a	0,125	0,017	0,110	0,236	0,018	0,220
a	0,142	0,020	0,125	0,265	0,020	0,246	a	0,151	0,010	0,141	0,258	0,011	0,247		
b	0,137	-0,863	1,137	0,075	-0,925	1,075	b	0,068	-0,932	1,068	0,044	-0,956	1,044		
a	0,183	0,009	0,175	0,298	0,010	0,289	a	0,131	0,012	0,121	0,232	0,013	0,219		
b	0,048	-0,952	1,048	0,032	-0,968	1,032	b	0,088	-0,912	1,088	0,058	-0,942	1,058		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,215	1,47E-03	3,772	0,331	1,24E-03	2,395	20	0,188	1,28E-03	3,306	0,295	1,10E-03	2,186		
50	0,221	2,10E-04	10,266	0,339	2,18E-04	5,932	50	0,197	2,68E-04	9,056	0,306	2,66E-04	5,451		
100	0,228	1,09E-04	21,498	0,346	1,12E-04	11,843	100	0,206	1,41E-04	19,159	0,315	1,37E-04	10,890		
200	0,236	5,62E-05	44,715	0,354	5,71E-05	23,687	200	0,216	7,37E-05	40,342	0,325	7,07E-05	21,745		
500	0,246	2,35E-05	117,196	0,365	2,35E-05	59,257	500	0,230	3,14E-05	107,611	0,338	2,94E-05	54,148		
1000	0,254	1,21E-05	242,543	0,373	1,20E-05	118,554	1000	0,241	1,64E-05	225,801	0,348	1,52E-05	107,782		
3000	0,268	4,26E-06	767,317	0,386	4,15E-06	355,472	3000	0,265	7,73E-06	735,158	0,369	7,15E-06	318,879		
5000	0,275	2,62E-06	1310,575	0,393	2,53E-06	591,966	5000	0,277	4,85E-06	1277,885	0,380	4,42E-06	526,657		
10000	0,284	1,35E-06	2709,502	0,402	1,30E-06	1181,813	10000	0,294	2,58E-06	2710,520	0,396	2,30E-06	1039,150		

Tabela D.44: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1,5% de emulsão (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,132	0,018	0,116	0,306	0,020	0,288	0,125	0,114	0,017	0,099	0,269	0,017	0,252
b	0,135	-0,865	1,135	0,064	-0,936	1,064	0,136	0,147	-0,853	1,147	0,065	-0,935	1,065
a	0,163	0,011	0,153	0,327	0,014	0,314	0,151	0,129	0,013	0,117	0,272	0,016	0,257
b	0,067	-0,933	1,067	0,041	-0,959	1,041	0,068	0,101	-0,899	1,101	0,058	-0,942	1,058
a	0,126	0,013	0,114	0,282	0,018	0,265	0,131	0,096	0,014	0,084	0,217	0,019	0,199
b	0,104	-0,896	1,104	0,063	-0,937	1,063	0,088	0,141	-0,859	1,141	0,090	-0,910	1,090
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,198	1,34E-03	3,486	0,371	1,19E-03	3,485	0,188	0,174	8,80E-04	3,074	0,324	9,41E-04	5,260
50	0,212	2,86E-04	9,695	0,385	3,17E-04	8,636	0,197	0,191	3,86E-04	8,582	0,342	3,97E-04	7,563
100	0,223	1,50E-04	20,596	0,396	1,63E-04	17,284	0,206	0,205	2,07E-04	18,511	0,356	2,07E-04	15,116
200	0,233	7,85E-05	43,440	0,407	8,40E-05	34,672	0,216	0,220	1,11E-04	39,811	0,371	1,08E-04	30,215
00	0,248	3,34E-05	115,933	0,423	3,49E-05	87,103	0,230	0,241	4,88E-05	109,346	0,391	4,54E-05	75,298
1000	0,260	2,71E-05	243,143	0,435	2,74E-05	174,798	0,241	0,259	2,62E-05	234,679	0,407	2,36E-05	149,785
3000	0,291	1,01E-05	798,890	0,466	9,78E-06	525,947	0,265	0,297	1,40E-05	793,243	0,445	1,33E-05	446,148
5000	0,307	6,40E-06	1398,188	0,482	6,06E-06	875,911	0,277	0,319	9,00E-06	1411,656	0,466	8,37E-06	740,126
10000	0,330	3,44E-06	2996,594	0,503	3,17E-06	1745,185	0,294	0,352	4,96E-06	3099,082	0,496	4,45E-06	1464,444

Tabela D.45: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 1,5% de emulsão (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,149	0,027	0,126	0,367	0,031	0,339	a	0,113	0,024	0,094	0,301	0,028	0,274
b	0,179	-0,821	1,179	0,085	-0,915	1,085	b	0,209	-0,791	1,209	0,095	-0,905	1,095
a	0,178	0,022	0,158	0,363	0,030	0,335	a	0,133	0,022	0,115	0,282	0,031	0,254
b	0,125	-0,875	1,125	0,083	-0,917	1,083	b	0,162	-0,838	1,162	0,109	-0,891	1,109
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,255	2,29E-03	4,324	0,473	2,00E-03	4,406	20	0,212	2,21E-03	3,501	0,399	1,89E-03	3,792
50	0,290	7,24E-04	7,183	0,503	8,39E-04	10,848	50	0,256	1,07E-03	10,601	0,435	8,25E-04	9,285
100	0,316	3,95E-04	22,392	0,533	4,45E-04	21,607	100	0,281	4,56E-04	23,992	0,466	5,08E-04	18,437
200	0,345	2,15E-04	55,563	0,565	2,36E-04	43,466	200	0,315	2,55E-04	53,962	0,503	2,74E-04	37,094
500	0,386	9,66E-05	166,030	0,609	1,02E-04	110,011	500	0,365	1,19E-04	156,935	0,556	1,21E-04	93,922
1000	0,421	5,26E-05	368,830	0,646	5,39E-05	221,928	1000	0,409	6,63E-05	351,492	0,599	6,54E-05	189,160
000	0,483	2,01E-05	1283,216	0,708	1,97E-05	671,113	3000	0,489	2,64E-05	1260,750	0,675	2,46E-05	566,727
5000	0,515	1,29E-05	2284,083	0,739	1,23E-05	1118,853	5000	0,531	1,72E-05	2282,972	0,714	1,56E-05	937,039
10000	0,562	7,02E-06	4988,199	0,783	6,53E-06	2228,872	10000	0,594	9,63E-06	5109,609	0,770	8,40E-06	1835,716

Tabela D.46: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,100	0,005	0,096	0,127	0,005	0,123	a	0,062	0,002	0,060	0,081	0,001	0,079
b	0,050	-0,950	1,050	0,038	-0,962	1,038	b	0,029	-0,971	1,029	0,017	-0,983	1,017
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,116	2,89E-04	2,219	0,143	2,71E-04	0,529	20	0,068	9,69E-05	1,315	0,085	7,43E-05	0,356
50	0,122	1,21E-04	5,805	0,148	1,12E-04	1,307	50	0,069	3,98E-05	3,375	0,086	3,02E-05	0,870
100	0,126	6,27E-05	12,017	0,152	5,75E-05	2,586	100	0,071	2,03E-05	6,886	0,087	1,53E-05	1,708
200	0,131	3,24E-05	24,876	0,156	2,95E-05	5,108	200	0,072	1,04E-05	14,048	0,089	7,74E-06	3,349
500	0,137	1,36E-05	65,086	0,161	1,22E-05	12,528	500	0,074	4,25E-06	36,054	0,090	3,14E-06	8,141
1000	0,141	7,02E-06	134,731	0,165	6,28E-06	24,636	1000	0,076	2,17E-06	73,555	0,091	1,59E-06	15,912
3000	0,149	2,47E-06	426,862	0,172	2,18E-06	71,603	3000	0,078	7,46E-07	227,723	0,093	5,41E-07	45,882
5000	0,153	1,52E-06	729,719	0,176	1,34E-06	117,326	5000	0,079	4,54E-07	385,136	0,094	3,27E-07	74,962
10000	0,159	7,88E-07	1510,562	0,181	6,85E-07	228,703	10000	0,081	2,32E-07	785,728	0,095	1,66E-07	145,685

