



COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS GRANULOMETRICAMENTE ESTABILIZADAS COM UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO FINO

Pedro Henrique Paixão Batista

Dissertação de Mestrado 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 Mestre em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva e Sandra Oda

Rio de Janeiro
Março de 2025

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS GRANULOMETRICAMENTE
ESTABILIZADAS COM UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO FINO

Pedro Henrique Paixão Batista

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

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Sandra Oda

Aprovada por:

Prof. Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Profa. Sandra Oda

Prof. Filipe Almeida Corrêa do Nascimento

Profa, Vivian Silveira dos Santos Bardini

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2025

Batista, Pedro Henrique Paixão

Comportamento Mecânico De Misturas
Granulometricamente Estabilizadas Com Um Rejeito De
Minério De Ferro Fino – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE,
2025.

XVI, 142 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva

Sandra Oda

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia de Transportes, 2025.

Referências Bibliográficas: p. 135-142.

1. Rejeito de Minério de Ferro. 2. Pavimentação. 3.
Deformação Permanente. I. Silva, Marcelino Aurélio Vieira
da *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*“Dizem que em algum lugar, parece
que no Brasil, existe um homem feliz”*

Vladimir Mayakovsky

Agradecimentos

Este estudo não teria sido possível sem o apoio de diversas pessoas e instituições que contribuíram para a sua realização seja de forma direta ou indireta, de forma que gostaria de dedicar este espaço para agradecer todo a ajuda que me foi dada.

Agradeço à Mineração Morro do Ipê pela doação e transporte do rejeito de minério de ferro, assim como agradeço também à empresa Petra Agregados e à Usina de Asfalto do Caju pela doação de agregados. Sem este apoio, literalmente não teria como realizar a pesquisa.

Aos meus orientadores, Marcelino e Sandra, por todo o tempo reservado em supervisionar e direcionar o estudo, trazendo novos elementos a serem levados em consideração para a sua concepção, desenvolvimento e revisão.

Aos técnicos do laboratório, em especial o Bento; o Juan e o Gleidson por todo o suporte prestado durante a execução dos ensaios, sendo completamente fundamentais para a execução prática desta pesquisa.

Ao meu pai, minha mãe e minha irmã pela compreensão e apoio dado durante essa jornada, sempre ajudando de alguma maneira indireta no prosseguimento das atividades realizadas.

À CAPES, pelo suporte financeiro oferecido que foi necessário para seguir com este estudo por completo.

A todos as outras presenças de terceiros que de alguma forma contribuíram de alguma maneira em cada pequeno detalhe de cada etapa que constituiu todo esse longo processo.

De coração, muito obrigado por tudo! Sou extremamente grato.

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

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS GRANULOMETRICAMENTE ESTABILIZADAS COM UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO FINO

Pedro Henrique Paixão Batista

Março/2025

Orientadores: Marcelino Aurélio Vieira da Silva e Sandra Oda

Programa: Engenharia de Transportes

Esta dissertação realiza uma análise do comportamento mecânico de diversas misturas com variados teores de um rejeito de minério de ferro fino, com a finalidade de comparar estas misturas e avaliar a viabilidade de reciclagem do rejeito em camadas de base ou sub-base de pavimentos. Para isso, realizou-se diversos ensaios para mensuração de variados parâmetros como o Índice de Suporte Califórnia; o Módulo de Resiliência e as Deformações Permanentes pelo método do multiestágio. O estudo verificou que a adição de maior quantidade de rejeito fino é mais favorecida pelo parâmetro das Deformações Permanentes, sendo possível correlacionar os dados para estimar a quantidade ótima de rejeito a ser incorporada em diferentes cenários e relacionar os resultados com a granulometria e outras características apresentadas pelas misturas estudadas. A pesquisa traz assim maior embasamento para que a reciclagem do rejeito na pavimentação seja validada de um ponto de vista técnico, além do ambiental.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

MECHANICAL BEHAVIOR OF GRANULOMETRICALLY STABILIZED
MIXTURES WITH FINE IRON ORE TAILINGS

Pedro Henrique Paixão Batista

March/2025

Advisor: Marcelino Aurélio Vieira da Silva and Sandra Oda

Department: Transportation Engineering

This dissertation analyzes the mechanical behavior of various mixtures with different contents of fine iron ore tailings, with the aim of comparing these mixtures and assessing the feasibility of recycling the tailings in base or sub-base layers of pavements. To achieve this, several tests were carried out to measure various parameters such as the California Bearing Ratio; the Resilient Modulus and the Permanent Deformation through the multi-stage method. The study found that the addition of a greater quantity of fine tailings is better favored by the Permanent Deformations parameter, being possible to correlate the data to estimate the optimal quantity of tailings to be incorporated in different scenarios and relate the results to the granulometry and other characteristics presented by the mixtures studied. The research provides a better basis for the recycling of tailings in paving to be validated from a technical aspect, in addition to the environmental one.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	V
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivações.....	2
1.2. Objetivos.....	3
1.3. Justificativa.....	4
1.4. Escopo Adotado.....	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Contexto Geral dos Rejeitos de Mineração no Brasil.....	7
2.1.1. Causas e Impactos Socioambientais de Rompimentos de Barragens.....	11
2.1.2. Aplicações de Reuso de Rejeitos.....	15
2.2. Estudos sobre Rejeitos de Mineração.....	18
2.3. Ensaios e Procedimentos.....	27
2.3.1. Aplicações do Método Bailey.....	27
2.3.2. Aplicações de Ensaios de Deformações Permanentes.....	31
2.3.3. Aplicações de Outros Procedimentos.....	36
3. METODOLOGIA ADOTADA	39
3.1. Fase 1 – Plano Experimental.....	40
3.1.1. Obtenção e Preparação dos Materiais.....	41
3.1.2. Ensaio de Granulometria.....	43
3.1.3. Ensaio de Massa Específica.....	43
3.1.4. Ensaio de Limites de Atterberg.....	44
3.1.5. Ensaios de Caracterização Química e Mineralógica.....	45
3.1.6. Classificação MCT.....	46
3.1.7. Método de Dosagem Bailey.....	47
3.2. Fase 2 – Plano Experimental.....	49
3.2.1. Ensaio de Compactação Proctor.....	50
3.2.2. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia.....	52
3.2.3. Ensaio de Módulo de Resiliência.....	54
3.2.4. Ensaio de Deformações Permanentes.....	56

4. RESULTADOS DOS ENSAIOS INICIAIS	60
4.1. Resultados de Caracterização	60
4.1.1. Granulometria	60
4.1.2. Massa Específica dos Grãos e Abrasão	63
4.1.3. Limites de Atterberg	63
4.1.4. Composição Química do Rejeito	65
4.1.5. Análise Mineralógica do Rejeito	66
4.1.6. Classificação MCT do Rejeito	71
4.2. Método de Dosagem Bailey	73
4.2.1. Definição das Composições Graúda e Fina das Misturas	75
4.2.2. Granulometria das Composições e Determinação das Peneiras de Referência	76
4.2.3. Cálculo das Massas Unitárias das Misturas	79
4.2.4. Definição das proporções de cada composição na Mistura	80
4.2.5. Limites de proporções entre os Agregados	83
4.2.6. Avaliações Gerais	84
5. RESULTADOS DOS ENSAIOS PRINCIPAIS	85
5.1. Resultados de Ensaio de Compactação Proctor	85
5.1.1. Misturas CA	85
5.1.2. Misturas FA	88
5.2. Resultados de Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	92
5.3. Resultados de Ensaio de Módulo de Resiliência.....	96
5.3.1. Modelo Simples - Módulo de Resiliência x Tensão Confinante.....	97
5.3.2. Modelo Simples - Módulo de Resiliência x Tensão Desvio	102
5.3.3. Modelo Composto.....	104
5.4. Resultados de Ensaio de Deformação Permanente.....	109
5.4.1. Deformações Permanentes Acumuladas – Misturas CA	110
5.4.2. Deformações Permanentes Acumuladas – Misturas FA.....	116
5.4.3. Análise de <i>Shakedown</i>	122
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	130
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135

Lista de Figuras

Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo de mineração	7
Figura 2 – Áreas de Mineração em Minas Gerais por Década	9
Figura 3 – Principais Reservas Mineraias no Brasil	10
Figura 4 – Método à Montante de Barragem	12
Figura 5 – Método à Jusante de Barragem.....	12
Figura 6 – Imagens de Satélite da Mina no Córrego do Feijão, em Brumadinho.....	13
Figura 7 – Diagrama de Tensões durante um Ensaio Triaxial	32
Figura 8 – Classificação do Comportamento de Shakedown.	34
Figura 9 – Afundamento Plástico em Pavimento	36
Figura 10 – Balanças utilizadas para pesagem de materiais ou de amostras	41
Figura 11 – Estufa utilizada para Secagem de materiais	42
Figura 12 – Modelo do Aparelho de Compactação Mini-MCV.....	46
Figura 13 – Equipamento Mecânico de Compactação	50
Figura 14 – Cilindro Tripartido de 10 cm de diâmetro.....	51
Figura 15 – Cilindro Grande de 15 cm de diâmetro.....	52
Figura 16 – Imersão em água por 4 dias.....	53
Figura 17 – Prensa utilizada para a penetração	53
Figura 18 – Equipamento triaxial para aplicação cíclica de cargas	56
Figura 19 – Corpo de Prova envolto por membrana látex, no equipamento triaxial	56
Figura 20 – Agregados utilizados no Estudo.....	61
Figura 21 – Curvas Granulométricas dos Agregados utilizados.....	61
Figura 22 – Resultados do Ensaio de Limite de Liquidez do rejeito de minério de ferro	64
Figura 23 – Imagem ampliada do Rejeito de Minério de Ferro em 500x.....	66
Figura 24 – Imagem ampliada de um grão de Sílica em 3000x	67
Figura 25 – Difratoograma do grão de Sílica na sua região mais lisa e pura.....	67
Figura 26 – Difratoograma do grão de Sílica na sua região mais irregular	68
Figura 27 – Imagem ampliada de um grão de Hematita em 3000x	69
Figura 28 – Difratoograma do grão de Hematita, em sua região mais regular	69
Figura 29 – Difratoograma de grão indefinido, incrustado na Hematita.....	70
Figura 30 – Grupo de Curvas de Compactação do rejeito de minério de ferro	71
Figura 31 – Definição do parâmetro c'	72
Figura 32 – Classificação MCT do rejeito de minério de ferro.....	73
Figura 33 – Curvas de Compactação das Misturas CA	86

Figura 34 – Curva de Compactação da Mistura 0% CA.....	87
Figura 35 – Curva de Compactação da Mistura 5% CA.....	87
Figura 36 – Curva de Compactação da Mistura 10% CA.....	87
Figura 37 – Curva de Compactação da Mistura 24% CA.....	88
Figura 38 – Curvas de Compactação das Misturas FA.....	89
Figura 39 – Curva de Compactação da Mistura 0% FA.....	90
Figura 40 – Curva de Compactação da Mistura 5% FA.....	90
Figura 41 – Curva de Compactação da Mistura 9% FA.....	90
Figura 42 – Curva de Compactação da Mistura 24% FA.....	91
Figura 43 – Curva de Compactação do Rejeito Puro.....	91
Figura 44 – Resultados de Índice de Suporte Califórnia (%) das misturas CA.....	92
Figura 45 – Resultados de Índice de Suporte Califórnia (%) das misturas FA.....	94
Figura 46 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante para Misturas CA.....	98
Figura 47 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante para Misturas FA.....	100
Figura 48 – MR x Tensão Confinante x Tensão Desvio (MPa) em Misturas CA.....	107
Figura 49 – MR x Tensão Confinante x Tensão Desvio (MPa) em Misturas FA.....	108
Figura 50 – DP Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 0% CA.....	110
Figura 51 – DP Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 5% CA.....	111
Figura 52 – DP Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 10% CA.....	111
Figura 53 – DP Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 24% CA.....	111
Figura 54 – Relação entre DP e proporção de rejeito em misturas CA.....	115
Figura 55 – DP Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 0% FA.....	116
Figura 56 – DP Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 5% FA.....	117
Figura 57 – DP Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 9% FA.....	117
Figura 58 – DP Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 24% FA.....	118
Figura 59 – Relação entre DP e proporção de rejeito em misturas FA.....	121

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Exemplos de Impactos de Rompimento de Barragens de Rejeitos.....	14
Tabela 2 – Aplicações de Rejeitos de Minério de Ferro na Pavimentação	16
Tabela 3 – Resumo da Metodologia Adotada.....	39
Tabela 4 – Plano Experimental da Fase 1	40
Tabela 5 – Plano Experimental da Fase 2	49
Tabela 6 – Pares de Tensão utilizados no ensaio de Módulo de Resiliência.....	55
Tabela 7 – Pares de Tensão utilizados no ensaio de DP no Método do Multiestágio.	59
Tabela 8 – Coeficientes de Uniformidade e de Curvatura calculados.....	61
Tabela 9 – Divisão Granulométrica dos Materiais obtidos para o estudo.....	62
Tabela 10 – Massa Específica dos grãos utilizados em ensaio.....	63
Tabela 11 – Valores de LP e IP calculado para o Rejeito de Minério.....	64
Tabela 12 – Substâncias presentes na composição Química do Rejeito em %	65
Tabela 13 – Parâmetros obtidos no ensaio para o rejeito e Resultado MCT	72
Tabela 14 – Materiais utilizados na Dosagem pelo Método Bailey.....	75
Tabela 15 – Faixas Granulométricas das Composições da Mistura CA	76
Tabela 16 – Faixas Granulométricas das Composições da Mistura FA	77
Tabela 17 – Parâmetros de Referência para as Peneiras de Controle.....	78
Tabela 18 – Valores de Massa Unitária	79
Tabela 19 – Volume de Vazios (Vv) formado entre os Agregados da Composição A	80
Tabela 20 – Valores de Massa Unitária Total (MU total).....	80
Tabela 21 – Proporções corrigidas de cada composição.....	81
Tabela 22 – Total de Rejeito recomendado pelo Método Bailey.....	81
Tabela 23 – Proporção final de materiais calculada pelo Método Bailey.....	82
Tabela 24 – Faixas Granulométricas das Misturas-base.....	82
Tabela 25 – Proporções granulométricas e Limites estabelecidos.....	84
Tabela 26 – Resumo dos Resultados de Ensaio de Compactação para misturas CA.....	85
Tabela 27 – Resumo dos Resultados de Ensaio de Compactação para misturas FA.....	88
Tabela 28 – Resultados de Expansão para as Misturas.....	95
Tabela 29 – Equações das curvas para modelagem simples de MR (Misturas CA).	99
Tabela 30 – Equações das curvas para modelagem simples de MR (Misturas FA).....	100
Tabela 31 – Equações das curvas em função da tensão desvio (Misturas CA)	102
Tabela 32 – Equações das curvas em função da tensão desvio (Misturas FA)	103
Tabela 33 – Coeficientes de Regressão para o Modelo Composto (Misturas CA).....	105

Tabela 34 – DP Acumuladas ao final dos estágios em Misturas CA	114
Tabela 35 – Estimativa da proporção de rejeito ótimo pela DP em misturas CA.....	115
Tabela 36 – DP Acumuladas ao final dos estágios em Misturas FA.....	120
Tabela 37 – Estimativa da proporção de rejeito ótimo pela DP em misturas FA	121
Tabela 38 – Análise de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 0% CA	124
Tabela 39 – Análise de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 5% CA	124
Tabela 40 – Análise de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 10% CA	125
Tabela 41 – Análise de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 24% CA	125
Tabela 42 – Análise de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 0% FA	127
Tabela 43 – Análise de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 5% FA	127
Tabela 44 – Análise de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 9% FA	128
Tabela 45 – Análise de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 24% FA.....	128

Lista de Símbolos

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

Al₂O₃ – Óxido de Alumínio

ANM - Agência Nacional de Mineração

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

c' – Coeficiente de Argilosidade

CA – Mistura Estabilizada Granulometricamente com Predominância de Britas

Cc – Coeficiente de Curvatura

CI – Colapso Incremental

Cu – Coeficiente de Uniformidade

Composição A – Fração mais Graúda da Mistura

Composição B – Fração mais Fina da Mistura

cm – Centímetros

CUW – Massa Unitária Específica

d' – Coeficiente Auxiliar para cálculo de e'