Tabela D.47: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
							a	0,040	0,007	0,034	0,074	0,008	0,067
							b	0,184	-0,816	1,184	0,105	-0,895	1,105
a	0,081	0,015	0,068	0,135	0,017	0,120	a	0,065	0,001	0,064	0,096	0,001	0,095
b	0,189	-0,811	1,189	0,126	-0,874	1,126	b	0,017	-0,983	1,017	0,015	-0,985	1,015
a	0,121	0,006	0,115	0,177	0,006	0,171	a	0,051	0,003	0,048	0,083	0,003	0,080
b	0,048	-0,952	1,048	0,033	-0,967	1,033	b	0,062	-0,938	1,062	0,039	-0,961	1,039
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,142	1,34E-03	2,390	0,197	1,24E-03	1,116	20	0,070	6,45E-04	1,184	0,101	5,33E-04	0,653
50	0,169	6,38E-04	6,674	0,221	5,56E-04	2,782	50	0,070	2,37E-05	3,263	0,102	3,00E-05	1,611
100	0,192	3,63E-04	14,085	0,241	3,03E-04	5,543	100	0,071	1,20E-05	6,774	0,103	1,52E-05	3,220
200	0,156	3,73E-05	29,409	0,210	3,45E-05	11,032	200	0,071	6,06E-06	13,879	0,104	7,65E-06	6,460
500	0,162	1,56E-05	77,260	0,217	1,42E-05	27,352	500	0,074	9,26E-06	35,705	0,106	8,23E-06	26,480
1000	0,168	8,07E-06	160,035	0,222	7,27E-06	54,282	1000	0,078	4,83E-06	73,794	0,109	4,23E-06	42,275
3000	0,177	2,83E-06	506,686	0,230	2,51E-06	160,417	3000	0,083	1,73E-06	235,496	0,114	1,47E-06	104,246
5000	0,181	1,74E-06	865,632	0,234	1,53E-06	265,174	5000	0,086	1,07E-06	404,670	0,116	9,00E-07	165,134
10000	0,188	9,01E-07	1790,131	0,239	7,84E-07	523,755	10000	0,090	5,58E-07	844,267	0,119	4,62E-07	314,701

Tabela D.48: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
							a	0,050	0,007	0,044	0,115	0,007	0,108
							b	0,133	-0,867	1,133	0,062	-0,938	1,062
a	0,142	0,020	0,125	0,265	0,020	0,246	a	0,066	0,003	0,063	0,126	0,003	0,123
b	0,137	-0,863	1,137	0,075	-0,925	1,075	b	0,040	-0,960	1,040	0,027	-0,973	1,027
a	0,183	0,009	0,175	0,298	0,010	0,289	a	0,048	0,004	0,044	0,110	0,005	0,105
b	0,048	-0,952	1,048	0,032	-0,968	1,032	b	0,092	-0,908	1,092	0,048	-0,952	1,048
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,215	1,47E-03	3,772	0,331	1,24E-03	2,395	20	0,075	4,98E-04	1,324	0,138	4,29E-04	1,275
50	0,221	2,10E-04	10,266	0,339	2,18E-04	5,932	50	0,077	6,21E-05	3,597	0,140	7,43E-05	3,147
100	0,228	1,09E-04	21,498	0,346	1,12E-04	11,843	100	0,079	3,19E-05	7,506	0,142	3,78E-05	6,291
200	0,236	5,62E-05	44,715	0,354	5,71E-05	23,687	200	0,081	1,64E-05	15,546	0,145	1,93E-05	12,620
500	0,246	2,35E-05	117,196	0,365	2,35E-05	59,257	500	0,085	1,57E-05	40,524	0,149	1,43E-05	31,696
1000	0,254	1,21E-05	242,543	0,373	1,20E-05	118,554	1000	0,091	8,37E-06	84,708	0,154	7,37E-06	63,256
3000	0,268	4,26E-06	767,317	0,386	4,15E-06	355,472	3000	0,101	3,09E-06	277,744	0,162	2,59E-06	187,408
5000	0,275	2,62E-06	1310,575	0,393	2,53E-06	591,966	5000	0,105	1,94E-06	484,106	0,166	1,59E-06	309,472
10000	0,284	1,35E-06	2709,502	0,402	1,30E-06	1181,813	10000	0,112	1,04E-06	1030,385	0,172	8,23E-07	609,051899

Tabela D.49: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
							a	0,044	0,007	0,038	0,135	0,008	0,127
							b	0,159	-0,841	1,159	0,061	-0,939	1,061
a	0,132	0,018	0,116	0,306	0,020	0,288	a	0,044	0,007	0,038	0,135	0,008	0,127
b	0,135	-0,865	1,135	0,064	-0,936	1,064	b	0,159	-0,841	1,159	0,061	-0,939	1,061
a	0,163	0,011	0,153	0,327	0,014	0,314	a	0,053	0,005	0,049	0,142	0,006	0,137
b	0,067	-0,933	1,067	0,041	-0,959	1,041	b	0,087	-0,913	1,087	0,040	-0,960	1,040
a	0,126	0,013	0,114	0,282	0,018	0,265	a	0,036	0,005	0,031	0,110	0,008	0,102
b	0,104	-0,896	1,104	0,063	-0,937	1,063	b	0,142	-0,858	1,142	0,076	-0,924	1,076
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,198	1,34E-03	3,486	0,371	1,19E-03	3,485	0,188	0,070	5,61E-04	1,216	0,162	4,94E-04	1,834
50	0,212	2,86E-04	9,695	0,385	3,17E-04	8,636	0,197	0,074	1,29E-04	3,371	0,171	1,31E-04	4,576
100	0,223	1,50E-04	20,596	0,396	1,63E-04	17,284	0,206	0,079	6,84E-05	7,211	0,179	6,74E-05	9,151
200	0,233	7,85E-05	43,440	0,407	8,40E-05	34,672	0,216	0,084	3,63E-05	15,367	0,186	3,46E-05	18,294
00	0,248	3,34E-05	115,933	0,423	3,49E-05	87,103	0,230	0,091	1,57E-05	41,672	0,197	1,44E-05	45,627
1000	0,260	2,71E-05	243,143	0,435	2,74E-05	174,798	0,241	0,096	1,36E-05	88,470	0,186	1,41E-05	90,874
3000	0,291	1,01E-05	798,890	0,466	9,78E-06	525,947	0,265	0,112	5,29E-06	298,439	0,202	5,12E-06	270,979
5000	0,307	6,40E-06	1398,188	0,482	6,06E-06	875,911	0,277	0,120	3,41E-06	531,067	0,210	3,19E-06	450,557
10000	0,330	3,44E-06	2996,594	0,503	3,17E-06	1745,185	0,294	0,133	1,88E-06	1166,207	0,221	1,68E-06	895,789

Tabela D.50: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,042	0,008	0,035	0,160		0,008		0,153	b	0,200	-0,800	1,200	0,050
a	0,149	0,027	0,126	0,367	0,031	0,339	a	0,049	0,007	0,043	0,157	0,010	0,148		
b	0,179	-0,821	1,179	0,085	-0,915	1,085	b	0,135	-0,865	1,135	0,062	-0,938	1,062		
a	0,178	0,022	0,158	0,363	0,030	0,335	a	0,033	0,007	0,028	0,116	0,013	0,105		
b	0,125	-0,875	1,125	0,083	-0,917	1,083	b	0,198	-0,802	1,198	0,110	-0,890	1,110		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,255	2,29E-03	4,324	0,473	2,00E-03	4,406	20	0,074	4,98E-04	1,271	0,189	5,86E-04	2,298		
50	0,290	7,24E-04	7,183	0,503	8,39E-04	10,848	50	0,092	3,69E-04	3,646	0,200	2,48E-04	5,781		
100	0,316	3,95E-04	22,392	0,533	4,45E-04	21,607	100	0,092	1,24E-04	8,040	0,209	1,29E-04	11,629		
200	0,345	2,15E-04	55,563	0,565	2,36E-04	43,466	200	0,101	6,80E-05	17,691	0,218	6,75E-05	23,363		
500	0,386	9,66E-05	166,030	0,609	1,02E-04	110,011	500	0,113	4,48E-05	50,106	0,230	5,06E-05	58,507		
1000	0,421	5,26E-05	368,830	0,646	5,39E-05	221,928	1000	0,130	2,57E-05	111,316	0,248	2,73E-05	168,223		
000	0,483	2,01E-05	1283,216	0,708	1,97E-05	671,113	3000	0,161	1,06E-05	407,198	0,280	1,03E-05	396,529		
5000	0,515	1,29E-05	2284,083	0,739	1,23E-05	1118,853	5000	0,179	7,06E-06	748,374	0,296	6,51E-06	619,869		
10000	0,562	7,02E-06	4988,199	0,783	6,53E-06	2228,872	10000	0,205	4,05E-06	1712,862	0,320	3,51E-06	1163,697		

Tabela D.51: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,100	0,005	0,096	0,127		0,005		0,123	b	0,045	-0,955	1,045	0,032
b	0,050	-0,950	1,050	0,038	-0,962	1,038	b	0,045	-0,955	1,045	0,032	-0,968	1,032		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,116	2,89E-04	2,219	0,143	2,71E-04	0,529	20	0,073	1,67E-04	1,402	0,092	1,48E-04	0,379		
50	0,122	1,21E-04	5,805	0,148	1,12E-04	1,307	50	0,076	6,95E-05	3,654	0,095	6,10E-05	0,932		
100	0,126	6,27E-05	12,017	0,152	5,75E-05	2,586	100	0,079	3,59E-05	7,543	0,097	3,12E-05	1,837		
200	0,131	3,24E-05	24,876	0,156	2,95E-05	5,108	200	0,081	1,85E-05	15,568	0,099	1,60E-05	3,614		
500	0,137	1,36E-05	65,086	0,161	1,22E-05	12,528	500	0,085	7,72E-06	40,577	0,102	6,57E-06	8,817		
1000	0,141	7,02E-06	134,731	0,165	6,28E-06	24,636	1000	0,088	3,98E-06	83,752	0,104	3,36E-06	17,269		
3000	0,149	2,47E-06	426,862	0,172	2,18E-06	71,603	3000	0,092	1,40E-06	264,127	0,108	1,16E-06	49,861		
5000	0,153	1,52E-06	729,719	0,176	1,34E-06	117,326	5000	0,094	8,57E-07	450,556	0,110	7,08E-07	81,445		
10000	0,159	7,88E-07	1510,562	0,181	6,85E-07	228,703	10000	0,097	4,42E-07	929,964	0,112	3,62E-07	158,080		

Tabela D.52: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,081	0,015	0,068	0,135	0,017	0,120	a	0,072	0,010	0,063	0,145	0,010	0,136
b	0,189	-0,811	1,189	0,126	-0,874	1,126	b	0,135	-0,865	1,135	0,069	-0,931	1,069
a	0,121	0,006	0,115	0,177	0,006	0,171	a	0,087	0,006	0,081	0,157	0,007	0,151
b	0,048	-0,952	1,048	0,033	-0,967	1,033	b	0,067	-0,933	1,067	0,042	-0,958	1,042
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,142	1,34E-03	2,390	0,197	1,24E-03	1,116	20	0,103	-0,897	1,103	0,066	-0,934	1,066
50	0,169	6,38E-04	6,674	0,221	5,56E-04	2,782	50	Ciclos	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	mm/ciclos	mm*ciclos
100	0,192	3,63E-04	14,085	0,241	3,03E-04	5,543	100	0,108	7,27E-04	1,899	0,178	6,14E-04	1,433
200	0,156	3,73E-05	29,409	0,210	3,45E-05	11,032	200	0,113	1,52E-04	5,208	0,185	1,55E-04	3,576
500	0,162	1,56E-05	77,260	0,217	1,42E-05	27,352	500	0,119	7,99E-05	11,018	0,190	7,95E-05	7,152
1000	0,168	8,07E-06	160,035	0,222	7,27E-06	54,282	1000	0,124	4,19E-05	23,194	0,196	4,09E-05	14,301
3000	0,177	2,83E-06	506,686	0,230	2,51E-06	160,417	3000	0,132	1,78E-05	61,833	0,203	1,70E-05	35,694
5000	0,181	1,74E-06	865,632	0,234	1,53E-06	265,174	5000	0,139	9,33E-06	129,679	0,209	8,76E-06	71,197
10000	0,188	9,01E-07	1790,131	0,239	7,84E-07	523,755	10000	0,152	5,20E-06	416,940	0,222	4,87E-06	212,141

Tabela D.53: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
									a	0,050	0,007	0,044	0,115	0,007	0,108
a	0,142	0,020	0,125	0,265	0,020	0,246	a	0,066	0,003	0,063	0,126	0,003	0,123		
b	0,137	-0,863	1,137	0,075	-0,925	1,075	b	0,040	-0,960	1,040	0,027	-0,973	1,027		
a	0,183	0,009	0,175	0,298	0,010	0,289	a	0,048	0,004	0,044	0,110	0,005	0,105		
b	0,048	-0,952	1,048	0,032	-0,968	1,032	b	0,092	-0,908	1,092	0,048	-0,952	1,048		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,215	1,47E-03	3,772	0,331	1,24E-03	2,395	20	0,075	4,98E-04	1,324	0,138	4,29E-04	1,275		
50	0,221	2,10E-04	10,266	0,339	2,18E-04	5,932	50	0,077	6,21E-05	3,597	0,140	7,43E-05	3,147		
100	0,228	1,09E-04	21,498	0,346	1,12E-04	11,843	100	0,079	3,19E-05	7,506	0,142	3,78E-05	6,291		
200	0,236	5,62E-05	44,715	0,354	5,71E-05	23,687	200	0,081	1,64E-05	15,546	0,145	1,93E-05	12,620		
500	0,246	2,35E-05	117,196	0,365	2,35E-05	59,257	500	0,085	1,57E-05	40,524	0,149	1,43E-05	31,696		
1000	0,254	1,21E-05	242,543	0,373	1,20E-05	118,554	1000	0,091	8,37E-06	84,708	0,154	7,37E-06	63,256		
3000	0,268	4,26E-06	767,317	0,386	4,15E-06	355,472	3000	0,101	3,09E-06	277,744	0,162	2,59E-06	187,408		
5000	0,275	2,62E-06	1310,575	0,393	2,53E-06	591,966	5000	0,105	1,94E-06	484,106	0,166	1,59E-06	309,472		
10000	0,284	1,35E-06	2709,502	0,402	1,30E-06	1181,813	10000	0,112	1,04E-06	1030,385	0,172	8,23E-07	609,051899		