D10 – Diâmetro da Partícula correspondente a 10% na Curva Granulométrica

D30 – Diâmetro da Partícula correspondente a 30% na Curva Granulométrica

D60 – Diâmetro da Partícula correspondente a 60% na Curva Granulométrica

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DP - Deformação Permanente / Deformações Permanentes

e' – Índice de Laterização

F - Fluência

FA – Mistura Estabilizada Granulometricamente com Predominância de Areias

Fator E' – Proporção de CUW em relação a RUW

Fe₂O₃ – Óxido Férnico

FRX – Fluorescência de Raios-X

g – Gramas

Gsb – Massa Específica Aparente dos Grãos

h – Horas

HRB – *Highway Research Board*

HS – Peneira Média

IP – Índice de Plasticidade

ISC - Índice de Suporte Califórnia

k1, k2, k3 – Coeficientes de Regressão do Módulo de Resiliência

kg – Quilogramas

kg/m³ - Quilogramas por Metro Cúbico

LL – Limite de Liquidez

Lo – Comprimento Inicial do Corpo de Prova
LP – Limite de Plasticidade
LUW – Massa Unitária Solta
LVDT – *Linear Variable Differential Transformers*
MCT - Miniatura, Compactado, Tropical
MCV – *Moisture Condition Value*
MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura
mm – Milímetros
MnO – Óxido de Manganês II
MPa - Megapascal
MR - Módulo de Resiliência
N – Número de Ciclos de Aplicação de Carga
NBR – Normativa Brasileira
NMAS – Tamanho Nominal Máximo
NS' – Solo Não-Laterítico e Siltoso
OSM – *Opposite Sized Material*
OSMop – OSM da Composição Oposta
Pc – Proporção Corrigida de CUW
PCS – Peneira de Controle Primário
Pi – Proporção Inicial de CUW
po – Pressão Atmosférica
R² - Coeficiente Estatístico de Determinação
RUW – Massa Unitária Compactada
S - *Shakedown*
SCS – Peneira de Controle Secundário
SiO₂ – Dióxido de Silício
SO₃ – Óxido Sulfúrico
SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos
TCS – Peneira de Controle Terciário
Tm₂O₃ – Óxido de Túlio III
Vv – Volume de Vazios
ZnO – Óxido de Zinco
ZrO₂ – Óxido de Zircônio
δ3000 – Comprimento da Amostra no instante da aplicação do Ciclo N=3000
δ5000 – Comprimento da Amostra no instante da aplicação do Ciclo N=5000
ε3000 – Deformação no instante da aplicação do Ciclo N=3000
ε5000 – Deformação no instante da aplicação do Ciclo N=5000
εp – Deformação Permanente Específica
σd – Tensão Desvio

σ_1 – Tensão Principal

σ_3 ou T_c – Tensão Confinante

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ - Coeficientes de Regressão da Deformação Permanente

%Ff – Proporção Fina dos Grãos Finos da Mistura Final

%Fg - Proporção Graúda dos Grãos Finos da Mistura Final

%G - Proporção Graúda da Mistura Final

1. Introdução

Os rejeitos de mineração são definidos como os resíduos que resultam da extração e beneficiamento de minérios durante o processo de exploração para obtenção destes minérios para comercialização. Assim, o rejeito é o material resultante desta atividade e não possui por si só uma utilidade econômica, representando basicamente o material que sobra e que precisa ser descartado (REN *et al.*, 2024).

Essa necessidade de disposição do material faz com que eles sejam frequentemente armazenados em barragens de contenção, por ser uma prática simples e de baixo custo. No entanto, o acúmulo do material em excesso sem fiscalização pode também estimular o rompimento destas estruturas, com o potencial de causar grandes desastres em nível ambiental e social (GUIMARÃES, 2018).

Neste sentido, é necessário refletir sobre soluções alternativas para o destino de rejeitos de minério. Tais soluções devem necessariamente buscar um destino distinto para que uma grande quantidade de rejeito seja aproveitada sem causar impactos negativos para o meio ambiente. A partir daí surge a ideia de reaproveitar os rejeitos como material de camadas de base ou sub-base na pavimentação, pois é uma solução que oferece a possibilidade de estender o aproveitamento do material por diversas vias de longa extensão, havendo espaço físico adequado para a reciclagem.

Esta é uma solução já testada na prática, com resultados bons obtidos em testes executados com a parceria da empresa Samarco na cidade de Mariana (MG), com relatos de que é uma técnica que apresenta baixo custo pelo fato de o rejeito não possuir valor comercial, mas que também apresentou bons níveis de resistência e durabilidade que acabam por diminuir a necessidade de manutenção (SAMARCO, 2020). A empresa utilizou dois tipos de rejeitos em seus testes, um arenoso com menor proporção de óxido de ferro e a lama caracterizada por ser um rejeito mais fino misturada com água e que possui maior concentração de óxidos de ferro.

A análise deste tipo de solução é algo que esta dissertação se propõe a avaliar mais profundamente por meio de um rejeito de minério de ferro fino, verificando-se o quanto este material é adequado para a pavimentação sobre um ponto de vista técnico pois é importante que o rejeito contribua ou seja irrelevante em comparação com

materiais mais tradicionais de camadas de pavimentação. Assim, o desempenho da estrutura é beneficiado, ou ao menos não é afetado pelo uso do rejeito.

1.1 Motivação

A justificativa para o aproveitamento do rejeito parte de um ponto de vista ambiental, mas ela por si só não é suficiente como argumento para a reciclagem pois não se relaciona com o impacto técnico do uso de rejeito, que é um material que pode ser bastante heterogêneo. Rejeitos podem apresentar distintas granulometrias, composições químicas, origens e todos estes fatores em conjunto influenciam de maneiras diferentes na resposta do material quando submetido às cargas de tráfego. O que dificulta uma padronização única da resposta deste material, boas experiências com um tipo de rejeito representam um caso específico que não pode ser generalizado.

Ao mesmo tempo, existem diferentes formas de se caracterizar o que seria um bom desempenho técnico dependendo do parâmetro específico que é adotado para realizar este julgamento. Afinal, resistência à compressão é uma característica distinta de um índice de resistência à penetração, assim como módulo de resiliência é uma propriedade distinta de resistência às deformações permanentes. Apesar de provável a existência de uma correlação entre estes conceitos, as diferenças entre eles sugerem que conclusões distintas podem ser tomadas a depender do parâmetro que é adotado.

Assim, surge a motivação de se avaliar de uma forma integrada - considerando variados parâmetros em conjunto - um rejeito de minério que tenha suas características bem definidas, como forma de se retirar conclusões para este rejeito em específico. O que possibilitaria a comparação entre os distintos parâmetros para determinar e quantificar qual deles seria mais afetado ou mesmo beneficiado com a adição de rejeito nas camadas inferiores de pavimentos.

Dessa forma, seria possível obter novas informações sobre o aproveitamento de rejeito de minério de ferro na pavimentação de forma a estimular o uso dessa prática, a depender dos resultados obtidos, o que poderia contribuir para a redução dos riscos ambientais trazidos pela disposição incorreta do rejeito, de forma que estes fossem realocados para um destino distinto. Uma maneira de estimular este uso é por meio do oferecimento de uma justificativa técnica para a utilização do material pois um argumento apenas ambiental pode não ser suficiente para que esse estímulo efetivamente ocorra na prática, o que motiva verificar se essa justificativa existiria.

1.2 Objetivos

Baseando-se nas motivações apresentadas, esta pesquisa tem como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica do aproveitamento de um rejeito de minério de ferro em misturas estabilizadas de agregados, para que essa reciclagem do rejeito tenha um embasamento para além do ambiental, de forma a estimular esse aproveitamento.

Para isso, diferentes objetivos específicos foram traçados para que se alcance este objetivo geral. Optou-se por executar uma análise comparativa entre diversos cenários de aplicação de misturas contendo rejeito como material de pavimentação, como forma de se estabelecer as melhores condições possíveis para uso do material.

Ao se compreender qual parâmetro técnico seria mais otimizado por meio da comparação entre variáveis para diferentes misturas voltadas para base ou sub-base de pavimentos, é possível retirar conclusões sobre a real contribuição do rejeito utilizado que poderia talvez oferecer uma justificativa técnica para a sua adoção. Basicamente, é um objetivo que tem como base poder provar e especificar a viabilidade técnica do uso do rejeito, que justifique o seu uso e determinar as condições e parâmetros mais favoráveis para isso.

Com essa especificação, seria possível compreender em que cenários práticos a adoção do material seria mais ou menos viável e favorável, a depender dos objetivos técnicos a serem alcançados e pelos diferentes teores “ótimos” de rejeitos atingidos dentre os variados ensaios realizados. Isso permite comparar os parâmetros avaliados, para entender como a adição de rejeito afeta especificamente cada um destes. Ensaios como de Índice de Suporte Califórnia; Módulo de Resiliência e Deformações Permanentes foram os principais parâmetros escolhidos, de forma a favorecer a realização de uma avaliação ampla e integrada.

Outros objetivos específicos foram traçados para que fosse atingido o objetivo geral. O primeiro destes foi adotar métodos para maximizar o desempenho das misturas adotadas como forma de verificar os resultados de maior desempenho mecânico possíveis que poderiam ser obtidos com o material específico utilizado. Isso se dá por meio de diferentes estratégias, como por exemplo minimizar o espaço de vazios dentro da mistura como forma de garantia de obtenção de uma mistura mais compacta.

Assim, pode-se ter uma medição dos resultados máximos que podem ser obtidos caso se adote os materiais obtidos, incluindo o rejeito, dentro de diferentes tipos de misturas que foram determinadas ao longo da pesquisa, cada qual com características distintas entre si

em relação à granulometria, como forma de avaliar o impacto da interação do rejeito fino com granulometrias mais graúdas e se a influência dessa interação seria significativa.

Para tudo isso ser possível, também é adotado o objetivo específico de analisar e estudar o rejeito utilizado mais a fundo, como maneira de compreender suas características específicas e dessa forma compreender melhor que tipo de influência este material necessariamente pode trazer se utilizado em misturas estabilizadas de agregados e como isto pode afetar os resultados dos ensaios executados. Executar procedimentos de caracterização foram o principal meio para este objetivo.

Ao final, em posse de todos estes dados, é possível alcançar o objetivo principal traçado, através da comparação e análise dos resultados para retirada de conclusões. Somente então pode-se estipular possíveis caminhos futuros a serem seguidos com base específica nas conclusões a serem retiradas, a depender da viabilidade verificada para o rejeito, que deve ser explicitada.

1.3 Justificativa

Dentre todos os estudos consultados para essa dissertação que eram voltados para o uso de rejeito de minério de ferro, poucos foram realizados primariamente sob o ponto de vista de estabilização granulométrica pois frequentemente se fez a opção pela realização de estabilização química com teores de cimento para a formação de misturas de solo-cimento. Além disso, a maioria dos estudos voltados para este tema de rejeitos se concentra em um parâmetro apenas sendo avaliado, com ensaios de deformação permanente em especial não sendo comuns de serem realizados, muitos se concentrando mais na realização de ensaios de Compressão Simples ou Índice de Suporte Califórnia.

Nesse sentido, a pesquisa se justifica por apresentar um olhar mais específico sobre o tema, voltando-se também para avaliar possíveis correlações entre os dados obtidos ao final, com a determinação de uma quantidade ótima de rejeito para as misturas estipuladas ao longo da pesquisa, algo que no geral não é avaliado por meio da correlação entre os dados. Uma hipótese adotada por este estudo é que essa quantidade ótima de rejeito talvez possa variar de acordo com o parâmetro técnico adotado, razão pela qual é justamente uma análise integrada dos resultados que possibilita comparar estes parâmetros entre si e como estes podem ser influenciados pelo material de forma distinta.

A relevância científica também se dá pelo fato de ao longo da pesquisa, se avaliarem metodologias alternativas para a avaliação e comparação dos resultados, de forma que

conclusões específicas podem ser retiradas sobre as próprias metodologias em si. Por exemplo, se adotou o método do multiestágio para os ensaios de deformações permanentes ao invés do método do estágio único previsto por DNIT 179 (2018b), de maneira que a correlação entre os dados ao final pode oferecer uma melhor visão do quão apropriados e eficazes estes métodos alternativos podem vir a ser em comparação com metodologias tradicionais de ensaios. Isso pode ser feito por meio da confirmação de uma correlação de dados adequada.

1.4 Escopo Adotado

Esta dissertação foi dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo contém uma introdução básica sobre o tema da pesquisa, sendo apresentado o contexto na qual ela se encontra inserida assim como os argumentos e objetivos para a realização do estudo.

O segundo capítulo apresenta as principais referências bibliográficas consultadas para se estabelecer a base deste estudo, separadas entre si por conta da dificuldade em encontrar estudos que realizam os mesmos procedimentos específicos que esta dissertação se propõe a realizar para misturas contendo Rejeitos de Minério de Ferro. São avaliadas as referências em que se foram utilizados rejeitos de minério no geral, com maior foco nos rejeitos de minério de ferro. Também são apresentadas referências focadas nos ensaios de Módulo de Resiliência (MR) e Deformação Permanente (DP) que esta pesquisa se propõe a executar, incluindo o Método do Multiestágio para os ensaios de DP, para o qual as referências existentes são mais escassas.

O terceiro capítulo descreve o processo metodológico geral seguido, sendo apresentadas as normativas utilizadas como base na realização dos procedimentos e o passo a passo organizado e ordenado de cada etapa prática executada para a coleta de dados.

Em seguida, o quarto capítulo apresenta todos os resultados referentes a ensaios iniciais, voltados no geral para a caracterização dos materiais e sua dosagem para formação de misturas. Já o quinto capítulo efetivamente analisa o resultado do comportamento mecânico das misturas por meio dos ensaios principais. Como nestes capítulos se encontra o aspecto central da pesquisa, eles são divididos em diversos subcapítulos de acordo com o ensaio que foi executado.

Por fim, o sexto e último capítulo destaca as principais conclusões sobre as análises retiradas do estudo, além de apontar possíveis caminhos a serem seguidos para complementar ou desenvolver a pesquisa mais a fundo no futuro.

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo possui a intenção de expandir a base de conhecimento sobre estudos realizados envolvendo o uso de rejeitos de minério no geral, com maior foco nos rejeitos de minério de ferro, objeto de estudo desta dissertação. Mas também foram utilizadas referências voltadas para procedimentos de ensaios que se pretendem realizar ao longo desta pesquisa, independentemente de o estudo ter avaliado outros materiais que não sejam rejeitos de minério pois para estas referências especificamente buscou-se entender experiências que validassem a execução destes procedimentos.

O primeiro subtópico faz uma breve revisão introdutória sobre o contexto dos Rejeitos de Minério no Brasil, com subcapítulos voltados para os impactos ambientais associados a este material e as diferentes experiências de aplicação destes materiais de uma forma geral, explorando como se pensar em reaproveitar este material em camadas de pavimentos ou outras finalidades. A função é apresentar o que é um rejeito de minério de ferro e apresentar informações que sustentam a motivação para realizar a pesquisa

Já o segundo subtópico possui a função de oferecer informações mais específicas sobre o comportamento mecânico dos Rejeitos de Minério de Ferro e avaliar o estado atual dos estudos realizados sobre o tema, com um foco em especial em análises semelhantes ao objetivo desta pesquisa. Como se trata de um tema muito específico e não existem tantos estudos focados no uso de rejeito de minério de ferro da forma como se pretende utilizar, no geral algumas referências focam em pontos distintos do que se avalia neste estudo. Por exemplo, foram encontrados mais estudos em que se avaliou misturas de solo-cimento contendo rejeito pois o cimento funciona como bom estabilizante químico. Ainda que nesse estudo não sejam usados materiais como cimento ou cal, permitiu-se ampliar o leque de avaliação para compreensão do estado atual das pesquisas sobre o tema.

Por fim, o terceiro subtópico apresenta diversos estudos realizados nos quais não necessariamente se utilizou rejeito de minério, mas que foram importantes por oferecerem análises complementares ao objetivo do estudo descrito por se relacionarem com conceitos ou com procedimentos que foram executados. Isso foi necessário por não haver muitos estudos contendo procedimentos específicos, como por exemplo o de deformações permanentes pelo método do multiestágio ou a dosagem pelo Método Bailey, nos quais se realizou uma análise sobre o rejeito de minério de ferro, sendo importante para estes procedimentos obter um conhecimento próprio mais específico.

Foi dado maior destaque neste último subtópico para as experiências com ensaios de deformações permanentes pelo método do multiestágio, assim como utilizações do Método Bailey de dosagem por conterem especificidades que diferenciam este estudo, pelo fato de não serem procedimentos tão convencionais de serem executados pelo que se observou durante a pesquisa. Ainda assim, separou-se alguns estudos adicionais relacionados a ensaios que são mais comuns e que não se diferenciam do que é previsto em normativas brasileiras, como o ensaio de Módulo de Resiliência, de Índice de Suporte Califórnia e do ensaio MCT para determinar se um solo é laterítico.