Tabela D.54: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,132	0,018	0,116	0,306	0,020	0,288	a	0,068	0,009	0,060	0,171	0,011	0,161
b	0,135	-0,865	1,135	0,064	-0,936	1,064	b	0,137	-0,863	1,137	0,062	-0,938	1,062
a	0,163	0,011	0,153	0,327	0,014	0,314	a	0,075	0,008	0,068	0,171	0,010	0,161
b	0,067	-0,933	1,067	0,041	-0,959	1,041	b	0,107	-0,893	1,107	0,061	-0,939	1,061
a	0,126	0,013	0,114	0,282	0,018	0,265	a	0,055	0,008	0,048	0,137	0,013	0,125
b	0,104	-0,896	1,104	0,063	-0,937	1,063	b	0,153	-0,847	1,153	0,095	-0,905	1,095
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,198	1,34E-03	3,486	0,371	1,19E-03	3,485	0,188	0,103	7,08E-04	1,815	0,206	6,40E-04	2,073
50	0,212	2,86E-04	9,695	0,385	3,17E-04	8,636	0,197	0,115	2,45E-04	5,112	0,218	2,67E-04	5,139
100	0,223	1,50E-04	20,596	0,396	1,63E-04	17,284	0,206	0,123	1,32E-04	11,081	0,228	1,39E-04	10,293
200	0,233	7,85E-05	43,440	0,407	8,40E-05	34,672	0,216	0,133	7,09E-05	23,936	0,238	7,27E-05	20,653
00	0,248	3,34E-05	115,933	0,423	3,49E-05	87,103	0,230	0,146	3,13E-05	66,101	0,252	3,08E-05	51,801
1000	0,260	2,71E-05	243,143	0,435	2,74E-05	174,798	0,241	0,158	2,42E-05	142,375	0,263	2,49E-05	103,830
3000	0,291	1,01E-05	798,890	0,466	9,78E-06	525,947	0,265	0,187	9,54E-06	492,129	0,292	9,20E-06	313,308
5000	0,307	6,40E-06	1398,188	0,482	6,06E-06	875,911	0,277	0,202	6,19E-06	882,741	0,306	5,80E-06	521,618
10000	0,330	3,44E-06	2996,594	0,503	3,17E-06	1745,185	0,294	0,225	3,44E-06	1956,662	0,327	3,09E-06	1035,643

Tabela D.55: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 30% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
									a	0,068	0,014	0,056	0,199	0,018	0,183
							b	0,212	-0,788	1,212	0,089	-0,911	1,089		
a	0,149	0,027	0,126	0,367	0,031	0,339	a	0,076	0,014	0,065	0,179	0,021	0,161		
b	0,179	-0,821	1,179	0,085	-0,915	1,085	b	0,181	-0,819	1,181	0,116	-0,884	1,116		
a	0,178	0,022	0,158	0,363	0,030	0,335	a	0,066	0,013	0,055	0,145	0,021	0,127		
b	0,125	-0,875	1,125	0,083	-0,917	1,083	b	0,200	-0,800	1,200	0,144	-0,856	1,144		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,255	2,29E-03	4,324	0,473	2,00E-03	4,406	20	0,129	1,37E-03	2,129	0,260	1,16E-03	2,640		
50	0,290	7,24E-04	7,183	0,503	8,39E-04	10,848	50	0,157	6,63E-04	6,463	0,282	5,03E-04	6,475		
100	0,316	3,95E-04	22,392	0,533	4,45E-04	21,607	100	0,176	3,19E-04	14,790	0,307	3,57E-04	12,959		
200	0,345	2,15E-04	55,563	0,565	2,36E-04	43,466	200	0,199	1,81E-04	33,660	0,333	1,94E-04	26,187		
500	0,386	9,66E-05	166,030	0,609	1,02E-04	110,011	500	0,235	8,53E-05	99,537	0,370	8,62E-05	66,445		
1000	0,421	5,26E-05	368,830	0,646	5,39E-05	221,928	1000	0,267	4,84E-05	225,841	0,401	4,67E-05	133,707		
000	0,483	2,01E-05	1283,216	0,708	1,97E-05	671,113	3000	0,326	1,97E-05	827,043	0,456	1,77E-05	398,128		
5000	0,515	1,29E-05	2284,083	0,739	1,23E-05	1118,853	5000	0,361	1,44E-05	1506,648	0,495	1,42E-05	660,648		
10000	0,562	7,02E-06	4988,199	0,783	6,53E-06	2228,872	10000	0,415	8,29E-06	3460,326	0,547	7,86E-06	1322,742		

Tabela D.56: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
a	0,100	0,005	0,096	0,127	0,005	0,123	a	0,054	0,003	0,051	0,068	0,003	0,065
b	0,050	-0,950	1,050	0,038	-0,962	1,038	b	0,062	-0,938	1,062	0,048	-0,952	1,048
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,116	2,89E-04	2,219	0,143	2,71E-04	0,529	20	0,065	2,02E-04	1,227	0,079	1,91E-04	0,278
50	0,122	1,21E-04	5,805	0,148	1,12E-04	1,307	50	0,069	8,56E-05	3,248	0,082	7,97E-05	0,685
100	0,126	6,27E-05	12,017	0,152	5,75E-05	2,586	100	0,072	4,47E-05	6,780	0,085	4,12E-05	1,353
200	0,131	3,24E-05	24,876	0,156	2,95E-05	5,108	200	0,075	2,33E-05	14,157	0,088	2,13E-05	2,664
500	0,137	1,36E-05	65,086	0,161	1,22E-05	12,528	500	0,080	9,87E-06	37,462	0,092	8,91E-06	6,493
1000	0,141	7,02E-06	134,731	0,165	6,28E-06	24,636	1000	0,083	5,15E-06	78,217	0,095	4,60E-06	12,687
3000	0,149	2,47E-06	426,862	0,172	2,18E-06	71,603	3000	0,089	1,84E-06	251,202	0,100	1,62E-06	36,377
5000	0,153	1,52E-06	729,719	0,176	1,34E-06	117,326	5000	0,092	1,14E-06	432,152	0,103	9,95E-07	59,124
10000	0,159	7,88E-07	1510,562	0,181	6,85E-07	228,703	10000	0,096	5,95E-07	902,283	0,107	5,15E-07	113,730

Tabela D.57: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	a	0,037	0,007	0,032	0,064	0,007	0,058
							b	0,175	-0,825	1,175	0,105	-0,895	1,105
a	0,081	0,015	0,068	0,135	0,017	0,120	a	0,052	0,003	0,049	0,078	0,003	0,075
b	0,189	-0,811	1,189	0,126	-0,874	1,126	b	0,060	-0,940	1,060	0,040	-0,960	1,040
a	0,121	0,006	0,115	0,177	0,006	0,171	a	0,038	0,004	0,035	0,059	0,005	0,055
b	0,048	-0,952	1,048	0,033	-0,967	1,033	b	0,101	-0,899	1,101	0,076	-0,924	1,076
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,142	1,34E-03	2,390	0,197	1,24E-03	1,116	20	0,063	5,54E-04	1,074	0,088	4,64E-04	0,522
50	0,169	6,38E-04	6,674	0,221	5,56E-04	2,782	50	0,066	7,83E-05	2,997	0,091	7,26E-05	1,296
100	0,192	3,63E-04	14,085	0,241	3,03E-04	5,543	100	0,068	4,08E-05	6,353	0,094	3,73E-05	2,576
200	0,156	3,73E-05	29,409	0,210	3,45E-05	11,032	200	0,071	2,13E-05	13,349	0,096	1,92E-05	5,111
500	0,162	1,56E-05	77,260	0,217	1,42E-05	27,352	500	0,075	8,98E-06	35,410	0,100	7,96E-06	12,610
1000	0,168	8,07E-06	160,035	0,222	7,27E-06	54,282	1000	0,078	4,68E-06	73,917	0,103	4,09E-06	24,909
3000	0,177	2,83E-06	506,686	0,230	2,51E-06	160,417	3000	0,084	1,67E-06	238,676	0,107	1,42E-06	71,990
5000	0,181	1,74E-06	865,632	0,234	1,53E-06	265,174	5000	0,091	1,83E-06	415,796	0,113	1,72E-06	117,409
10000	0,188	9,01E-07	1790,131	0,239	7,84E-07	523,755	10000	0,097	9,80E-07	887,198	0,119	9,09E-07	229,282

Tabela D.58: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,042	0,006	0,036	0,094		0,007		0,087	b	0,152	-0,848	1,152	0,077
a	0,142	0,020	0,125	0,265	0,020	0,246	a	0,052	0,004	0,048	0,101	0,005	0,096		
b	0,137	-0,863	1,137	0,075	-0,925	1,075	b	0,083	-0,917	1,083	0,049	-0,951	1,049		
a	0,183	0,009	0,175	0,298	0,010	0,289	a	0,028	0,004	0,024	0,075	0,007	0,069		
b	0,048	-0,952	1,048	0,032	-0,968	1,032	b	0,161	-0,839	1,161	0,087	-0,913	1,087		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,215	1,47E-03	3,772	0,331	1,24E-03	2,395	20	0,066	5,03E-04	1,145	0,118	4,53E-04	1,041		
50	0,221	2,10E-04	10,266	0,339	2,18E-04	5,932	50	0,073	1,21E-04	3,292	0,123	1,21E-04	2,573		
100	0,228	1,09E-04	21,498	0,346	1,12E-04	11,843	100	0,077	6,39E-05	7,003	0,127	6,27E-05	3,541		
200	0,236	5,62E-05	44,715	0,354	5,71E-05	23,687	200	0,081	3,39E-05	14,946	0,131	3,24E-05	8,530		
500	0,246	2,35E-05	117,196	0,365	2,35E-05	59,257	500	0,088	1,46E-05	40,487	0,137	1,36E-05	23,418		
1000	0,254	1,21E-05	242,543	0,373	1,20E-05	118,554	1000	0,093	7,74E-06	85,887	0,142	7,03E-06	48,031		
3000	0,268	4,26E-06	767,317	0,386	4,15E-06	355,472	3000	0,100	5,39E-06	282,529	0,150	4,36E-06	144,997		
5000	0,275	2,62E-06	1310,575	0,393	2,53E-06	591,966	5000	0,109	3,51E-06	493,011	0,157	2,73E-06	246,545		
10000	0,284	1,35E-06	2709,502	0,402	1,30E-06	1181,813	10000	0,122	1,96E-06	1073,202	0,167	1,45E-06	478,807		

Tabela D.59: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico				
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
		a	0,132	0,018	0,116	0,306		0,020		0,288	b	0,169	-0,831	1,169	0,069
a	0,132	0,018	0,116	0,306	0,020	0,288	a	0,040	0,007	0,034	0,112	0,008	0,105		
b	0,135	-0,865	1,135	0,064	-0,936	1,064	b	0,169	-0,831	1,169	0,069	-0,931	1,069		
a	0,163	0,011	0,153	0,327	0,014	0,314	a	0,047	0,006	0,042	0,114	0,007	0,107		
b	0,067	-0,933	1,067	0,041	-0,959	1,041	b	0,119	-0,881	1,119	0,065	-0,935	1,065		
a	0,126	0,013	0,114	0,282	0,018	0,265	a	0,035	0,006	0,030	0,087	0,009	0,079		
b	0,104	-0,896	1,104	0,063	-0,937	1,063	b	0,165	-0,835	1,165	0,104	-0,896	1,104		
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos		
20	0,198	1,34E-03	3,486	0,371	1,19E-03	3,485	0,188	0,066	5,57E-04	1,128	0,138	4,76E-04	1,454		
50	0,212	2,86E-04	9,695	0,385	3,17E-04	8,636	0,197	0,075	1,79E-04	3,286	0,147	1,90E-04	3,583		
100	0,223	1,50E-04	20,596	0,396	1,63E-04	17,284	0,206	0,082	9,72E-05	7,228	0,154	9,95E-05	7,152		
200	0,233	7,85E-05	43,440	0,407	8,40E-05	34,672	0,216	0,089	5,28E-05	15,790	0,162	5,21E-05	14,306		
00	0,248	3,34E-05	115,933	0,423	3,49E-05	87,103	0,230	0,099	2,35E-05	44,157	0,172	2,21E-05	35,712		
1000	0,260	2,71E-05	243,143	0,435	2,74E-05	174,798	0,241	0,109	1,80E-05	96,217	0,180	1,87E-05	71,068		
3000	0,291	1,01E-05	798,890	0,466	9,78E-06	525,947	0,265	0,131	7,20E-06	339,514	0,201	6,99E-06	212,303		
5000	0,307	6,40E-06	1398,188	0,482	6,06E-06	875,911	0,277	0,142	4,70E-06	613,605	0,212	4,43E-06	352,863		
10000	0,330	3,44E-06	2996,594	0,503	3,17E-06	1745,185	0,294	0,160	2,64E-06	1372,884	0,228	2,38E-06	699,479		

Tabela D.60: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
							a	0,038	0,010	0,030	0,130	0,013	0,118
							b	0,259	-0,741	1,259	0,103	-0,897	1,103
a	0,149	0,027	0,126	0,367	0,031	0,339	a	0,051	0,009	0,044	0,124	0,014	0,112
b	0,179	-0,821	1,179	0,085	-0,915	1,085	b	0,182	-0,818	1,182	0,116	-0,884	1,116
a	0,178	0,022	0,158	0,363	0,030	0,335	a	0,039	0,008	0,032	0,087	0,014	0,075
b	0,125	-0,875	1,125	0,083	-0,917	1,083	b	0,214	-0,786	1,214	0,159	-0,841	1,159
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,255	2,29E-03	4,324	0,473	2,00E-03	4,406	20	0,082	1,06E-03	1,308	0,177	9,15E-04	1,901
50	0,290	7,24E-04	7,183	0,503	8,39E-04	10,848	50	0,104	5,40E-04	4,145	0,195	4,02E-04	4,675
100	0,316	3,95E-04	22,392	0,533	4,45E-04	21,607	100	0,119	2,17E-04	9,782	0,212	2,45E-04	9,256
200	0,345	2,15E-04	55,563	0,565	2,36E-04	43,466	200	0,135	1,23E-04	22,571	0,230	1,33E-04	18,631
500	0,386	9,66E-05	166,030	0,609	1,02E-04	110,011	500	0,160	5,82E-05	67,259	0,255	5,90E-05	47,180
1000	0,421	5,26E-05	368,830	0,646	5,39E-05	221,928	1000	0,181	3,30E-05	153,009	0,277	3,20E-05	94,915
000	0,483	2,01E-05	1283,216	0,708	1,97E-05	671,113	3000	0,221	1,35E-05	561,585	0,314	1,21E-05	282,810
5000	0,515	1,29E-05	2284,083	0,739	1,23E-05	1118,853	5000	0,243	8,86E-06	1027,558	0,336	1,07E-05	465,346
10000	0,562	7,02E-06	4988,199	0,783	6,53E-06	2228,872	10000	0,283	6,05E-06	2351,201	0,375	5,97E-06	924,583

Tabela D.61: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 1)