2.1 Contexto Geral dos Rejeitos de Mineração no Brasil

A resolução ANM nº 85 (BRASIL, 2021) estabelece a diferença entre os conceitos de rejeitos de minério e estéreis de acordo com o momento que o material é descartado. Os materiais descartados já durante a operação de lavra sem a necessidade de ser processado pela etapa de beneficiamento na mineração são chamados de estéreis. Esse descarte antes do beneficiamento ocorre porque estes materiais não são mineralizados ou então não possuem níveis de mineração suficientemente altos de forma que sejam economicamente interessantes. O estéril é geralmente obtido por meio de procedimentos mais simples como escavação ou explosão durante o decapeamento de minas (SILVA *et al.*, 2012).

Já os rejeitos de minério se diferenciam por serem o material que resulta durante ou após o beneficiamento, ou seja, a separação e extração dos minerais explorados pela atividade econômica dos rejeitos sem valor comercial. A etapa de beneficiamento basicamente consiste na britagem e moagem do material, seguida da separação das partículas por tamanho e enfim a concentração e extração do minério – o que pode ocorrer por diferentes métodos, como flotação – de forma que diferentemente dos estéreis, o rejeito é um material que passa por esse processo por completo ou parcialmente, de maneira que possuiu contato com substâncias químicas aplicadas durante o beneficiamento para a extração do minério, fazendo com que o rejeito tenha maior potencial de ser contaminante ou tóxico, fazendo com que sua disposição traga maiores riscos.

A Figura 1 apresenta o fluxograma do processo de mineração, desde o momento de obtenção do material na lavra. O material que não é aproveitado é considerado como estéril, enquanto o minério bruto passa pelo processo de beneficiamento. O minério resultante desse procedimento passa por uma atividade de espessamento e filtração para resultar no produto final que é comercializado, enquanto o rejeito resultante do

beneficiamento que se separou do minério é destinado no geral para barragens por não possuir valor comercial (MELKI, 2021).



Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo de mineração (Adaptado de MELKI, 2021)

Dentre os resíduos sólidos resultantes da atividade de mineração em Minas Gerais durante 2008 e 2009, SILVA *et al.* (2012) descreve que aproximadamente 75% dos resíduos eram estéreis e 25% eram rejeito em peso. Considerando-se que a granulometria do rejeito tende a ser bem menor em comparação com estéreis, que são materiais que ocupam grandes volumes, é uma quantidade bem significativa de rejeito que é produzida durante a atividade de mineração.

Além disso, a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010) caracteriza rejeitos e resíduos sólidos. Rejeitos são explicados como resíduos sólidos que não apresentam economicamente uma função interessante de forma que não existe uma finalidade para eles que não seja a disposição final de uma forma correta para o meio ambiente. Enquanto resíduos sólidos possuem um significado mais generalizado, são um material que é descartado, mas que não necessariamente não terá uma outra finalidade, podendo ser reaproveitado como matéria-prima de algum novo procedimento por exemplo.

Segundo estas caracterizações apresentadas, o material obtido para estudo desta pesquisa é de fato mais bem definido como rejeito, por se referir ao que resulta do processo de beneficiamento e que na prática chegaram como um material pastoso que não possui uma finalidade conhecida de aproveitamento que não seja a disposição final. Se trata de um resíduo sólido específico, caracterizado como rejeito.

Além disso, segundo VALE (2024) na prática também se especifica que os rejeitos de mineração são compostos pelo minério, água e areia e não é um material que é tóxico, corrosivo ou inflamável. São essas características que inclusive permitem a disposição do

material em barragens de contenção pelas mineradoras, por oferecer uma alternativa de armazenamento efetivamente viável para o rejeito.

Afinal, se os rejeitos apresentassem tais características, poderiam danificar os materiais de construção da estrutura da barragem. Embora a definição da empresa não deva ser interpretada tão restritiva na definição de rejeitos, é interessante notar que para a organização, os rejeitos são naturalmente tratados por um ponto de vista de serem materiais predominantemente utilizados em barragens de contenção.

A mineração é uma atividade econômica baseada na extração que tem sua origem no Brasil desde a era colonial, impulsionada em especial pela revolução industrial. Ainda assim, ela se expandiu de forma ainda mais significativa em décadas mais recentes, com cada vez mais territórios sendo destinados para esta prática, o que resulta em uma maior quantidade de rejeito de minério sendo produzido e assim o risco de acidentes por conta da má disposição deste material aumenta (REZENDE, 2016).

O estado de Minas Gerais foi desde o início da formação do Brasil um local voltado para a realização da mineração, algo evidenciado pelo próprio nome do estado pois foi muito buscado para a exploração de Ouro no passado. No entanto, outros minérios passaram a receber maior atenção no local e a partir da década de 1980 pode-se notar um aumento cada vez mais expressivo das áreas voltadas para a mineração, conforme indicado pela Figura 2. O que evidencia o quão mais críticos os riscos resultantes se tornam.

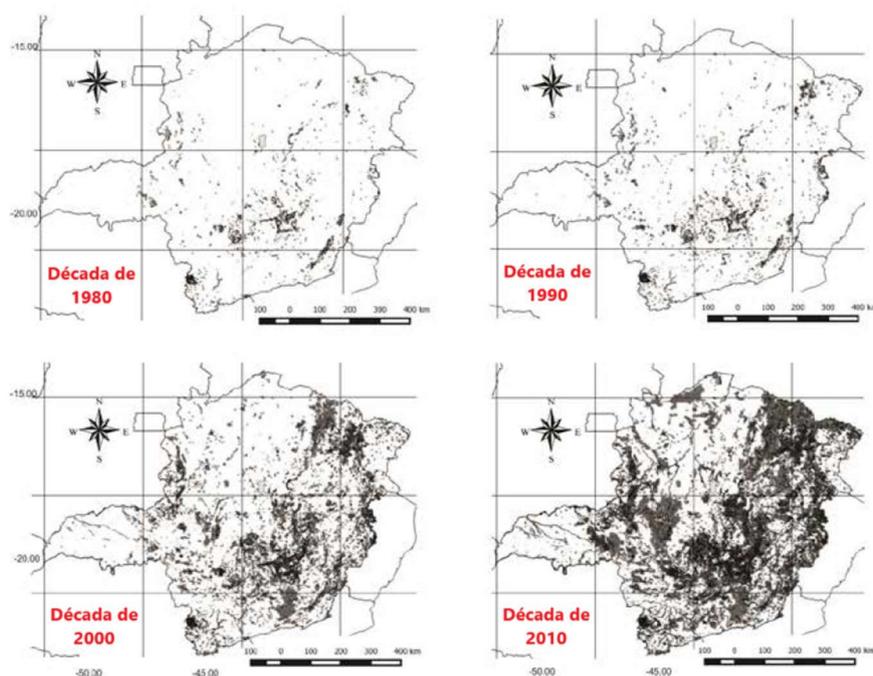


Figura 2 – Áreas de Mineração em Minas Gerais por Década (Adaptado de REZENDE, 2016)

O aumento drástico das regiões de área de mineração nas décadas mais recentes está possivelmente relacionado com a queda de restrições que eram impostas por leis ambientais brasileiras em anos mais recentes, o que permitiu a expansão da mineração de forma mais rápida pois a utilização de recursos naturais se torna mais facilitada por parte de empresas ou proprietários de terras (REZENDE, 2016).

De qualquer forma, a utilização de rejeito de minério de ferro como objeto de estudo nesta pesquisa está relacionada com a abundância da produção do material no território brasileiro, em especial no estado de Minas Gerais segundo o mapeamento das principais reservas minerais feito pelo Anuário Mineral Brasileiro (BRASIL, 2024). Na produção nacional bruta de minérios de 2023, produziu-se cerca de 299 milhões de toneladas de ferro, com mais da metade desse quantitativo vindo de Minas Gerais. Os outros materiais com maior produção foram o Alumínio com 21 milhões de toneladas; o Manganês com 800 mil toneladas e somente então o Cobre com aproximadamente 460 mil toneladas.

Dessa forma, é natural que se tenha o foco em estudar rejeitos de minério de ferro em específico. Além de ser o mineral com maior abundância, caso se comprove a viabilidade de seu reaproveitamento se torna mais provável que rejeitos de minério que obtiveram maiores resultados de resistência como o cobre também sejam viáveis.

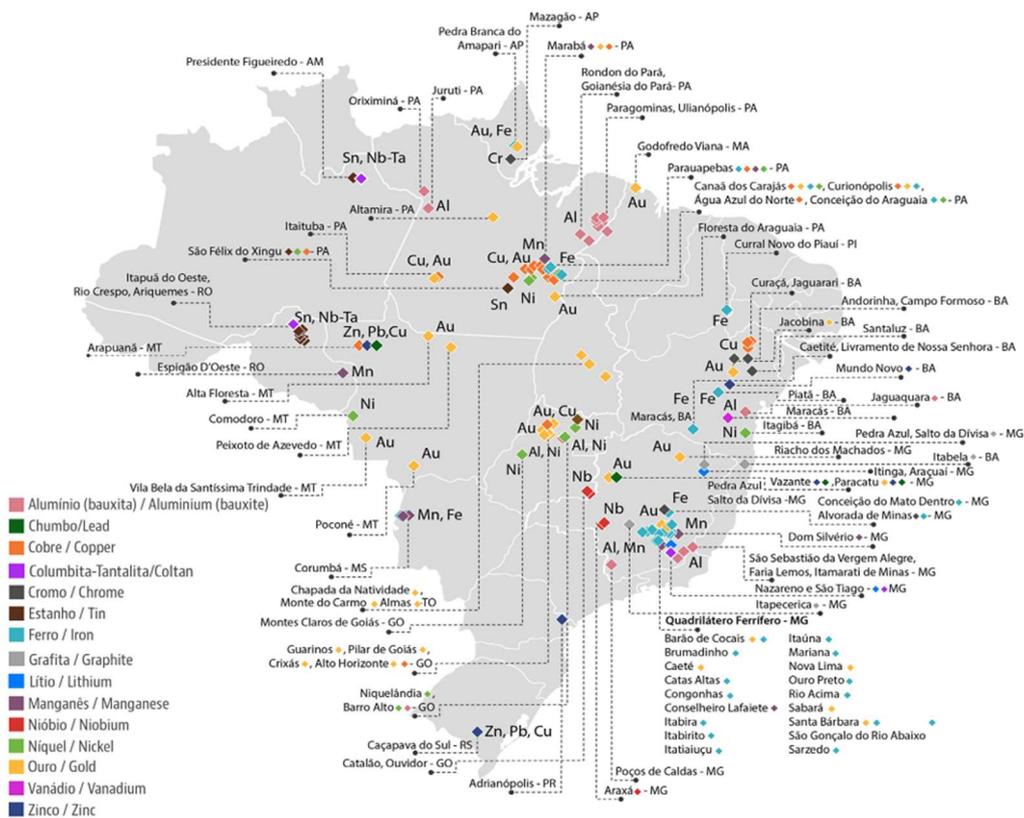


Figura 3 – Principais Reservas Minerais no Brasil (BRASIL, 2024)

A Figura 3 contém o mapa das principais reservas minerais no Brasil e nela pode-se notar que a maior parte das minas de Ferro no Brasil é de fato concentrada em Minas Gerais, apesar de existirem em menor quantidade em outros estados.

Tendo em mente este contexto básico da mineração no Brasil, é importante avaliar alguns dos impactos ambientais que podem ser causados pela má disposição de rejeitos, com foco em especial a ocorrências no estado de Minas Gerais em específico.

2.1.1. Causas e Impactos Socioambientais de Rompimentos de Barragens

A poluição do solo, da água e do ar são algumas das consequências mais graves da disposição inadequada de rejeitos de mineração. Alguns rejeitos podem conter uma mistura complexa de substâncias químicas que apresentam o potencial de serem tóxicas para o meio ambiente. Quando esses resíduos são descartados de forma inadequada, podem se infiltrar no solo e contaminar lençóis freáticos, rios e lagos, afetando a qualidade da água e a biodiversidade dos ecossistemas aquáticos. Por exemplo, o mercúrio é comumente utilizado na atividade da mineração de ouro, o que faz com que este elemento associado possa se acumular na cadeia alimentar, afetando peixes e animais que dependem da água como fonte de alimentação (GONÇALVES & BEZERRA, 2017).

Como este estudo pretende avaliar um rejeito de minério de ferro, é importante avaliar questões específicas relacionadas a este material e a forma mais apropriada é por meio da verificação dos principais acidentes de grande repercussão associados a este tipo de rejeito. De uma forma geral, o acúmulo em excesso deste tipo de rejeito em barragens próximas dos locais de exploração são o principal tipo de problema recorrente, ao estimularem o rompimento destas barragens.

Em relação ao rompimento da barragem de rejeitos no município de Brumadinho – MG em 2019, um relatório da perícia realizada pela Polícia Federal constatou que a realização de perfurações verticais em uma área crítica da barragem acabou por estimular um aumento de pressão que contribuiu para a liquefação dos rejeitos que faziam parte da barragem. O que significa dizer que estes materiais passaram a se comportar como fluidos, de forma que a estabilidade da estrutura foi comprometida (ZHU *et al.*, 2024).

Naturalmente, a falha humana foi um fator que contribuiu para o desencadeamento da tragédia, mas a utilização de rejeitos de minério de ferro na barragem teve o efeito de elevar os riscos de rompimento. Rejeitos quando saturados, podem perder a sua resistência ao cisalhamento e se comportar como lama, o que afeta em especial as

barragens executadas pelo método à montante no qual alteamentos são construídos sobre os rejeitos. Logo, qualquer instabilidade decorrente da liquefação de rejeitos traz riscos à segurança maiores em barragens construídas por esse método, cujo benefício é ser o mais simples e de baixo custo (IBRAM, 2016). O método de construção de barragens à montante foi o utilizado nas barragens rompidas de Brumadinho e Mariana (BOSCOV, 2019).

A Figura 4 apresenta o modelo à montante de barragem, sendo possível notar que apenas o dique inicial é construído sob a fundação, com alteamentos localizados sobre os rejeitos.



Figura 4 – Método à Montante de Barragem (IBRAM, 2016)

Já o método à jusante possui a distinção dos alteamentos serem construídos sobre o próprio dique de partida, o que reduz os riscos de instabilidade. Em contrapartida, os custos são mais elevados e a área que é ocupada pelo sistema de contenção se torna muito maior. A Figura 5 mostra como funciona o modelo de um sistema à jusante.

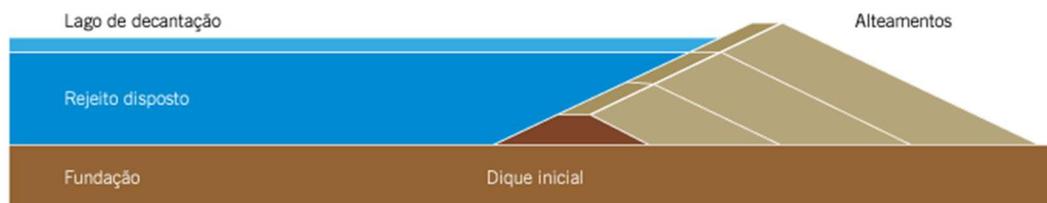


Figura 5 – Método à Jusante de Barragem (IBRAM, 2016)

Fica exemplificado assim que existem diferentes elementos associados ao rompimento de barragens para além do rejeito pois a forma com que as barragens são projetadas também possui influência relevante. De qualquer forma, o reaproveitamento do rejeito para outras finalidades poderia contribuir para reduzir o volume de material que é acumulado em barragens, o que reduz o risco de ocorrência de acidentes e do possível alcance destes.

Segundo POLIGNANO & LEMOS (2020), após o rompimento da barragem de Brumadinho, o principal impacto socioambiental decorreu da contaminação das águas próximas com os metais pesados presentes no rejeito, trazendo variadas restrições ao uso da água. Isso afeta não apenas a biodiversidade do bioma aquático como também os seres

humanos que utilizam essa água, seja para uso pessoal ou econômico como agricultura; turismo ou outras finalidades.

Somando-se a este problema de saúde pública, diversas casas e empreendimentos comerciais foram fisicamente destruídos e pessoas morreram como consequência do rompimento da barragem, com danos importantes também trazidos para a vegetação local (ROTTA *et al.*, 2020). A destruição da vegetação compromete a biodiversidade local e contribui para o processo de desertificação e degradação dos solos, fazendo com que comunidades locais precisem alterar o seu estilo de vida.

Um dos riscos ampliados com a perda da vegetação em longo prazo pode representar em maior risco de assoreamento de rios, pois as matas ciliares no entorno contribuem para filtrar o solo que é levado em direção aos rios durante chuvas por exemplo. Ou seja, maiores problemas podem surgir mesmo anos depois do acidente, reforçando a importância da prevenção para que sequer venham a ocorrer.