Estágio 1	Plástico			Elástico			Estágio 1	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,100	0,005	0,096	0,127	0,005	0,123	a	0,075	0,003	0,072	0,099	0,003	0,096
b	0,050	-0,950	1,050	0,038	-0,962	1,038	b	0,040	-0,960	1,040	0,028	-0,972	1,028
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,116	2,89E-04	2,219	0,143	2,71E-04	0,529	20	0,085	1,72E-04	1,635	0,108	1,53E-04	0,467
50	0,122	1,21E-04	5,805	0,148	1,12E-04	1,307	50	0,088	7,13E-05	4,241	0,111	6,30E-05	1,151
100	0,126	6,27E-05	12,017	0,152	5,75E-05	2,586	100	0,091	3,66E-05	8,722	0,113	3,21E-05	2,276
200	0,131	3,24E-05	24,876	0,156	2,95E-05	5,108	200	0,093	1,88E-05	17,939	0,115	1,64E-05	4,494
500	0,137	1,36E-05	65,086	0,161	1,22E-05	12,528	500	0,097	7,82E-06	46,538	0,118	6,72E-06	11,022
1000	0,141	7,02E-06	134,731	0,165	6,28E-06	24,636	1000	0,100	4,02E-06	95,719	0,121	3,43E-06	21,689
3000	0,149	2,47E-06	426,862	0,172	2,18E-06	71,603	3000	0,104	1,40E-06	300,185	0,125	1,18E-06	63,199
5000	0,153	1,52E-06	729,719	0,176	1,34E-06	117,326	5000	0,106	8,58E-07	510,738	0,126	7,18E-07	103,751
10000	0,159	7,88E-07	1510,562	0,181	6,85E-07	228,703	10000	0,109	4,41E-07	1050,477	0,129	3,66E-07	202,928

Tabela D.62: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 2)

Estágio 2	Plástico			Elástico			Estágio 2	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	a	0,056	0,010	0,048	0,093	0,010	0,084
							b	0,173	-0,827	1,173	0,103	-0,897	1,103
a	0,081	0,015	0,068	0,135	0,017	0,120	a	0,073	0,004	0,069	0,107	0,004	0,103
b	0,189	-0,811	1,189	0,126	-0,874	1,126	b	0,055	-0,945	1,055	0,040	-0,960	1,040
a	0,121	0,006	0,115	0,177	0,006	0,171	a	0,050	0,006	0,045	0,082	0,006	0,076
b	0,048	-0,952	1,048	0,033	-0,967	1,033	b	0,112	-0,888	1,112	0,078	-0,922	1,078
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,142	1,34E-03	2,390	0,197	1,24E-03	1,116	20	0,086	2,35E-04	1,575	0,121	2,42E-04	0,721
50	0,169	6,38E-04	6,674	0,221	5,56E-04	2,782	50	0,091	9,87E-05	4,235	0,125	1,00E-04	1,765
100	0,192	3,63E-04	14,085	0,241	3,03E-04	5,543	100	0,094	5,13E-05	8,860	0,129	5,16E-05	3,509
200	0,156	3,73E-05	29,409	0,210	3,45E-05	11,032	200	0,098	2,66E-05	18,465	0,133	2,65E-05	6,997
500	0,162	1,56E-05	77,260	0,217	1,42E-05	27,352	500	0,103	1,12E-05	48,625	0,138	1,10E-05	17,455
1000	0,168	8,07E-06	160,035	0,222	7,27E-06	54,282	1000	0,107	1,20E-05	101,101	0,142	1,11E-05	34,965
3000	0,177	2,83E-06	506,686	0,230	2,51E-06	160,417	3000	0,121	4,53E-06	332,148	0,154	4,03E-06	101,762
5000	0,181	1,74E-06	865,632	0,234	1,53E-06	265,174	5000	0,129	2,88E-06	582,687	0,161	2,52E-06	166,475
10000	0,188	9,01E-07	1790,131	0,239	7,84E-07	523,755	10000	0,139	1,56E-06	1254,116	0,169	1,33E-06	322,455

Tabela D.63: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 3)

Estágio 3	Plástico			Elástico			Estágio 3	Plástico			Elástico		
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	a	0,065	0,009	0,057	0,130	0,008	0,123
							b	0,136	-0,864	1,136	0,060	-0,940	1,060
a	0,142	0,020	0,125	0,265	0,020	0,246	a	0,077	0,004	0,073	0,137	0,005	0,132
b	0,137	-0,863	1,137	0,075	-0,925	1,075	b	0,055	-0,945	1,055	0,038	-0,962	1,038
a	0,183	0,009	0,175	0,298	0,010	0,289	a	0,048	0,007	0,042	0,101	0,009	0,092
b	0,048	-0,952	1,048	0,032	-0,968	1,032	b	0,142	-0,858	1,142	0,092	-0,908	1,092
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,215	1,47E-03	3,772	0,331	1,24E-03	2,395	20	0,090	2,50E-04	1,673	0,154	2,94E-04	1,261
50	0,221	2,10E-04	10,266	0,339	2,18E-04	5,932	50	0,095	1,05E-04	4,468	0,159	1,22E-04	3,172
100	0,228	1,09E-04	21,498	0,346	1,12E-04	11,843	100	0,099	5,46E-05	9,329	0,163	6,26E-05	6,389
200	0,236	5,62E-05	44,715	0,354	5,71E-05	23,687	200	0,103	2,84E-05	19,430	0,168	3,21E-05	12,877
500	0,246	2,35E-05	117,196	0,365	2,35E-05	59,257	500	0,117	3,30E-05	52,539	0,179	3,32E-05	31,705
1000	0,254	1,21E-05	242,543	0,373	1,20E-05	118,554	1000	0,129	1,82E-05	114,104	0,191	1,77E-05	63,124
3000	0,268	4,26E-06	767,317	0,386	4,15E-06	355,472	3000	0,150	7,09E-06	396,165	0,212	6,53E-06	187,431
5000	0,275	2,62E-06	1310,575	0,393	2,53E-06	591,966	5000	0,161	4,57E-06	708,607	0,222	4,11E-06	309,508
10000	0,284	1,35E-06	2709,502	0,402	1,30E-06	1181,813	10000	0,178	2,52E-06	1561,528	0,237	2,19E-06	607,076

Tabela D.64: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 4)

Estágio 4	Plástico			Elástico			Estágio 4	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
a	0,132	0,018	0,116	0,306	0,020	0,288	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)
b	0,135	-0,865	1,135	0,064	-0,936	1,064							
a	0,163	0,011	0,153	0,327	0,014	0,314	a	0,055	0,007	0,048	0,139	0,009	0,130
b	0,067	-0,933	1,067	0,041	-0,959	1,041	b	0,132	-0,868	1,132	0,065	-0,935	1,065
a	0,126	0,013	0,114	0,282	0,018	0,265	a	0,034	0,007	0,028	0,090	0,013	0,079
b	0,104	-0,896	1,104	0,063	-0,937	1,063	b	0,221	-0,779	1,221	0,145	-0,855	1,145
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,198	1,34E-03	3,486	0,371	1,19E-03	3,485	0,188	0,081	5,37E-04	1,439	0,169	5,54E-04	1,735
50	0,212	2,86E-04	9,695	0,385	3,17E-04	8,636	0,197	0,092	2,42E-04	3,650	0,180	4,59E-04	4,777
100	0,223	1,50E-04	20,596	0,396	1,63E-04	17,284	0,206	0,101	1,33E-04	8,022	0,188	2,54E-04	9,614
200	0,233	7,85E-05	43,440	0,407	8,40E-05	34,672	0,216	0,109	1,21E-04	19,092	0,194	1,40E-04	17,083
00	0,248	3,34E-05	115,933	0,423	3,49E-05	87,103	0,230	0,134	5,92E-05	55,909	0,221	6,41E-05	43,039
1000	0,260	2,71E-05	243,143	0,435	2,74E-05	174,798	0,241	0,156	3,45E-05	128,719	0,245	3,54E-05	87,256
3000	0,291	1,01E-05	798,890	0,466	9,78E-06	525,947	0,265	0,199	1,47E-05	489,030	0,287	1,38E-05	264,798
5000	0,307	6,40E-06	1398,188	0,482	6,06E-06	875,911	0,277	0,222	9,85E-06	911,611	0,309	8,95E-06	439,415
10000	0,330	3,44E-06	2996,594	0,503	3,17E-06	1745,185	0,294	0,259	5,74E-06	2124,104	0,341	4,95E-06	860,5262048

Tabela D.64: Comportamento mecânico do solo controle 2 de do solo + 50% de fresado + 1% de emulsão (ciclo 5)

Estágio 5	Plástico			Elástico			Estágio 5	Plástico			Elástico		
	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)		F(x)	Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)
Função	f(x)	f'(x)	F(x)	f(x)	f'(x)	F(x)	a	0,061	0,014	0,049	0,160	0,020	0,142
							b	0,228	-0,772	1,228	0,127	-0,873	1,127
a	0,149	0,027	0,126	0,367	0,031	0,339	a	0,051	0,013	0,041	0,103	0,021	0,085
b	0,179	-0,821	1,179	0,085	-0,915	1,085	b	0,261	-0,739	1,261	0,204	-0,796	1,204
a	0,178	0,022	0,158	0,363	0,030	0,335	a	0,039	0,008	0,032	0,087	0,014	0,075
b	0,125	-0,875	1,125	0,083	-0,917	1,083	b	0,214	-0,786	1,214	0,159	-0,841	1,159
Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	Ciclos	DP(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos	DT(mm)	mm/ciclos	mm*ciclos
20	0,255	2,29E-03	4,324	0,473	2,00E-03	4,406	20	0,120	1,37E-03	1,958	0,234	1,49E-03	2,189
50	0,290	7,24E-04	7,183	0,503	8,39E-04	10,848	50	0,148	6,76E-04	6,033	0,263	6,70E-04	5,618
100	0,316	3,95E-04	22,392	0,533	4,45E-04	21,607	100	0,174	3,96E-04	14,132	0,287	3,66E-04	11,321
200	0,345	2,15E-04	55,563	0,565	2,36E-04	43,466	200	0,203	2,32E-04	33,107	0,313	2,00E-04	22,502
500	0,386	9,66E-05	166,030	0,609	1,02E-04	110,011	500	0,251	1,14E-04	102,014	0,352	8,98E-05	54,237
1000	0,421	5,26E-05	368,830	0,646	5,39E-05	221,928	1000	0,311	8,11E-05	243,451	0,419	8,54E-05	106,384
000	0,483	2,01E-05	1283,216	0,708	1,97E-05	671,113	3000	0,414	3,60E-05	981,595	0,524	3,56E-05	326,344
5000	0,515	1,29E-05	2284,083	0,739	1,23E-05	1118,853	5000	0,473	2,47E-05	1871,955	0,582	2,37E-05	545,587
10000	0,562	7,02E-06	4988,199	0,783	6,53E-06	2228,872	10000	0,283	6,05E-06	4490,444	0,670	1,37E-05	1075,885

## ANEXO E

```
import pandas as pd
import numpy as np
from scipy.optimize import least_squares
import matplotlib.pyplot as plt

from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

# Função para carregar os dados do Excel
def carregar_dados(excel_file_path):
    data = pd.read_excel(excel_file_path)
    return data

# Função para definir o sistema de equações para resolver P, b, e em
def sistema_equacoes(parametros, ep1, ep2, ep3, N1, N2, N3):
    em, P, b = parametros

    # Verifique se P e b são positivos para evitar problemas de potência negativa
    if P <= 0 or b <= 0:
        return [np.inf, np.inf, np.inf] # Retorne valores grandes para esses casos

    # Equações que precisam ser resolvidas para ep1, ep2 e ep3
    eq1 = ep1 - em * np.exp(-(P / N1) ** b)
    eq2 = ep2 - em * np.exp(-(P / N2) ** b)
    eq3 = ep3 - em * np.exp(-(P / N3) ** b)

    return [eq1, eq2, eq3]

from google.colab import drive
import pandas as pd

# Monte o Google Drive
drive.mount('/content/drive')

# Caminho do arquivo
excel_file_path = '/content/drive/MyDrive/Python/dados_novos_regressao3.xlsx'

# Carregar os dados do arquivo Excel
data = carregar_dados(excel_file_path)

# Valores de N específicos que vamos usar
N1 = 100
N2 = 1000
N3 = 10000

# Extrair os valores correspondentes de ep para N1, N2 e N3
ep1 = data.loc[data['N'] == N1, 'ep'].values[0]
ep2 = data.loc[data['N'] == N2, 'ep'].values[0]
```

```

ep3 = data.loc[data['N'] == N3, 'ep'].values[0]

# Exibir os valores extraídos
print(f"Valores extraídos da tabela: ep1 = {ep1}, ep2 = {ep2}, ep3 = {ep3}")

# Usar least_squares para resolver o sistema com base em ep1, ep2 e ep3
chute_inicial = [0.1, 0.1, 0.1] # Chute inicial básico
resultado = least_squares(sistema_equacoes, chute_inicial, args=(ep1, ep2, ep3, N1, N2, N3),
bounds=([1e-6, 1e-6, 1e-6], [np.inf, np.inf, np.inf]))

# Extrair os parâmetros ajustados do sistema resolvido
em_sol, P_sol, b_sol = resultado.x
print(f"Valor de em: {em_sol}")
print(f"Valor de P: {P_sol}")
print(f"Valor de b: {b_sol}")

# Cálculo do erro médio quadrático (MSE) para o ajuste inicial
ep_preditos_inicial = np.array([em_sol * np.exp(-(P_sol / N) ** b_sol) for N in [N1, N2,
N3]])
ep_observados_inicial = np.array([ep1, ep2, ep3])
mse_inicial = np.mean((ep_observados_inicial - ep_preditos_inicial) ** 2)
print(f"Erro Médio Quadrático (MSE) - Ajuste Inicial: {mse_inicial}")

# Agora usar os valores ajustados de em, P e b como chute inicial
chute_inicial_ajustado = [em_sol, P_sol, b_sol] # Usar os valores calculados

# Segunda Parte: Ajustar o modelo aos dados completos com filtro N > 20

# Função do modelo para prever ep
def modelo(N, em, P, b):
    return em * np.exp(-(P / N) ** b)

# Função para calcular os resíduos (diferença entre observados e previstos)
def residuos(parametros, N, ep_observados):
    em, P, b = parametros
    ep_preditos = modelo(N, em, P, b)
    return ep_observados - ep_preditos

# Filtrar os dados onde N > 20 para ajuste
dados_filtrados = data[data['N'] > 20]
N_filtrado = dados_filtrados['N'].values
ep_observados_filtrado = dados_filtrados['ep'].values

# Ajustar o modelo aos dados filtrados (N > 20) usando least_squares
resultado_ajustado = least_squares(residuos, chute_inicial_ajustado, args=(N_filtrado,
ep_observados_filtrado), bounds=([1e-6, 1e-6, 1e-6], [np.inf, np.inf, np.inf]))

# Extrair os parâmetros ajustados finais
em_ajustado, P_ajustado, b_ajustado = resultado_ajustado.x