A barragem de Brumadinho foi rompida em 25 de janeiro de 2019 e os impactos podem ser observados visualmente mesmo após anos, evidenciando o caráter difícil de reverter de muitos dos impactos anteriormente mencionados. A Figura 6 apresenta imagens de satélites da região antes e depois do rompimento, sendo possível notar que a área que passa a ser ocupada pelo rejeito mineral de cor marrom e não volta a ser exatamente como antes mesmo com a retirada do material e alguns anos após o evento se passando.

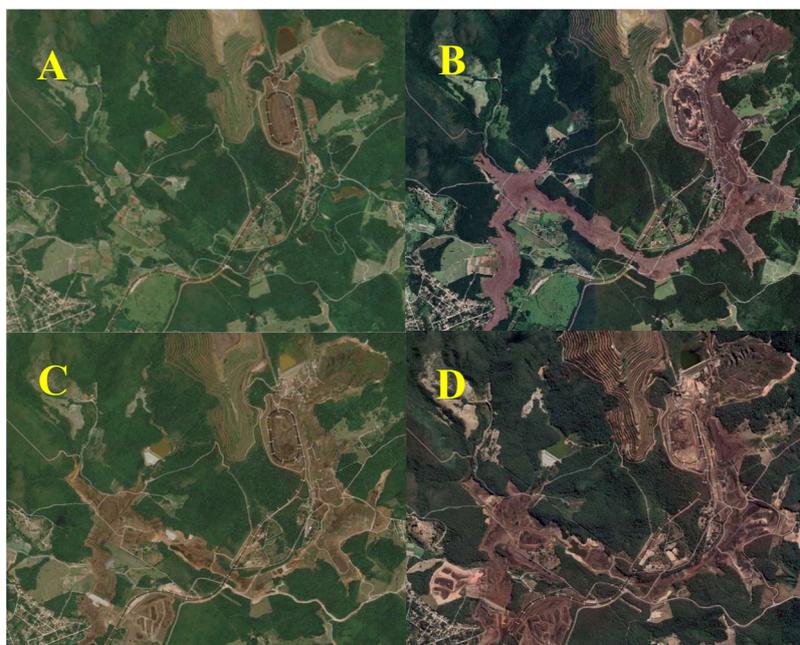


Figura 6 – Imagens de Satélite da Mina no Córrego do Feijão, em Brumadinho. (A) Janeiro de 2019, antes do rompimento da barragem. (B) Fevereiro de 2019, após o rompimento. (C) Abril de 2020, após um ano. (D) Julho de 2022, mais de 3 anos depois. (GOOGLE EARTH, 2025)

OLIVEIRA (2019) faz um compilado de transformações trazidas por rompimentos de barragens que resultam em diversos impactos de nível físico, biológico e socioeconômico. A Tabela 1 apresenta quais são estas transformações e lista alguns dos impactos mencionados pelo autor para cada tipo de impacto.

Tabela 1 – Causas e Exemplos de Impactos de Rompimento de Barragens de Rejeitos
(Adaptado de OLIVEIRA, 2019)

Transformação	Tipo de Impacto	Exemplos de Impactos
Movimento de Massa e Disposição de Rejeitos em Rios	Físico	Poluição da Água e do Ar.
	Biológico	Menor Reprodução de Peixes; Extinção de Espécies Endêmicas.
	Socioeconômico	Perdas para o Turismo e a Pesca.
Alteração de Características do Solo	Físico	Impermeabilização do Solo e Aparecimento de Sulcos de Erosão.
	Biológico	Redução da Biodiversidade local
	Socioeconômico	Perda de Áreas Agrícolas
Redução da Vegetação Nativa Local	Físico	Alteração do Ciclo Hidrológico; Assoreamento de Rios; Enchentes.
	Biológico	Alteração de Ecossistemas
	Socioeconômico	Perda de Recursos para Consumo
Danos à Unidades de Conservação	Físico	Degradação da Paisagem natural
	Biológico	Menor Conservação de espécies.
	Socioeconômico	Piora na Qualidade de Vida das pessoas.
Danos à Infraestrutura e Locais históricos	Socioeconômico	Perda de Residências; Estradas e Sítios Arqueológicos. Menor Atividade Econômica, com menos empregos.

Segundo boletim informativo liberado pelo governo do estado de Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2024), no qual foram apresentados os resultados de monitoramento da qualidade de água bruta em regiões afetadas em Brumadinho, mesmo no ano de 2023 ainda eram verificados resultados insatisfatórios para diversos parâmetros. Substâncias que apresentam alto risco à saúde como chumbo, bário ou arsênio ainda eram mensurados acima do indicado em até 3% dos casos para cada substância e a quantidade de ferro total

foi inapropriada em mais de 20% dos casos. Para níveis de alumínio e manganês total, a frequência de resultados desfavoráveis foi de mais de 10% para cada um.

VERGILIO *et al.* (2020) analisou o rejeito de uma mina do Córrego do Feijão em Brumadinho e verificou o ferro, o alumínio e o manganês como substâncias de maior predominância no material, o que está alinhado com a avaliação residual de substâncias na água divulgada pelo governo do estado. Além disso, uma análise da água do rio Paraopeba localizado em Brumadinho, a apenas 5 quilômetros de distância do local do acidente verificou o enriquecimento em especial das seguintes substâncias: cádmio; prata; manganês e ferro.

2.1.2. Aplicações de Reuso de Rejeitos

CARMIGNANO *et al.* (2021) menciona múltiplos possíveis usos do rejeito de minério de ferro como material de construção. Uma das principais alternativas para um rejeito fino seria o uso deste como agregado na produção de argamassa e concreto. Segundo os autores, o tempo de endurecimento da argamassa tende a aumentar com a substituição dos agregados finos por rejeito, pois substâncias mais densas como o ferro formarem misturas de menor permeabilidade. Além de afetar a porosidade, isso atrasa o processo de hidratação do cimento. No geral, obteve-se resultados positivos para a resistência à compressão como resultado da substituição devido ao efeito de preenchimento dos poros da argamassa pelos rejeitos. No entanto os autores explicam que a substituição não deve ser maior do que de 20% dos agregados para que se garanta a viabilidade desta troca.

Outros usos alternativos mencionados por CARMIGNANO *et al.* (2021) incluem a produção de geopolímeros ou de cerâmica. Para geopolímeros, o controle da proporção entre silício e alumínio deve ser feito, sendo que quanto maior for a presença do primeiro em relação ao segundo, mais favorável tende a ser o rejeito para este destino. Já para a produção de cerâmica – como tijolos – os materiais cerâmicos com rejeito tendem a demonstrar maior porosidade, ainda que contribua para a resistência. Para materiais cerâmicos costuma ser possível o reuso de uma quantidade maior de rejeito, de no máximo 40%, com materiais com mais silício e alumínio e menor quantidade de ferro sendo mais vantajosos para essa função. SEVERO (2019) estudou o aproveitamento de rejeito de minério de ferro na produção de tijolos cerâmicos e o rejeito também era mais rico em silício do que ferro, com 80% do material sendo quartzo. O estudo conseguiu utilizar 15% do material usado como rejeito e menciona a vitrificação do quartzo como um elemento que contribuiu para a dureza.

GOMES (2017) sugere que a granulometria dos rejeitos também está associada à sua aplicação quando esta é de caráter industrial. Por exemplo, rejeitos finos compostos por apenas ferro seriam mais utilizados em siderúrgicas e na indústria civil, enquanto os rejeitos finos de rochas ornamentais – associadas à presença de quartzo – que são voltados para aplicação em argamassas; cerâmicas; vidros; tintas; dentre outras aplicações. Já rejeitos mais grossos associados a estas rochas são mais reaproveitados para formação de brita ou areia artificial e podem ser usados também em fábricas de cimento, além de também se voltarem para uso em muros de contenção de taludes.

SÁ *et al.* (2021) realizou uma análise de diversas experiências com o rejeito de minério de ferro, dividindo as formas de aplicações do material em 6 categorias que se repetiram ao longo dos estudos. Estas se encontram descritas na Tabela 2.

Tabela 2 – Aplicações de Rejeitos de Minério de Ferro na Pavimentação (Adaptado de SÁ *et al.*, 2021)

Aplicação na Pavimentação	Formas de Aplicação
Misturas de Solo e Rejeitos	A - Utilização em camadas estruturais como base, sub-base e reforço de subleito. As misturas com solo podem ser feitas com solo granular ou laterítico. Já a estabilização química é geralmente feita com cimento, cal ou com escória.
Misturas Estabilizadas Quimicamente	
Misturas Estabilizadas Granulometricamente	
Concreto	B - Utilização em camadas de revestimento ou também de base (concreto), com substituição de materiais granulares por rejeito de minério de ferro.
Piso Intertravado	
Misturas Asfálticas	C - Utilização em camadas de revestimento, com adição do rejeito a um ligante asfáltico ou a uma mistura asfáltica.

É importante notar que os ensaios realizados para verificação do desempenho das misturas costumam se alterar a depender da forma de utilização do rejeito, pois a sua função tende a se alterar de acordo com a camada e função para a qual é destinado. Para camadas estruturais por exemplo – aplicação Tipo A - além de ensaios de caracterização física; química; mineralógica e ambiental, também são geralmente realizados ensaios de natureza mecânica que se concentram em ensaios de compactação, índice de suporte Califórnia e módulo de resiliência. Especificamente para os casos de estabilização

química, foram feitos ensaios de resistência à compressão simples e de durabilidade por conta da adição do cimento, sendo possível verificar se exigências normativas seriam atendidas.

Para a aplicação Tipo B, por conta da função distinta, geralmente se concentra mais em ensaios de compressão e flexão em referência aos parâmetros de ordem mecânica. Já a aplicação Tipo C envolve características físicas e químicas específicas, referentes a questões relativas aos ligantes asfálticos como penetração; ponto de amolecimento viscosidade, mas também são executados procedimentos referentes às misturas asfálticas em si, como ensaios de módulo de resiliência; fadiga; resistência à tração por compressão diametral para as misturas asfálticas.

Nesta dissertação, optou-se por focar especificamente na aplicação Tipo A, voltada para camadas estruturais e sendo mais interessante a realização de ensaios triaxiais que são mais voltados para uso em base ou sub-base de pavimentos.

Para além da pavimentação, os rejeitos de mineração são constantemente objeto de estudo para uso em novas tecnologias alternativas. Um possível uso ocorre na agricultura, com o potencial de reuso por meio do uso dos rejeitos de minério como um material usado na criação de condicionadores do solo de forma a garantir uma maior fertilidade. Estes condicionadores são às vezes necessários para fornecer nutrientes e melhorar a capacidade do solo de retê-los juntamente da água, o que facilita o crescimento das plantas (TUNES & VASCONCELOS, 2024).

Segundo SOUZA & GUEDES (2017), a adição do rejeito de minério de ferro na composição de blocos de concreto ou em infraestrutura rodoviária ou ferroviária seria justificada por um possível aprimoramento da resistência à compressão e à tração por conta da granulometria mais fina da maioria dos rejeitos, compostos predominantemente por siltes e argilas que podem preencher os vazios no concreto. No entanto, é destacada a finalidade de aproveitamento do material na pavimentação em especial por conta do espaço maior disponível para aproveitamento do material, o que ofereceria uma vazão significativa para o rejeito produzido pela mineração com uma menor necessidade de encontrar outros possíveis destinos de reciclagem. Razão pela qual a aplicação específica em pavimentos deve ser mais aprofundada.

WANG *et al.* (2023) nota que alguns rejeitos de minério de ferro também podem funcionar como materiais cimentícios ativados por álcalis e inclusive substituir o cimento

Portland comum em misturas de concreto, sendo inclusive possível preparar materiais estruturais de alta resistência com estes materiais. O que seria uma justificativa técnica para a incorporação dos rejeitos.

Por fim, vale a pena mencionar experiências de aproveitamento de rejeitos da mineração para formação de compósitos plásticos. LELIS *et al.* (2022) realizou um estudo no qual se avaliou a possibilidade de produzir um protótipo de madeira plástica por meio do rejeito de mineração em combinação com copos plásticos descartáveis e de óleo de soja utilizado como aglutinante. Foram utilizadas as proporções de 60% a 70% para o plástico e de 30% a 40% para o rejeito, gerando um material final sustentável e com acabamento superficial semelhante à madeira, embora os autores reforcem a necessidade de estudos mais aprofundados para avaliação das propriedades físicas e mecânicas destas amostras.

2.2. Estudos sobre Rejeitos de Mineração

A maioria das referências consultadas para esta pesquisa envolvendo o uso de rejeitos de minério na pavimentação no geral e citadas neste subcapítulo envolvem a inclusão de outros elementos para elevar a resistência e garantir assim um maior potencial de aproveitamento de rejeito. BASTOS *et al.* (2016) por exemplo, conseguiu reaproveitar um rejeito que é composto em mais de 60% por grãos finos, sem a necessidade de executar uma estabilização granulométrica com outros tipos de materiais granulares. Isso foi alcançado por meio da estabilização de misturas de solo ou rejeito com cimento, com variações de entre 0% até 10% de cimento sendo acrescentado nas misturas, sendo que aumentos significativos no valor de ISC foram mensurados a partir de 5% de cimento.

O rejeito, por si só, atendeu somente às especificações necessárias para ser utilizado em sub-base de pavimentos, enquanto com a adição de estabilizante químico seria possível utilizar o material em camadas de base, cujas exigências são mais rigorosas. Ainda assim, o fato de 100% do rejeito ter alcançado índices ISC que foram elevados o suficiente para atender camadas de sub-base estimula a reflexão de como o material se comportaria se fosse adotada uma abordagem de estabilização granulométrica ao invés da estabilização química com cimento.

HU *et al.* (2017) realizou análises sobre as propriedades geotécnicas de rejeitos de minério, comparando rejeitos de granulometrias distintas, mas também com origens diferentes. No geral, concluiu-se que os rejeitos mais finos apresentaram maior compressibilidade, além de menor permeabilidade e resistência cíclica a variações de

carga em relação aos rejeitos de grãos mais graúdos. Ao mesmo tempo, rejeitos de ferro apresentaram essas mesmas características quando comparados a rejeitos de cobre. Ou seja, ao se utilizar um rejeito de minério de ferro fino – predominantemente silte ou argila - como o que se foi obtido para a realização da pesquisa desta dissertação, há de se ter em mente de que estas características estão sendo reforçadas.

Com um rejeito de grãos de granulometria mais fina que o utilizado em BASTOS *et al.* (2016), se torna improvável que o rejeito utilizado nesta dissertação por si só consiga atingir níveis elevados de resistência, o que torna muito provável a necessidade de estabilização já antes da realização de qualquer ensaio. Como muitos dos estudos citados ao longo deste subcapítulo exploram a questão da estabilização do rejeito com cimento para formação de concreto ou de solo-cimento, obtendo no geral resultados positivos, desde então se considerou a estabilização granulométrica com grãos mais graúdos como uma melhor alternativa para esta pesquisa, além de ser uma solução de menor custo.

Além disso, o estudo de HU *et al.* (2017) também ofereceu um guia em relação aos procedimentos iniciais de caracterização a serem feitos para um rejeito de granulometria fina. Ensaio de caracterização granulométrica e de massa específica foram os principais independentemente do tamanho dos grãos, mas para os rejeitos finos também foram realizados os procedimentos para os limites de Atterberg.

Estas propriedades, como limite de liquidez e plasticidade também são abordadas na especificação determinada pelo método de projeto de dimensionamento de pavimentos flexíveis (SOUZA, 1981), sendo fundamental a sua mensuração para avaliar se um solo específico atenderia os requisitos para bases de pavimentos no Brasil. São determinados valores máximos de 25% para o limite de liquidez e de 6% para o índice de plasticidade, percentuais que não devem ser ultrapassados. Já para o índice de suporte Califórnia (ISC) em bases, a especificação varia de acordo com o tráfego, podendo ser um mínimo de 60% para estradas com tráfego mais leve, mas exigindo-se um ISC de pelo menos 80% para tráfegos mais pesados.

Outro procedimento importante a ser observado nos estudos sobre rejeitos é o de caracterização química e mineralógica. TARAZONA (2015) obteve imagens ampliadas de rejeitos de minério antes e depois de seu envelhecimento para verificar a ocorrência de alterações sobre o material. Em diferentes casos pode-se notar variações na quantidade de certas substâncias ou até a formação de cristais fibrosos. Ou seja, o mesmo material pode sofrer alterações na sua estrutura ou mesmo composição química ao longo do tempo,

sendo importante para esta dissertação ao menos estabelecer as condições originais do material que está efetivamente sendo utilizado e que pode se correlacionar com os resultados das propriedades obtidas em ensaios triaxiais por exemplo.

A coloração do material também pode indicar questões relacionadas a sua composição química. Segundo BAUER (2012), a maior presença de óxidos de ferro pode contribuir em oferecer uma cor mais avermelhada para os materiais, de forma que quanto mais vermelho o rejeito de minério de ferro é, mais provável é que o teor de óxido seja mais elevado em comparação com outras substâncias presentes em rejeitos, como é o caso do Silício. Pelo fato de o Ferro ser mais denso que o Silício, isso pode contribuir na formação de misturas mais compactas por exemplo.

Diferentes materiais, mesmo entre os minérios de ferro, possuem composições distintas. ARAÚJO (2020) associa os óxidos de ferro (Fe_2O_3) a um mineral chamado hematita, enquanto óxidos de silício (SiO_2) estão ligados ao mineral sílica. O autor faz uma compilação dos resultados de composição química em diversos rejeitos de minério de ferro advindos do Quadrilátero Ferrífero, região do centro-sul de Minas Gerais, concluindo que nestes rejeitos a hematita tende a ser dominante pelo fato de valores entre 40% e 60% dos rejeitos serem geralmente óxidos de ferro. Já a sílica tende a representar resultados que variam entre 30% até 40% da composição dos rejeitos, enquanto óxidos relacionados ao alumínio tendem a ter uma porção significativa entre 6% e 7% do total.

A análise química realizada por VILELA *et al* (2020), utilizou um rejeito no qual a hematita era menos de 15% da composição do material, enquanto quase todo o restante era composto por sílica, relacionada ao silício. Já no estudo de BASTOS *et al* (2016) a caracterização química verificou que a composição da substância de ferro era maior que a de silício, com 68% de hematita e 20% de sílica. Estas distinções evidenciam que existe uma grande diversidade heterogênea de tipos de rejeito de minério de ferro, sendo possível encontrar resultados distintos em experimentos em laboratório dependendo destas características do material.

ZHAO *et al.* (2021) realizou uma revisão bibliográfica sobre estudos envolvendo rejeito de minério de ferro e fez uma compilação dos resultados de caracterização geralmente encontrados para rejeitos de minério de ferro. A massa específica tende a variar entre 2,64 e 3,31 g/cm^3 , com o ferro em específico sendo o elemento responsável pelos resultados de massa específica acima do geralmente verificado para materiais granulares naturais, como britas e areias comuns. Além disso, os compostos químicos tendem a se concentrar

especificamente em Fe_2O_3 , SiO_2 e Al_2O_3 , relacionados respectivamente à hematita, ao quartzo e à alumina, esta última associada à bauxita.

O compilado feito por ZHAO *et al.* (2021) também faz a importante análise do impacto da adição do rejeito sobre a resistência à compressão do concreto, sendo no geral observado um aumento na resistência em pequenas proporções de rejeito, mas após se exceder um valor ótimo de rejeito, essa resistência passa a diminuir. Além disso, a substituição de cimento por rejeito de minério em misturas tende a causar reduções na resistência ou no máximo melhorias limitadas até certo quantitativo de rejeito.

WANG *et al.* (2023) repara, entretanto, que os rejeitos de minério de ferro também podem conter metais pesados que são prejudiciais ao meio ambiente, razão pela qual é importante realizar uma avaliação da composição química do rejeito para garantir que estes não estejam presentes de forma significativa no material reutilizado. O estudo define elementos como o cromo, o zinco, o níquel, o chumbo, o cádmio, o mercúrio e o arsênio como alguns dos que podem estar presentes no rejeito de ferro e que podem trazer maiores transformações negativas para o meio ambiente.

É interessante notar a menção do cobre como um metal mais pesado, pois é um mineral também associado a rejeitos de mineração, com experiências de reciclagem estudadas. SÁ *et al.* (2021) menciona experiências de reciclagens de rejeitos de minério de ferro; bauxita; cobre e tungstênio, ainda que os estudos sobre rejeitos de ferro sejam os mais amplos dentre os quatro. Isso significa que a presença do cobre não implica que o material não deve ser utilizado na pavimentação, apenas que maior cuidado deve ser tomado em relação aos limites avaliados em ensaios de lixiviação para evitar o risco de contaminação,

OJURI *et al.* (2017) trabalhou com uma mistura de solo-rejeito classificado como laterítico, verificando resultados mais altos de resistência conforme aumentava a proporção de rejeito adicionado. Isso estimula a classificação do rejeito como laterítico ou não-laterítico, por meio da metodologia MCT. É favorável a utilização de solos lateríticos pois eles podem oferecer maior estabilidade e densidade para misturas utilizadas em pavimentos.

Em estudos mais voltados para a estabilização granulométrica com a utilização de rejeitos, foram encontradas algumas experiências sobre o tema. No geral, somente a utilização de rejeito não se mostra suficiente para a obtenção de resultados satisfatórios de forma que alguns autores costumam misturar o material com outros agregados. Por

exemplo, SUNIL *et al.* (2015) realizou uma estabilização granulométrica de um rejeito de ferro arenoso com uma areia de granulometria mais grossa e obteve resultados otimizados de resistência à compressão simples utilizando-se cerca de 35% de rejeito e 65% de areia. Já ZHAO *et al.* (2014) focou em uma pesquisa voltada para formação de concreto, mas estabeleceu um limite de até 40% de rejeito que poderia substituir os agregados naturais.

Ou seja, independentemente da pesquisa, quando se avalia a quantidade de rejeito como variável, é comum que o desempenho do corpo de prova seja maximizado para uma proporção específica de rejeito, referida aqui como percentual ótimo de rejeito. Sob essa lógica, a adição de rejeito é algo tecnicamente positivo até certa quantidade, com o excesso trazendo prejuízos para a resistência das misturas.

Técnicas como a incorporação de cimento podem contribuir para um maior potencial de reaproveitamento do rejeito ao elevar a resistência de uma forma a fazer com que os benefícios trazidos pelo cimento permitam a adição de rejeito em excesso. Pois mesmo em situações que o rejeito não traga benefícios para a resistência e sua adição não seja justificada tecnicamente, ainda assim sob o ponto de vista ambiental poderia se aproveitar maior quantidade o rejeito e obter resultados aceitáveis de resistência devido a adição do cimento e não do rejeito em si

Foi também por essa razão que se escolheu focar apenas na avaliação do efeito da estabilização granulométrica, com o objetivo de entender o benefício potencial trazido pelo rejeito em si de forma independente para entender o que o rejeito em si especificamente poderia contribuir para a estrutura de um pavimento. Ou se ele sequer seria capaz de trazer alguma contribuição técnica a este ponto.

KURANCHIE *et al* (2015) realizou a estabilização entre dois rejeitos de granulometrias distintas de forma a alcançar um potencial de reutilização de material de 100%, evidenciando que a granulometria é a principal característica-chave ao se avaliar a função dos materiais em uma mistura estabilizada, uma vez que o rejeito pode apresentar comportamentos semelhantes aos de solos em termos de interação entre partículas. É importante que o material seja suficientemente bem graduado pois isso estimula uma maior interação entre as partículas, com os grãos mais finos ocupando os espaços criados entre os grãos mais graúdos e estimulando uma mistura de maior densidade e menor compressibilidade. Que são características associadas a uma maior resistência e um desempenho otimizado.

É sob essa visão que este estudo trabalha com a teoria de que a adição de um rejeito de minério mais fino pode contribuir para o aumento da densidade de uma mistura ao ocupar pequenos espaços vazios deixados entre os grãos, não havendo a necessidade de incorporação de cimento para que se observem melhorias técnicas. Ainda que provavelmente exista um limite para essa adição de rejeito, que deve ser investigado sob distintos parâmetros e ensaios.

É importante ainda assim se ter em mente que os resultados de ensaios mecânicos por si só não devem ser interpretados isoladamente. OLIVEIRA *et al.* (2019) nota que apesar de resultados de ISC mais altos verificados para o material em sua pesquisa, o rejeito utilizado carece de estabilidade por conta de sua granulometria uniforme, obtendo-se elevados resultados de perda de massa por imersão, sendo impossível a utilização do rejeito por si só. Ou seja, caso seja obtido um rejeito semelhante a este, é bem possível que o potencial de reaproveitamento seja bem limitado a percentuais por volta da faixa de 0% a 20% de rejeito, pois quanto maior a proporção de rejeito, maior instabilidade e imprevisibilidade se acrescenta à mistura, o que não é tão interessante para a infraestrutura de um pavimento.

A pesquisa de DANTAS (2019) focou na avaliação de misturas estabilizadas de rejeito e concluiu que a melhor interação entre rejeito e solo ocorreu na proporção de 80% de solo e 20% de rejeito fino. Pelo fato de o rejeito neste estudo ter uma granulometria mais uniforme além de também ser mais fina, isso possivelmente trouxe limitações para que incorporações mais elevadas de rejeito obtivessem resultados de maior aproveitamento.

JAHANSHAHI *et al.* (2024) realizou ensaios de MR em rejeitos tanto oriundos de hematita quanto de magnetita, adicionando variadas quantidades de cimento no material. Baixos teores de cimento são o suficiente para elevar significativamente os valores de MR em ambos os tipos, sendo possível inclusive dobrar estes resultados de MR com quantidades abaixo de 10% de cimento. Em amostras sem cimento, o MR máximo verificado durante os ensaios se manteve por volta de 400 MPa em ambos os rejeitos. A granulometria da magnetita se consistiu como mais arenosa enquanto a da hematita foi mais mista, com proporção próxima entre grãos arenosos e finos. Ou seja, o resultado da resiliência não foi fortemente alterado por conta de distinções granulométricas.

Entende-se então que o MR é possivelmente a propriedade menos afetada por variações granulométricas, ao menos em comparação com outros resultados como o ISC e o de DP. O Índice de Suporte Califórnia, que consiste em um indicador que fornece informações

sobre a qualidade de materiais e misturas em relação à resistência à penetração, é fortemente afetado por variações granulométricas como indicado por BERNUCCI *et al.* (2007), pois misturas com grãos mais graúdos tendem a contribuir no geral para valores de ISC mais elevados por conta da maior influência do atrito entre os grãos, enquanto grãos mais finos são mais compressíveis e coesivos. Ainda que este não seja necessariamente o único fator atuante sobre a resistência à penetração.

Já em relação às deformações permanentes, é natural que com uma maior graduação na granulometria, menor tende a ser a proporção de vazios na mistura e naturalmente as deformações permanentes tendem a ser mais baixas. De forma que o ensaio de MR seja talvez o menos efetivo para a avaliação de alterações granulométricas. Ainda assim, ele permite um melhor entendimento do comportamento elástico do material, que deve ser levado em consideração em uma análise ampla do impacto da adição de rejeitos, sendo esperados valores não muito distantes dos encontrados em JAHANSHAHI *et al.* (2024).

SÁ *et al.* (2022) avaliou o uso de misturas de solo-cimento contendo também quantidades de rejeito de minério de ferro com granulometria mais graúda, predominantemente pedregulhos. Por meio de resultados de ensaio de compressão simples, quantitativos de rejeito na proporção de 10% e 20% conseguiram alcançar níveis acima dos exigidos, embora somente o corpo de prova contendo 10% de rejeito tenha verificado um aumento na resistência em comparação com a mistura sem rejeito.

Este resultado indica fortemente que é comum existir uma proporção ótima de rejeito a ser adicionada para potencializar o desempenho das misturas. O uso de 10% de rejeito teve um impacto positivo na mistura ao aumentar em mais de 6% a resistência à compressão, de forma que o uso do material é justificado por conta das melhorias reais que este por si só pode trazer para o pavimento. Segundo SÁ *et al.* (2022), o corpo de prova com 10% de rejeito foi também o que apresentou a maior massa específica aparente durante o ensaio de compactação, evidenciando uma possível relação entre parâmetros distintos.

Embora essa análise tenha sido realizada para misturas de solo-cimento, ela também pode ser aplicada a solos estabilizados granulometricamente, sem a adição de cimento. Além disso, ao revisar este estudo, observou-se que a simulação de uma estrutura de pavimento contendo o material estimou o valor do módulo de resiliência, mantendo-o mais elevado para a mistura com 10% de rejeito. Isso ajuda a validar a hipótese de que a proporção ótima seria a mesma, independentemente do parâmetro analisado. Portanto, a realização

de múltiplos ensaios mecânicos distintos é considerada ideal para confirmar esse alinhamento entre os resultados, mesmo que os ensaios avaliem parâmetros diferentes.

Nem sempre os resultados encontrados são completamente favoráveis para o uso de rejeito. OSINUBI *et al.* (2015), com o intuito de verificar o efeito da adição de rejeito de minério de ferro em uma argila tropical preta modificada por cimento, diz que as especificações nigerianas para uso em subleitos não foram atendidas por conta da granulometria verificada e dos limites de Atterberg. Mesmo assim, a adição do rejeito gerou alterações nas propriedades das partículas do solo modificado de forma a melhorar a trabalhabilidade conforme análise microscópica eletrônica de varredura, com teores ótimos de 4% de cimento e 6% de rejeito de minério de ferro. O estudo conclui que a adição do rejeito reduziu a quantidade do cimento usado para a modificação do solo.

Em uma experiência de substituir parcialmente o cimento com rejeito de minério de ferro na produção de compósitos cimentícios, EUGENIO *et al.* (2024) verificaram também a proporção de 10% de rejeito como a que apresentou resultados associados a um desempenho superior. Embora se trate de um estudo distinto, foi uma ocorrência comum entre as referências apresentadas neste subcapítulo o potencial de aproveitamento ser mais limitado, sendo utilizado esse teor de 10% de rejeito como uma das bases para a fixação das variáveis específicas de rejeito utilizadas nesta dissertação.

XU *et al.* (2021) concluiu em sua pesquisa que a adição de rejeito de minério de ferro tende a obter bons resultados em misturas de concreto por conta da diminuição do índice de vazios, elevando-se a densidade. Isso sustenta um possível argumento para a existência de uma quantidade ótima de rejeito, pois materiais granulares como brita podem oferecer maior resistência por conta do atrito entre partículas, mas o índice de vazios também é maior em misturas somente com estes agregados. Assim, a submissão de cargas cíclicas ao longo do tempo pode ser prejudicial em especial para deformações permanentes pois há um maior espaço para que essas deformações ocorram.

Baseando-se nessa ideia, é especialmente interessante que sejam comparados resultados de deformações permanentes em específico com o de outros ensaios mecânicos pois trabalhando-se com esta hipótese aqui explicada, é possível que a proporção ótima de rejeito fino seja estimulada a ser maior sobre o parâmetro de deformações permanentes justamente pelo fato de estes materiais reduzirem o índice de vazios. Nesse caso, a viabilidade do uso de rejeito poderia estar diretamente interligada com o objetivo

específico para o qual ele seria adicionado. E o rejeito fino com esta lógica poderia ter maior potencial para redução das deformações permanentes.

SHETTIMA *et al.* (2016) obteve conclusões semelhantes em relação à adição de rejeito fino, com misturas contendo 0%; 25%; 50%; 75% e 100% de rejeito de minério de ferro em misturas de concreto. A mistura com maior desempenho foi a de 25%, indicando que a adição de rejeito apesar de ser positiva, também é limitada. Com base neste estudo em especial se estimulou a adoção de variáveis entre 0% até 25% nesta presente dissertação. Valores extremos como 0% e 24% foram fixados, assim como uma variável média de 9% ou 10% de rejeito. Após estudos iniciais, foi possível acrescentar uma variável extra e julgou ser mais apropriado focar na faixa entre 0% e 10% por conta dos resultados obtidos, adicionando-se então uma variável de 5%.

GALHARDO (2015) trabalhou apenas com estabilização do solo, assim como DANTAS (2019), embora tenha trabalhado com a mistura do rejeito arenoso-argiloso com solos diferentes, um siltoso e outro mais gráudo, mas com quantidade significativa de argila. A estabilização somente verificou resultados de ISC suficientes para uso em sub-base e somente quando foi utilizado o solo mais gráudo rico em argila, pois o solo siltoso não apresentou resultados favoráveis. Isso pode reforçar as dificuldades de aproveitamento do silte na pavimentação, ainda mais quando em proporções mais altas. Grãos gráudos como pedregulhos ou mesmo areia podem conferir estabilidade por meio do contato entre grãos enquanto argilas tendem a apresentar coesão entre partículas de forma que estas se atraiam. O silte, por ser um material fino tende a ser coesivo, mas estes valores de coesão no geral são reduzidos ou até mesmo insignificantes a depender do material. De qualquer forma, é possível que em quantidades limitadas ele contribua para a adição de um fator coesivo que contribua para melhor estabilização de materiais como areias ou britas, pois estariam se combinando materiais em teoria complementares entre si.