```

```

# Exibir os resultados ajustados
print(f"Valor ajustado de em: {em_ajustado}")
print(f"Valor ajustado de P: {P_ajustado}")
print(f"Valor ajustado de b: {b_ajustado}")

# Cálculo do erro médio quadrático (MSE) para o ajuste final
ep_preditos_final = modelo(N_filtrado, em_ajustado, P_ajustado, b_ajustado)
mse_final = np.mean((ep_observados_filtrado - ep_preditos_final) ** 2)
print(f"Erro Médio Quadrático (MSE) - Ajuste Final: {mse_final}")

# Cálculo do R2 considerando apenas os dados filtrados (N > 20)
ss_res = np.sum((ep_observados_filtrado - modelo(N_filtrado, em_ajustado, P_ajustado,
b_ajustado)) ** 2) # Soma dos quadrados dos resíduos
ss_tot = np.sum((ep_observados_filtrado - np.mean(ep_observados_filtrado)) ** 2) # Soma
dos quadrados totais
r_squared = 1 - (ss_res / ss_tot)

print(f"Valor de R2 (N > 20): {r_squared}")

# Prever os valores de ep usando os parâmetros ajustados, para todos os N
ep_preditos_ajustados_todos = modelo(data['N'].values, em_ajustado, P_ajustado, b_ajustado)

# Plotar os dados observados e as previsões ajustadas
plt.figure(figsize=(10, 6))

# Exibir todos os dados observados (N completos)
plt.scatter(data['N'].values, data['ep'].values, color='blue', label='Dados Observados', s=50)

# Exibir as previsões ajustadas para todos os valores de N
plt.plot(data['N'].values, ep_preditos_ajustados_todos, color='red', label='Previsão Ajustada',
linewidth=2)

## Adicionar a equação ajustada na parte inferior direita do gráfico
equacao = f'ep(N) = {em_ajustado:.4f} * exp(-({P_ajustado:.4f} / N) ** {b_ajustado:.4f})'
plt.text(0.95, 0.05, equacao, transform=plt.gca().transAxes, fontsize=12,
verticalalignment='bottom', horizontalalignment='right',
bbox=dict(boxstyle="round,pad=0.3", edgecolor="black", facecolor="white"))

plt.title('Deformação Permanente: Dados Observados vs Previsão Ajustada')
plt.xlabel('N')
plt.ylabel('Deformação Permanente (ep)')
plt.legend()
plt.grid()

plt.show()

```

## ANEXO F

Para acessar os resultados detalhados dos ensaios realizados nesta pesquisa, basta utilizar o QR code ou o link disponibilizado no documento. Esses recursos permitem um acesso rápido e prático aos dados, facilitando a consulta aos resultados obtidos nos experimentos de carregamento multiestágio de solos estabilizados com emulsão asfáltica.



<https://drive.google.com/drive/folders/1jEBw9CKCaaJLhDwKSMzIS3ie2KG8KBiR?usp=sharing>

## APÊNDICE A

O sistema SUCS é baseado na análise granulométrica e nos limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade) do solo, Figura A.1. Ele classifica os solos em grupos principais como pedregulhos (G), areias (S), siltes (M) e argilas (C), além de subgrupos baseados na graduação e plasticidade. Alguns exemplos de símbolos SUCS são: GW (pedregulho bem graduado), SM (areia siltosa), CL (argila de baixa plasticidade), entre outros.

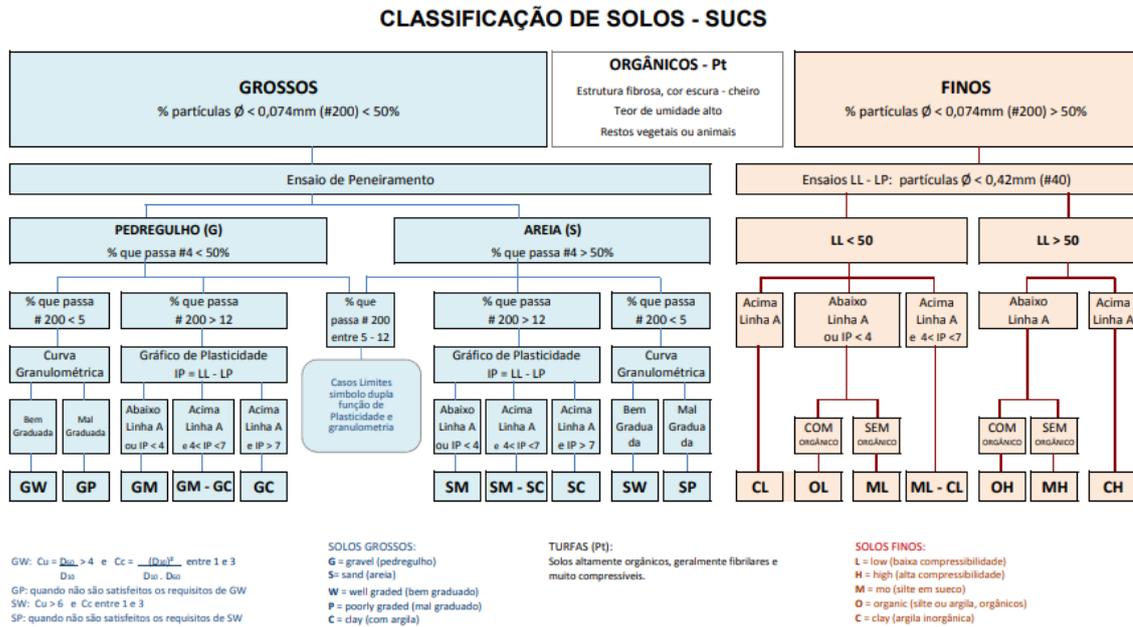


Figura A.1: Classificação SUCS de solos

Fonte: Universidade do Estado de Santa Catarina: Laboratório de Geotecnia e pavimentação

Já o sistema HRB (Highway Research Board) é voltado especificamente para a classificação de solos para fins rodoviários. Ele divide os solos em 7 grupos principais, de A-1 a A-7, com base na granulometria e plasticidade. Os solos classificados de A-1 a A-3 são considerados materiais granulares, enquanto os de A-4 a A-7 são classificados como materiais siltosos e argilosos. Essa classificação, Figura A.1, é importante para determinar a adequabilidade dos solos como material de subleito, base ou sub-base em projetos de rodovias.

**CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS: Sugestão do Highway Research Board-HRB adotada pela AASHTO**

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

**Processo de classificação:** Com os dados de laboratório, iniciar a classificação da esquerda para a direita, por eliminação.

O primeiro grupo da esquerda que satisfizer os dados será o grupo procurado.

**SOLOS A-7:** Se  $IP \leq LL - 30$ , será A-7-5; Se  $IP > LL - 30$ , será A-7-6.

**Índice de Grupo (IG):**  $IG = 0,2 \cdot a + 0,005 \cdot a \cdot c + 0,01 \cdot b \cdot d$

Onde:

p: teor de silte + argila do solo, ou seja, a porcentagem que passa na peneira nº 200.

$a = p - 35$  (se  $p > 75\%$ , adota-se 75 e se  $p < 35\%$ , adota-se 35)  $a$  varia de 0 a 40 e 0,2.  $a \cdot c$  varia de 0 a 8.

$b = p - 15$  (se  $p > 55\%$ , adota-se 55 e se  $p < 15\%$ , adota-se 15)  $b$  varia de 0 a 40 e 0,01.  $b \cdot d$  varia de 0 a 8.

$c = LL - 40$  (se  $LL > 60\%$ , adota-se 60 e se  $LL < 40\%$ , adota-se 40)  $c$  varia de 0 a 20 e 0,005.  $a \cdot c$  varia de 0 a 4.

$d = IP - 10$  (se  $IP > 30$ , adota-se 30 e se  $IP < 10$ , adota-se 10)  $d$  varia de 0 a 20 e 0,01.  $b \cdot d$  varia de 0 a 8.

$IG_{\min.} = 0$   $IG_{\max.} = 20$

IG - o resultado final obtido deve ser um nº inteiro - aproximação para o nº inteiro acima.

Figura A.2: Sistema HRB de classificação de solos

Fonte: Manual e técnicas de pavimentação

Ambos os sistemas de classificação fornecem informações importantes sobre as propriedades físicas e de engenharia dos solos, permitindo sua correta utilização em projetos de infraestrutura e obras de terra.