O uso de um rejeito fino, poderia dessa forma ser utilizado em combinação com materiais granulares para verificação do potencial de rejeito. Como a argila possui uma coesão maior, acredita-se na hipótese de que a combinação desta com materiais granulares traria um potencial de aproveitamento do rejeito com maiores benefícios. No entanto, o que ocorreria com o silte é mais incerto por conta de seus valores de coesão mais baixos. Acredita-se que se caso se justifique a adição do silte em algum nível de um ponto de vista técnico, rejeitos de granulometrias distintas também poderiam ser aproveitados.

É importante mencionar que um estudo da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2020) executou um trecho experimental para a utilização de rejeitos de mineração no qual é verificado que as camadas de sub-base foram eventualmente as principais responsáveis pela má qualidade do pavimento por serem extremamente deformáveis, o que reforça a importância de um controle de qualidade sob o ponto de vista das deformações permanentes. É feita a observação que em campo, os materiais podem apresentar maior deformabilidade que em ensaios laboratoriais por distintas razões.

Por este ponto de vista, é possível que seja benéfico buscar alternativas que reduzam ao máximo os índices de vazios para potencializar a resistência às deformações permanentes, como é o caso do Método Bailey de dosagem por exemplo.

2.3. Ensaios e Procedimentos

Este subcapítulo foca em experiências encontradas com procedimentos específicos adotados nesta dissertação, com maior atenção dada ao Método Bailey de dosagem e o Ensaio de Deformações Permanentes pelo Método do Multiestágio, mesmo que nos estudos apresentados não tenham o uso de rejeito de minério de ferro. O foco é obter informações que possibilitem uma compreensão melhor das análises que poderiam ser efetivamente executadas.

2.3.1. Aplicações do Método Bailey

VAVRIK *et al.* (2002) é o principal estudo utilizado como base de compreensão em relação em como se define o Método Bailey de dosagem para misturas asfálticas. Basicamente, o método se baseia no conceito de empacotamento de misturas de agregados, combinando dois ou mais de forma a maximizar o intertravamento entre grãos e a ocupação dos espaços vazios dentro de uma mistura. O método foi originalmente conceitualizado diante da necessidade de institutos estadunidenses de criar revestimentos para pavimentos que oferecessem boa resistência às deformações permanentes e à fadiga, utilizando-se da estabilização granulométrica como modo de seleção da granulometria de forma a otimizar a densidade das misturas (MENDES *et al.*, 2012).

De uma forma geral segundo a definição do método, agregados graúdos são aqueles que definem a estrutura da mistura e formam vazios entre si, enquanto os agregados finos são aqueles responsáveis por ocupar estes espaços deixados vazios, garantindo uma melhor interação entres estes grãos de tamanhos distintos de maneira que sejam complementares.

No entanto, o que é agregado graúdo ou fino para o Método Bailey não é definido à risca por modelos de classificação tradicionais, mas sim com base no que o agregado específico representa para a mistura. Uma areia grossa sob este ponto de vista poderia ser um agregado fino se misturada com pedregulhos, da mesma forma que um silte poderia em teoria ser um agregado graúdo se combinado com solos argilosos.

A definição da função dos agregados pelo método é feita por meio do estabelecimento de distintas peneiras de controle – determinadas a partir da granulometria específica dos materiais utilizados - que possuem a importância de dividir o que seria a fração graúda da mistura da fração fina. A peneira de controle primário é geralmente a responsável por esta definição, enquanto peneiras de controle secundário ou terciário dividem a fração fina da mistura em subgrupos de forma a controlar o preenchimento de vazios e assegurar boa compacidade.

OTHMAN (2021) realizou no Egito uma análise de misturas asfálticas dosadas por métodos tradicionais, observando-se a frequência com que as quais atenderam as especificações do Método Bailey. O estudo concluiu que apenas 14% das misturas tradicionais seriam possíveis de serem enquadradas dentro do método, de forma a apresentar um bom desempenho em campo. Além disso, 80% das misturas asfálticas seriam propensas à segregação em campo ao atingir proporções de agregados graúdos abaixo do exigido pelo método, enquanto os 6% restantes atingiram proporções acima do limite especificado, o que indica misturas de difícil compactação.

Isso demonstra a disparidade entre métodos tradicionais e o Método Bailey, com o autor recomendando a adoção da análise pelo segundo como uma ferramenta adicional para o desenvolvimento de misturas asfálticas em seu país. Foram utilizadas ao todo 103 misturas tradicionais como base amostral. Além disso, o autor fornece uma explicação da importância de se atender os limites granulométricos que são determinados por VAVRIK *et al.* (2002), não sendo recomendado que estes limites sejam desrespeitados apesar de ser algo comum de ser observado em misturas convencionais.

Embora o método seja designado para misturas asfálticas, a sua lógica de empacotamento pode ser aplicada para misturas comuns de agregados de forma a otimizar a densidade das misturas e possivelmente contribuindo para um maior desempenho destas. A partir deste ponto de vista, se buscou distintos estudos voltados a compreender especificidades relacionadas ao método, visando a aplicação de seus conceitos básicos com este entendimento.

SWATHI *et al.* (2021) observa que o uso de escória de aço em misturas asfálticas é frequentemente limitado por conta de distinções granulométricas, de forma que resolveu adotar o Método Bailey como uma forma de se encontrar uma graduação adequada entre os grãos que permitisse o aproveitamento de até 100% de escória. Além disso, as propriedades físicas da escória são beneficiadas pela presença de óxido de ferro que também se encontra em rejeitos de minério de ferro, razão pela qual se desejou potencializar o uso da escória. Os ensaios de MR realizados no estudo demonstraram que independentemente da temperatura considerada, as misturas dosadas pelo Método Bailey apresentaram um aumento na resiliência das misturas. Os resultados de afundamento de roda também foram menores para a mistura dosada pelo método, evidenciando também uma contribuição positiva para a redução de deformações.

É interessante pensar em adotar os mesmos conceitos do método com o mesmo objetivo tendo em vista que já foi estabelecido que a adição de rejeito pode vir a trazer prejuízos a partir de certa proporção mais alta. Por um lado, o Método Bailey apresenta o potencial de gerar misturas mais densas e compactas de forma a existir um menor espaço de vazios a ser preenchido que pode limitar ou diminuir o potencial de aproveitamento de rejeito. A utilização de energias de compactação mais elevadas também pode ter esse mesmo efeito, por exemplo. Por outro lado, é mais provável que se encontrem resultados favoráveis para uso em base de pavimentos com a adoção do método por meio de uma melhor graduação entre grãos e a dosagem de uma mistura bem graduada foi considerado como algo prioritário.

GHUZLAN *et al.* (2020) compara o Método Bailey com um método convencional de graduação do Superpave, em misturas asfálticas. O Método Bailey no geral mostrou melhores propriedades de mistura, graças ao mecanismo de identificação de más graduações, sendo recomendado por salvar tempo, dinheiro e esforço. Além disso, para misturas de grãos graúdos, o Método Bailey também facilita a geração de pavimentos mais resistentes à deformação. Já para misturas de grãos finos, o método tradicional para o Superpave apresentou resultados mais favoráveis mais com uma diferença insignificante em relação à mistura de finos pelo Bailey.

No geral as misturas de graúdos deformaram mais por conta da maior presença de vazios, independentemente do método ainda que a diferença nos resultados tenha sido para estas misturas. Ou seja, se trabalha com a ideia de que para materiais de grãos de tamanho maior, como britas, é especialmente mais interessante adotar o Método Bailey. Porque a

sua função de empacotamento e melhor intertravamento que reduz os vazios logicamente terá maior impacto em misturas que teriam um índice de vazios muito maior caso o método não fosse utilizado. Em matrizes de finos, é natural que faça menor diferença a utilização do método ou não pois já há um espaço mais limitado a ser ocupado. Ainda assim, para esta dissertação por questão de uniformidade e possibilidade de comparação entre os resultados, se adotou o mesmo método de dosagem independentemente do tipo de mistura executada.

BILODEAU *et al.* (2012) realiza uma distinção entre materiais britados e parcialmente britados, sugerindo a existência de resultados distintos a depender da natureza do material. Materiais britados tendem a apresentar uma superfície mais angular enquanto os parcialmente britados apresentam uma mistura entre superfícies angulares e redondas. Os materiais britados são mais favoráveis para a ocorrência de intertravamento por conta desta superfície mais angular.

Segundo o autor, o módulo de resiliência é afetado de forma distinta de acordo com a natureza do material. Para materiais britados, a resiliência é mais fortemente influenciada pelos grãos graúdos, com o valor de MR aumentando quanto maior for a massa de partículas graúdas. Já para materiais parcialmente britados, são os agregados finos que possuem maior influência, elevando o MR quando acrescentados.

Sob o ponto de vista do Método Bailey, no contexto do estudo desta dissertação, isso significa que caso se deseje realizar uma estabilização entre materiais granulares britados e um rejeito de minério fino, é implícito que o rejeito de minério de ferro terá um impacto de reduzir o MR pois se está dosando um material mais fino em um material britado. Instintivamente, isso vai contra a ideia de que para as deformações permanentes, a adição do rejeito fino é mais positiva ao reduzir o índice de vazios na mistura. Mas é importante ter em mente que o módulo de resiliência e as deformações permanentes são parâmetros distintos e não necessariamente os seus resultados devem estar alinhados.

De qualquer forma, se trabalha desde então com a teoria de que a adição de um rejeito de minério de ferro fino teria mais possibilidade de trazer benefícios pela deformação permanente mesmo que talvez nem tanto pelo módulo de resiliência. Ao garantir uma melhor distribuição granulométrica e maior intertravamento entre os grãos, o Método Bailey por si só também poderia contribuir para elevar os resultados de densidade da mistura e o MR, de forma a compensar essa possível redução trazida pela adição de um material fino como o rejeito, o que justificaria a adoção do método.

2.3.2. Aplicações de Ensaios de Deformações Permanentes

WERKMEISTER *et al.* (2002) caracteriza a deformação permanente como a deformação que ocorre de uma forma não-linear e é resultado da deformação total que é estimulada por efeitos externos subtraída da deformação resiliente que se relaciona com o comportamento elástico do material e é dessa forma recuperável. A deformação permanente é aquela associada ao comportamento plástico pois não há a possibilidade de o corpo de prova retornar ao seu estado original, sendo assim o parâmetro mais relacionado com afundamentos de trilha de roda e algumas outras patologias que podem ocorrer em um pavimento em decorrência do tráfego.

As deformações permanentes podem ser afetadas por diversos fatores distintos, como tipo de material; granulometria; umidade e forma de compactação. Assim, se deve ter em mente que os resultados eventualmente obtidos para este estudo existem em função do rejeito de minério de ferro e de outras considerações ou parâmetros específicos que são estipulados para o propósito da pesquisa.

Foi mencionado anteriormente a influência da forma e da textura sobre o MR, mas estes elementos também se relacionam com as deformações permanentes pois grãos mais angulares favorecem um maior atrito entre as partículas, o que contribui para elevar a resistência ao cisalhamento e é favorável para menores deformações. O mesmo pode ser dito sobre a rugosidade dos grãos, sendo essa uma característica benéfica para maior atrito (PINTO, 2006).

A utilização da brita no lugar de materiais naturais é assim mais justificada, ainda que se deva atentar para outros fatores de influência como umidade; índice de vazios e naturalmente, as tensões de carga que são aplicadas durante o ensaio de deformação permanente. Estas tensões são chamadas de confinante e desvio, sendo aplicadas durante o ensaio como simulação do que ocorre na prática sobre uma camada de pavimento ao reproduzir tensões que seriam aplicadas durante o tráfego de veículos.

A tensão confinante (σ_3) é a pressão que atua de forma uniforme em todas as direções de um material, tendo este nome por conta de seu efeito estabilizador ao confinar o material. Já a tensão desvio (σ_d) representa a diferença entre a tensão principal aplicada verticalmente sobre um material (σ_1) e a própria tensão confinante, sendo proporcional ao nível de instabilidade do material de forma que contribui para estimular a sua ruptura.

Tanto a tensão confinante e a tensão desvio são parâmetros utilizados no ensaio de deformações permanentes, possuindo influência direta com os resultados obtidos por estarem associadas ao cisalhamento. Por esse motivo, estas tensões também possuem relação com patologias em pavimentos. A intensidade da carga do tráfego representaria por exemplo a tensão principal que estimula a deformação das camadas do pavimento.

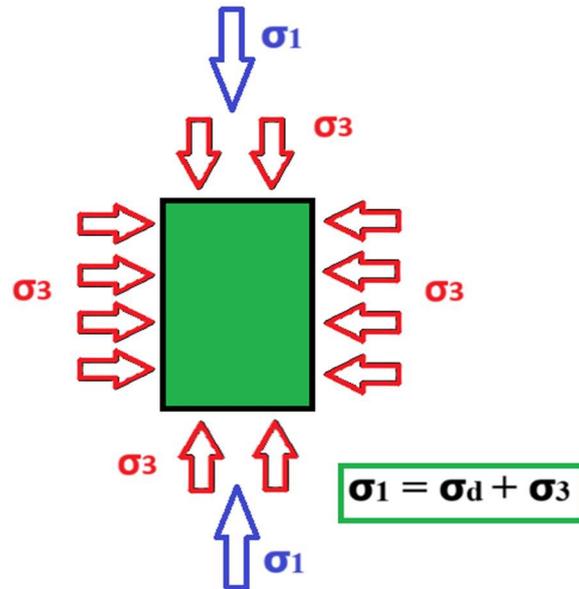


Figura 7 – Diagrama de Tensões durante um Ensaio Triaxial

A tensão confinante (σ_3) é a pressão aplicada de forma uniforme em todas as direções de um material, tendo este nome por conta de seu efeito estabilizador ao confinar o material. Já a tensão desvio (σ_d) representa a diferença entre a tensão principal aplicada verticalmente sobre um material e que tem efeito desestabilizador (σ_1) e a própria tensão confinante, representando a tensão que efetivamente estimula a ruptura do material conforme é aplicada.

A Figura 7 representa um diagrama destas tensões aplicadas sobre um corpo de prova durante um ensaio triaxial. Pode-se notar que a tensão confinante tem efeito estabilizador justamente por ter ação sobre toda a amostra, inclusive na lateral. Já a tensão principal atua em apenas um único eixo, o que estimula o corpo de prova a se deformar.

Os ensaios triaxiais de DP são geralmente executados em um único estágio na forma que se encontram previstos nas normativas convencionais, o que significa dizer que o par de tensões σ_3 e σ_d não se altera e de mantêm constantes durante a realização de todo o procedimento. Dessa forma, para avaliar diferentes estados de tensões, são necessários múltiplos ensaios, um processo custoso e demorado que nem sempre se apresenta como viável.

Este método de estágio único, no geral prevê a determinação de parâmetros de regressão seguindo o modelo de GUIMARÃES (2009), de maneira a permitir calcular os valores de deformação permanente obtidos por meio de uma equação que possua boa correlação entre os dados. A Equação 1 indica o cálculo da deformação permanente específica (ε_p). Mas para isso são necessários 9 corpos de prova por tipo de amostra, a serem estudados sobre os estados de tensões especificados pela norma (DNIT 179, 2018b).

$$\varepsilon_p (\%) = \psi_1 \cdot (\sigma_3/\rho_0)^{\psi_2} \cdot (\sigma_d/\rho_0)^{\psi_3} \cdot N^{\psi_4} \quad (\text{Equação 1})$$

$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi_4$ são Parâmetros de Regressão calculados após a realização dos ensaios. ρ_0 é o valor da Pressão Atmosférica enquanto N representa o Número de Ciclos de Aplicação de Carga que gradualmente aumentam com a realização do ensaio. No entanto, existe um outro método que não se encontra em normativa que é chamado de método do multiestágio, no qual diferentes pares de tensões são aplicados sobre um mesmo corpo de prova, gerando deformações cumulativas ao longo do processo na medida em que os pares de tensão vão se alterando ao longo do ensaio. Este método se beneficia do fato de um único ensaio poder avaliar múltiplos estados de tensões, sendo necessária uma menor realização de ensaios.

Pela pesquisa geral foi possível encontrar uma boa diversidade de experiências com ensaios de deformações permanentes, mas optou-se por dar destaque neste subtópico às experiências com o método do multiestágio pois foi este que foi efetivamente seguido por este estudo, adaptando-se preceitos da normativa do método tradicional com adaptações de forma a seguir o método do multiestágio.

RAHMAN *et al.* (2022) conseguiu aplicar um modelo de previsão da deformação acumulada em materiais granulares após estes terem sido submetidos ao ensaio de deformações, o que indica que embora o método não seja previsto por normas convencionais, existem maneiras de se estabelecer uma equação que representa de forma próxima os resultados obtidos pelo método do multiestágio. Ainda assim, existem limitações no que diz respeito a utilização destes parâmetros para simular o dimensionamento do pavimento.

A impressão dada é de que existem simultaneamente benefícios e limitações na escolha do método a se utilizar. Para a realização de uma análise detalhada e tradicional, calculando-se parâmetros de regressão para ajudar na análise, ainda aparenta ser necessária realização do ensaio pelo método do estágio único. Contudo, os bons

resultados encontrados em diversas experiências com o método do multiestágio, inclusive existindo modelos que permitem uma boa correlação de dados, indicam que ele pode ser útil para análises simplificadas e para a comparação entre diferentes misturas.

Nesse sentido pode ser positiva a realização dos ensaios de multiestágio para análises de seleção e escolha de material por exemplo, permitindo uma comparação adequada entre distintas amostras. Ao se definir a amostra mais favorável e com o desejo de seguir por análises específicas de dimensionamento, o método de estágio único se torna mais indispensável. De forma que é possível que o método do multiestágio se apresente como uma opção mais interessante para um estudo de caráter mais comparativo entre as misturas que serão determinadas para o estudo desta dissertação.

ULLAH *et al.* (2022) nota que em ensaios feitos sobre material asfáltico reciclado, a magnitude da deformação permanente acumulada nos dois métodos ao fim da aplicação do mesmo estágio de tensões é inevitavelmente distinta. No entanto, a resposta do *shakedown* – mecanismo voltado para análise da tendência de acomodação estrutural da mistura - foi similar independentemente do ensaio. O que sugere que a análise do *shakedown* pelo método do multiestágio acaba por ser interessante de se observar, permitindo avaliar bem a tendência a longo prazo para cada par de tensão específico.

No entanto, as deformações acumuladas possuem a sua importância no que diz respeito à comparação de resultados entre materiais ou misturas distintos. A análise de *shakedown* segundo os autores permite a classificação em apenas 3 categorias apresentadas pela Figura 8: *Shakedown* Plástico; Fluência Plástica e Colapso Incremental. Já a análise das deformações acumuladas permite uma avaliação mais quantitativa entre diferentes materiais, permitindo uma comparação mais direta caso deseje-se realizar um processo de escolha de material.

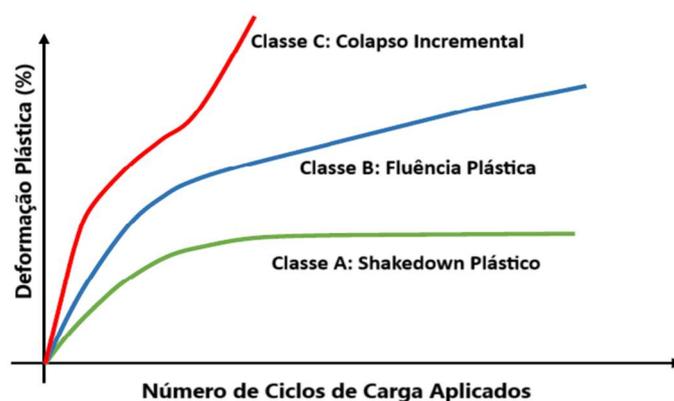


Figura 8 – Classificação do Comportamento de Shakedown. (Adaptado de ULLAH *et al.*, 2022)

FOUAD *et al.* (2021) adotou uma estratégia interessante para os ensaios de multiestágio. Os autores mantêm o valor da tensão confinante como fixa durante todo o processo, aumentando gradativamente apenas a tensão desvio. Como se quer obter valores acumulados de deformação, é necessário que cada estágio de tensões estimule deformações mais altas que o anterior para que se realize uma melhor análise. Ou seja, deve-se necessariamente aumentar a tensão desvio ou reduzir a tensão confinante para garantir esse efeito.

Por meio deste método, os autores avaliaram a deformação permanente acumulada em misturas contendo proporções variáveis de argila plastificante, nos teores de 0%, 1% e 2%. E conseguiram determinar em seis diferentes misturas que a deformação acumulada com o teor de 1% de argila foi sempre a mais reduzida em todas. O que evidencia a utilidade do método de um ponto de vista comparativo. Além disso, estes resultados de deformação permanente se alinharam com as conclusões obtidas pelos ensaios de módulo de resiliência realizados, os quais verificaram os mais altos valores de MR justamente para as misturas de teor de 1% de argila plastificante.

KAPOOR & JOHNSON (1992) define o conceito do fenômeno de *shakedown* como um processo em que carregamentos cíclicos ocorrem sob uma estrutura – tal qual uma camada de pavimento pode representar – estimulam deformações permanentes somente até uma certa quantidade de ciclos de carga pois a partir de certo momento é alcançado um estado estacionário no qual o comportamento do material passa a ser perfeitamente elástico.

CABRAL (2021) realizou ensaios de deformação permanente pelo método do multiestágio considerando-se 4 estágios de tensões consecutivos, cada qual com a aplicação de 10.000 ciclos de carga. Considera-se este método como razoável para a avaliação de *shakedown*, pois segundo SOLIMAN *et al.* (2015), é necessário ter os dados de deformação entre os ciclos de número N igual a 3.000 e 5.000. A adoção de ciclos por estágio igual a 10.000 permite que o total seja suficientemente grande para não ser tão próximo ao mínimo exigido de 5.000 ciclos e nem é tão grande de forma a estender o ensaio por mais de um dia em laboratório, o que ocorreria para o ensaio no método de estágio único.

SERRA (2020) considerou apenas dois grupos na classificação por *shakedown*, o *shakedown* plástico e o colapso incremental. Nesse contexto, é importante definir a fluência plástica como o acúmulo gradual e lento de deformações ao longo do tempo. Basicamente, não ocorre uma estabilização da deformação como é verificado no

shakedown, mas também não ocorre um colapso estrutural rápido da estrutura. No geral, as consequências da fluência estão mais ligadas com patologias relacionadas ao afundamento do pavimento ao longo do tempo, prejudicando a qualidade da estrutura embora não necessariamente impedindo o seu uso. A Figura 9 mostra um exemplo de como é este afundamento visualmente.



Figura 9 – Afundamento Plástico em Pavimento (CNT, 2018)

2.3.3. Aplicações de Outros Procedimentos

Tendo-se apresentado os estudos relacionados a procedimentos específicos, considera-se importante mencionar alguns estudos adicionais que foram consultados durante o estabelecimento do escopo desta dissertação, possuindo alguma influência para a compreensão teórica do tema ou de assuntos secundários relacionados.

GARCIA & SALAMANCA (2020) mensurou o módulo de resiliência de diferentes corpos de prova de solo-cimento e notou que a temperatura ambiente durante o processo de cura possui implicações sobre a variação da temperatura interna das misturas, afetando o módulo de resiliência. Mesmo que não se trabalhe com o cimento e nem seja realizado um processo de cura, é considerado ideal que a temperatura ambiente controlada seja utilizada como parâmetro fixo na moldagem dos corpos de prova e execução dos ensaios, sem a necessidade de utilização de estufa ou frigorífico para armazenar o material e alcançar temperaturas distintas.

No entanto, como não se tem uma ideia exata do efeito da adição do rejeito, é possível imaginar que poderia se verificar uma possível substituição de cimento por rejeito contribuiria para o endurecimento do material. Neste cenário, a temperatura poderia ter um impacto maior com a secagem do material e talvez haveria a possibilidade de se avaliar diferentes temperaturas de secagem, inclusive para fazer uma comparação com os resultados obtidos para solo-cimento segundo o autor.

RASHIDI *et al.* (2018) realizou uma pesquisa na qual se procurou estabelecer uma relação prática entre três importantes propriedades de materiais estabilizados com cimento: resistência à compressão não-confinada, resistência à tração indireta e o módulo de resiliência. Esse procedimento foi feito através de ensaios destinados para a medição de cada um destes valores para um conjunto de amostras e posterior tratamento estatístico de regressão para o estabelecimento de uma relação que através uma equação correlacionou estes valores, como se fossem variáveis que oferecessem uma previsão entre si.

A principal contribuição deste estudo se deu por apresentar a relação entre essas três propriedades como diretamente proporcionais entre si, de forma com que conclusões indiretas possam ser obtidas já por meio do ensaio de módulo de resiliência por si só. Considerou-se que a realização de outros ensaios como o de compressão simples ou de tração indireta seriam possivelmente redundantes tendo em vista uma execução de ensaios de ISC junto de ensaios de MR. Além disso, a verificação do ISC e do MR são procedimentos que se encontram mais previstos em normas brasileiras para base de pavimentos, de forma que foram considerados mais prioritários (DNIT 141, 2022a).

RUDNICK *et al.* (2020) realizou uma comparação entre o MR de quatro misturas distintas e concluiu que a granulometria possui efeito significativo, utilizando-se um teor de cimento de 6%. Como foi analisado um solo argiloso, os autores avaliam que a adição de pó de pedra na mistura argilosa poderia ser positiva para elevar o MR, evidenciando os benefícios de combinações de materiais de grãos finos com materiais granulares.

O estudo encontrou resultados baixos de MR para misturas contendo apenas o solo argiloso natural e o cimento, obtendo valores de cerca de 80 MPa. Já os resultados mais elevados foram obtidos para a mistura do solo argiloso com pó de pedra e cimento, chegando a valores de resiliência acima de 300 MPa. O que justificaria o uso do pó de pedra como um possível substituto do solo natural argiloso, da mesma forma que é possível que um rejeito de minério com granulometria fina por si só talvez não seja capaz de atingir resultados satisfatórios. Razão pela qual é necessário considerar algum tipo de estabilização para esta dissertação, seja ela de natureza química ou granulométrica ou ambas.

SILVA *et al.* (2019) encontrou valores de MR muito mais elevados com a incorporação de cimento em solo mais arenoso, o que reforçou as conclusões mencionadas por RUDNICK *et al.* (2020) em relação à granulometria do solo fino utilizado ser um fator

desfavorável. O MR obtido foi maior mesmo quando utilizado um teor de cimento mais reduzido de 3%, com valores acima de 200 MPa. Em cenários com maior adição de cimento e tempo de cura estendido, foi possível encontrar resultados de até mesmo acima de 1000 MPa.

Já em relação à ensaios de classificação MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), esta metodologia foi desenvolvida por NOGAMI & VILLIBOR (1995), que afirmam que o método surgiu da necessidade de superar as limitações importas por métodos de classificações tradicionais, que geralmente são voltados para solos de climas temperados que necessariamente possuem estruturas mineralógicas e composições químicas distintas de solos tropicais.

Sob este ponto de vista e pensando-se em otimizar o aproveitamento de solos típicos do Brasil, foi criado um método adaptado às condições locais que permite simultaneamente a realização de uma avaliação do comportamento mecânico e hidráulico de uma forma precisa e econômica que é favorável para a implementação de pavimentos de baixo custo. Essa avaliação é feita por meio da verificação do grau de compactação de miniaturas de corpos de prova, seguida de análise da suscetibilidade ao inchamento ou erosão por meio de imersão em água. Quanto maior é a perda de material após a imersão em água em ensaios MCT, maior é a tendência do material ser não-laterítico.

TAKEDA (2006) afirma que solos lateríticos podem apresentar resultados mais favoráveis de MR em comparação com solos granulares. Nesse sentido, é interessante que o procedimento de classificação em laboratório seja realizado para compreender se o rejeito obtido se comportaria como um solo laterítico. O mesmo procedimento de classificação seria recomendável para outros tipos de solos tropicais, caso venha a se misturar os rejeitos com outros tipos de solos por conta da necessidade de estabilização granulométrica. Caso o rejeito se comporte como um solo laterítico, é mais provável que isso contribua para a resiliência e maior resistência devido a características de solos lateríticos associadas à maior estabilidade natural e coesão, características desejáveis.

Solos lateríticos se caracterizam por serem ricos em óxidos de ferro e alumínio, que são resultantes de um processo chamado de laterização. A realização de ensaios MCT em rejeitos de minério de ferro é justificada pela presença do ferro em sua composição, de forma que talvez possam se comportar como lateríticos. No entanto, deve se ter em mente que diversos fatores podem influenciar essa classificação, de forma que não necessariamente o rejeito oferecerá um comportamento laterítico.

3. Metodologia Adotada

Para estabelecer como esta pesquisa deveria ser realizada, foi estabelecido um plano experimental contendo todos os procedimentos a serem executados e as normas ou referências que seriam utilizadas como base ou guia para todos os processos seguidos. Estes processos foram divididos em duas fases por razões de planejamento e organização pois estes ao todo se mostraram extensos no geral.

A primeira fase consiste na execução de ensaios de caracterização e o processo de dosagem dos materiais utilizados, aqui referidos nessa pesquisa como ensaios iniciais. Estes procedimentos não representam o foco do estudo que é proposto, mas são necessários de serem feitos para que o objetivo possa ser alcançado. Já a segunda fase representa os ensaios aqui chamados de principais por serem o foco de atenção da análise que se deseja fazer, sendo métodos mais diretamente relacionados com o desempenho mecânico de materiais de pavimentação.

A segunda fase é a que efetivamente procura atender de forma mais direta os objetivos traçados, com os ensaios mecânicos possibilitando a comparação entre misturas e a determinação de teores “ótimos” de rejeito. Enquanto a primeira fase proporciona um suporte para a execução da segunda. A Tabela 3 apresenta um resumo da pesquisa como um todo, com a indicação dos procedimentos presentes em cada fase. Os subcapítulos a seguir se aprofundam de uma forma mais detalhada no passo a passo geral de cada processo, focando-se nas atividades que foram efetivamente realizadas em laboratório.

Tabela 3 – Resumo da Metodologia Adotada

Fase	Ensaios Realizados
Fase 1	<ul style="list-style-type: none">• Ensaio Granulométrico (Peneiramento + Sedimentação)• Ensaio de Massa Específica dos Grãos• Ensaio de Limites de Atterberg• Ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX)• Ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)• Ensaio de Classificação MCT• Processo de Dosagem pelo Método Bailey
Fase 2	<ul style="list-style-type: none">• Ensaio de Compactação• Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC)• Ensaio Triaxial de Módulo de Resiliência (MR)• Ensaio Triaxial de Deformação Permanente (DP), seguindo o método do Multiestágio

3.1. Fase 1 – Plano Experimental

A Tabela 4 contém o plano experimental da Fase 1 com mais detalhes, com a descrição da função dos ensaios que foram realizados e as principais normativas que foram utilizadas como base ao guiar a execução de cada item. Embora a Fase 1 se trate de procedimentos de caracterização no qual os ensaios necessitam apenas uma quantidade limitada do material para avaliação, especificamente para os procedimentos de MCT e Método Bailey foi necessária a moldagem de corpos de prova, com o quantitativo de ensaios estando descrito na explicação específica de cada processo.

A função desta primeira fase é proporcionar uma maior compreensão dos materiais com que se trabalhará o estudo, em especial o rejeito, assim como determinar a dosagem de diferentes misturas a serem avaliadas na segunda fase de ensaios. Isso permite que se entenda melhor a influência que é trazida pelo rejeito e compreender melhor como exatamente a sua adição seria benéfica ou prejudicial para as misturas, o que foi um dos objetivos traçados pela pesquisa. No entanto, essa informação obtida pelos ensaios da Fase 1 deve ser utilizada na interpretação dos resultados dos ensaios da Fase 2.

Tabela 4 – Plano Experimental da Fase 1

Ensaio	Função	Referências
Granulometria	Caracterização Física dos Materiais	ABNT NBR 7181/2016 (Solo – Análise Granulométrica)
Massa Específica dos Grãos		ABNT NBR 6458/2016 (Grãos de Pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm)
Limites de Atterberg		ABNT NBR 6459/2016 (Solo – Determinação do Limite de Liquidez) + ABNT NBR 7180/2016 (Solo - Determinação do Limite de Plasticidade)
Fluorescência de Raios-X (FRX)	Caracterização Química do Rejeito	Feito com o auxílio do Laboratório de Materiais NUMATS (COPPE - UFRJ)
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Caracterização Mineralógica do Rejeito	Feito com o auxílio do Laboratório de Materiais NUMATS (COPPE - UFRJ)
Classificação MCT	Caracterização Geotécnica do Rejeito	DNIT 259/2023 CLA (Solos – Classificação de Solos Finos Tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação)
Método Bailey	Dosagem de Misturas avaliadas na Fase 2	VAVRIK et al. (2002) + TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2002) + DNIT 437/2022 (Agregados – Determinação da Massa Unitária e do Volume de Vazios de Agregados em estado solto e compacto – Método de Ensaio)

3.1.1. Obtenção e Preparação dos Materiais

Os materiais foram obtidos de diversas origens distintas, de forma a favorecer a combinação de misturas com granulometrias variadas. O Rejeito de Minério de Ferro utilizado adveio de uma doação realizada pela mineradora Mineração Morro do Ipê, localizada em Minas Gerais na região do quadrilátero ferrífero, entre os municípios de Brumadinho, Igarapé e São Joaquim de Bicas. Como a atividade de processamento de minério de ferro é bem mais comum no estado, foi necessário solicitar o transporte do rejeito de Minas Gerais para o laboratório LESFER/COPPE, no Rio de Janeiro.

O transporte foi realizado com mais de 10 kg de material ensacado separadamente, todos lacrados. O rejeito se encontrava em um estado úmido no geral, tendo sido necessário realizar procedimentos de secagem – tanto ao ar livre quanto com o auxílio de estufa de laboratório – seguidos de trituração do material pois este após secagem tinha os seus grãos unidos em torrões. Esse processo de secagem seguida de trituração foi feito de forma gradual ao longo de toda a pesquisa de acordo com a necessidade do uso do rejeito.

A ABNT NBR 6457 (2024) foi usada como uma referência auxiliar na preparação dos materiais para os ensaios de caracterização e compactação. Nela, são especificados o almofariz e mão de gral recoberta de borracha, que foram usados para a pulverização dos torrões de rejeito. Outros aparelhos especificados pela norma que foram utilizados foram as balanças com capacidades de 20 kg e de 1 kg. A primeira foi mais utilizada para pesagem de corpos de prova moldados no geral, enquanto a segunda teve uso mais frequente na obtenção de dados de umidade medidos por meio de amostras que eram armazenadas em cápsulas para secagem na estufa.



Figura 10 – Balanças utilizadas para pesagem de materiais ou de amostras

Além do rejeito fino, foram também obtidos os agregados graúdos, que vieram de origens distintas. A Brita 1; Brita 0 e Pó de Pedra foram obtidos por meio de doação da Usina de Asfalto do Caju, na cidade do Rio de Janeiro. Além da doação, a usina possui laboratório próprio que avalia o Desgaste de Abrasão Los Angeles para se assegurar da qualidade das britas que utilizam, de forma que estes materiais obtidos possuíam sua qualidade certificada em relação a este parâmetro, em conformidade com especificações existentes de abrasão abaixo de 55% (DNIT 141, 2022a).

Durante o processo de dosagem pelo Método Bailey, se notou na prática a necessidade da presença de um material de granulometria intermediária em relação às britas e o pó de pedra que havia sido obtido. Por esse motivo, foi buscada a Areia Grossa por meio da empresa Petra Agregados, localizada no município de Queimados no Rio de Janeiro. A doação contribuiu para facilitar a gradação granulométrica durante o processo de dosagem.

Por fim, a Areia Média foi obtida em lojas de materiais de construção por se tratar de um produto mais comum e comercialmente acessível. Foram adquiridos sacos de areia da marca “*Ensacadinho*” que continham o material lavado, sendo necessário o uso de estufa para a secagem do material. Este material teve a função de oferecer uma segunda alternativa ao pó de pedra, pois suas granulometrias apesar de distintas foram mais próximas entre si. Todos os materiais foram armazenados dentro de sacos em laboratório, em local seco e seguro para evitar a contaminação com outros elementos. A secagem em estufa geralmente era feita aproximadamente em por volta da temperatura de 100°C.



Figura 11 – Estufa utilizada para Secagem de materiais

3.1.2. Ensaio de Granulometria

O principal ensaio de caracterização física a ser destacado é a análise granulométrica, realizada para todos os materiais obtidos. Este ensaio de granulometria é dividido em uma etapa de peneiramento e uma outra de sedimentação voltada para grãos finos que passam na peneira de 0,075 mm. Como o rejeito de minério de ferro é o único material de natureza fina utilizado, foi o único que precisou da execução da etapa de sedimentação.

O procedimento da etapa de peneiramento se baseou em dois conjuntos de peneiras que consistiram no peneiramento grosso (peneiras de aberturas entre 50 mm e 2 mm) e peneiramento fino (peneiras de aberturas entre 1,2 mm e 0,075 mm). Cada peneiramento foi feito de maneira manual ou com auxílio de agitador mecânico quando possível, sendo registrados os valores de massa que eram retidos em cada peneira ao fim do procedimento. O conjunto completo de peneiras é o mesmo que se encontra descrito na ABNT NBR 7181 (2016a).

Já a etapa de sedimentação, feita somente para o rejeito de minério de ferro, consistiu na separação de cerca de 70 g de rejeito, o qual foi misturado com cerca de 125 cm³ de hexametáfosfato de sódio e deixado em repouso por cerca de 24 h. Após esse período, o material foi vertido em um copo de dispersão para submissão da ação do aparelho dispersor por cerca de 15 minutos e transferido para uma proveta na sequência, adicionando-se água destilada. Seguindo-se os princípios na ABNT NBR 7181 (2016a) para garantir a agitação da mistura, com o auxílio de um densímetro imerso na solução são feitas sobre ele leituras em períodos pré-determinados de tempo. Com estas leituras, foi possível pelas orientações da norma calcular por meio de fórmula indicada pela normativa a porcentagem e o diâmetro das partículas de solo em suspensão, correspondentes aos grãos mais finos.

3.1.3. Ensaio de Massa Específica

A ABNT NBR 6458 (2016b), apesar de ter em seu título a descrição de ser destinada apenas para a determinação da massa específica de grãos retidos na peneira de 4,8 mm, também contém um anexo que orienta o procedimento para grãos que passam por esta peneira. Pelo primeiro método se avaliou as britas ou composições de britas utilizadas no Método Bailey de dosagem, enquanto no segundo avaliou-se somente o rejeito em si.

No primeiro método, foi feita a imersão dos pedregulhos em água destilada enquanto se encontravam em uma bandeja e dentro de 24 horas, retirou-se esse material para secagem

do excesso superficial de água e definição da massa saturada. As britas também foram imersas em água destilada dentro de um recipiente para pesagem da massa imersa do material. Por fim, este é seco em estufa para determinar a massa seca. Com estes três valores foi possível estabelecer a massa específica e adicionalmente a massa específica aparente que é necessária em uma das etapas de dosagem pelo Método Bailey.

No segundo método adotado somente para o rejeito, cerca de 50 g de rejeito foi misturado com água destilada, com uso de um dispersor para garantir a dispersão do material. Em seguida, a mistura foi transferida para picnômetros que foram aquecidos por meio de um forno por indução por cerca de 20 minutos para a fase de ebulição. Ao final do processo e seguindo as orientações específicas da ABNT NBR 6458 (2016b), a massa dos picnômetros foram medidos, assim como o valor de suas temperaturas, o que também permitiu a definição da massa dos picnômetros cheios de água com base na tabela de referência apresentada pela norma. Estes valores em conjunto permitem definir a massa específica do material.

3.1.4. Ensaio de Limites de Atterberg

Os limites de liquidez e de plasticidade são determinados por procedimentos distintos, cada um possuindo uma normativa específica. Ambos foram executados somente para o rejeito de minério de ferro pois os materiais granulares utilizados não possuem coesividade para os ensaios serem executados.

A ABNT NBR 6459 (2016c) estabelece o processo de definição do limite de liquidez, feito através da mistura de cerca de 100 gramas de rejeito que é homogeneizado com água destilada até formar uma mistura pastosa. Esse material é transferido para a concha de um aparelho chamado Casagrande de forma que a espessura deste material seja de cerca de 10 mm no centro da concha. Com um cinzel, é executada uma ranhura perpendicularmente à concha para dividir o material ao meio, para em seguida ligar o aparelho e deixar a concha cair em queda livre sucessivamente em uma velocidade de cerca de 2 golpes por segundo. Anota-se o número de golpes necessário para fazer com que os dois lados do material na concha sejam unidos.

Esse processo é repetido para diferentes valores de umidade do material, de forma a se encontrar um resultado próximo de 35 golpes. Foram garantidos um mínimo de 5 pontos de ensaio distintos por essa razão, determinando-se por interpolação o valor de umidade correspondente a um total de 35 golpes. Este valor de umidade é o limite de liquidez.

Já em relação ao limite de plasticidade, a ABNT NBR 7180 (2016d) também indica a mesma formação de uma pasta com a mistura do solo com água destilada, de consistência plástica. Após este preparo se forma uma bola do material, que é rolada sobre uma placa de vidro esmerilhada até a formação de um cilindro do material de 3 mm de diâmetro.

A umidade medida é a do material quando o cilindro atinge este diâmetro, sendo retirados 5 pontos de ensaio, embora apenas 4 tenham sido considerados ao final por atenderem as especificações da norma. A média dos valores de umidade medidos é considerado o limite de plasticidade e em conjunto com o limite de liquidez, ambos permitem definir o índice de plasticidade do rejeito de minério.

3.1.5. Ensaio de Caracterização Química e Mineralógica

Estes procedimentos foram ambos feitos com o auxílio terceirizado do laboratório do NUMATS, da COPPE/UFRJ, tendo em vista a necessidade de equipamento específico. Para o ensaio de caracterização química por fluorescência de Raios-X (FRX), foi utilizado um aparelho EDX-7200 para se obter os valores quantitativos da composição química do rejeito, que é expressa em % de massa seca e calculada por meio de óxidos.

A espectrometria por fluorescência de Raios-X se baseia basicamente na irradiação de raios-x sobre uma amostra de rejeito de minério de ferro, o que estimula os átomos deste material a emitirem “Raios-X fluorescentes” como reação e estes possuem comprimento de onda e energia específicos de acordo com os elementos atômicos, o que permite definir quais elementos estão presentes e também estimar o quantitativo da composição química por meio do total de Raios-X verificados em cada comprimento de onda específico de cada elemento.

Já o ensaio de caracterização mineralógica por microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizado por meio do equipamento Hitachi TM-3000 e se baseou na obtenção de imagens ampliadas de uma amostra de rejeito de minério de ferro, variando entre ampliações de 500 a até 3000 vezes da superfície real da amostra e permitindo uma análise das estruturas morfológicas dos grãos. Além disso, o equipamento também possibilita a realização de uma análise química de áreas específicas de grãos selecionados, com o mapeamento dos elementos presentes na superfície dos grãos analisados.

O MEV funciona por meio da geração de um feixe de elétrons (geralmente um filamento de Tungstênio) por efeito termoiônico, que são consequentemente acelerados e direcionados em um feixe fino. Este é focalizado por um conjunto de lentes

eletromagnéticas e bobinas de deflexão faz a varredura da superfície da amostra estudada. Quando o feixe de elétrons atinge a amostra, ocorre uma série de emissões de sinais devido a interação da amostra com os elétrons, que são reconhecidos por detectores especializados. Estes sinais detectados são enviados para o computador que com auxílio de um software sincroniza estes dados com a varredura para gerar a imagem (COSTA, 2016), que por fim é exibida na tela de um computador e salva.

3.1.6. Classificação MCT

O Ensaio MCT (Miniatura, Compactado, Tropical) é dividido em duas principais etapas. Estas são o ensaio de compactação por mini-MCV e o ensaio de perda de massa por imersão em água segundo o DNIT 259 (2023b). Já o passo a passo detalhado para cada um destes procedimentos é explorado pela norma DNIT 258 (2023a).

Para o procedimento do mini-MCV, separou-se 200 g do rejeito de minério de ferro que com auxílio do funil foi colocado dentro de um molde encaixado no pistão inferior do equipamento de compactação do mini-MCV, estruturado seguindo o modelo estabelecido pela normativa e representado pela Figura 12.



Figura 12 – Modelo do Aparelho de Compactação Mini-MCV

Um disco de polietileno se encontrava dentro do molde antes da introdução do material. Após a nivelção do rejeito com auxílio de um assentador, foi introduzido um segundo disco sobre o topo do material e em seguida iniciado o processo de compactação. Com um soquete leve sendo colocado logo acima do disco superior, foi estabelecida a medida de golpe zero que funciona como controle para verificar o afundamento causado pelas medidas seguintes.

Em seguida, são aplicados golpes sucessivos com o soquete e mede-se o afundamento correspondente para certos valores fixos de golpes, na ordem de 2^n e de $3 * 2^n$. Existem diversos critérios de parada estabelecidos pela norma, embora na prática 4 dos 5 moldes realizados pela compactação pararam somente ao atingir a marca limite de 256 golpes. Somente um único molde, de maior valor de umidade, teve a compactação pausada por conta de uma diferença inferior a 2 mm em golpes de número $4n$ e n .

Já em relação ao ensaio de perda de massa por imersão, os materiais foram extrudados para fora do molde cilíndrico em cerca de apenas 10mm. Em seguida, dentro de uma grande bacia com água, os cinco moldes com material parcialmente extrudado foram colocados horizontalmente sobre um suporte, onde foram deixados por cerca de 20 horas. Após este período, o cilindro foi retirado da água para medição do que restou do rejeito no cilindro após imersão.

Os resultados destes procedimentos permitem o cálculo de distintos parâmetros que permitem a classificação MCT do rejeito. Estes parâmetros e os processos de cálculo executados serão expostos no capítulo voltado para a apresentação de resultados.

3.1.7. Método de Dosagem Bailey

O método de dosagem Bailey é uma técnica voltada para o projeto e dosagem de misturas asfálticas empregadas na pavimentação. No entanto, com a finalidade de elevar a densidade das misturas utilizadas em base ou sub-base de pavimentos, escolheu-se adotar os conceitos deste método mesmo que as misturas não sejam asfálticas. Isso porque o método se baseia na otimização da distribuição granulométrica, estimulando um menor número de vazios e conseqüentemente uma mistura mais compacta, o que é algo positivo para uma melhor estabilidade. Como esta pesquisa se trata de uma mistura que não é asfáltica, se considera realizada uma adaptação do método ainda que os procedimentos estabelecidos por VAVRIK et al. (2002) tenham sido praticamente mantidos. Para complementação, foram também utilizadas como referências a TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2002) e a DNIT 437 (2022b) ainda que de uma forma auxiliar.

Basicamente, o método consiste na divisão dos agregados utilizados em duas categorias: grãos e finos. Os grãos possuem a finalidade de formar a estrutura principal da mistura enquanto os finos devem ocupar os vazios determinados pelos espaços deixados entre os grãos grãos e aumentando a densidade das misturas graças ao intertravamento das partículas e possuindo efeitos positivos para uma maior resistência.

O método foi adotado justamente pensando em otimizar os resultados de DP pois em uma mistura com menor proporção de vazios é natural que haja uma menor espaço para a estrutura se deformar permanentemente. Como existe a possibilidade de o rejeito ser um material prejudicial, a otimização da resistência também poderia contribuir para o aproveitamento de uma quantidade maior de rejeito.

O procedimento ao todo contém diversas etapas de cálculo, que são efetivamente descritas passo a passo no capítulo de resultados. No entanto, o processo exigiu um breve procedimento laboratorial antes, voltado para a definição de alguns parâmetros utilizados na fase de cálculo. Este teve o objetivo de definir os valores de massa unitária solta e compacta e foi seguida a norma DNIT 437 (2022b) para esse procedimento.

Basicamente, utilizando-se recipientes cilíndricos de dimensões indicadas pela norma, foi preenchido este recipiente com os conjuntos de agregados de todas as misturas consideradas. Estes conjuntos para cada mistura se dividem em dois, com o conjunto correspondente à fração graúda da mistura sendo denominado “Composição A” e o correspondente à fração fina sendo a “Composição B”. Para todas as composições, o material colocado dentro do recipiente foi pesado e tendo o volume do recipiente, é possível calcular a massa específica solta de cada composição. Ao final, se totalizaram 4 ensaios por este modo considerando duas composições para duas misturas distintas.

A massa específica compactada segue o mesmo procedimento, especificado em DNIT 437 (2022b), com a distinção que o material é compactado em três camadas de mesma altura cada utilizando uma haste de compactação, tendo sido aplicados cerca de 25 golpes por camada. Ao final, o material no recipiente é pesado para assim determinar a massa específica compactada, totalizando 4 ensaios também por este modo. Este, no entanto representa apenas um procedimento necessário de ser feito para se dar início ao processo de dosagem, que envolve uma série de cálculos envolvendo também a distribuição granulométrica dos agregados. Pelo fato de o método Bailey possibilitar apenas a combinação de dois agregados junto do *filler* - que no caso seria o rejeito – por essa razão foi necessário estipular as composições que basicamente representam uma mistura dos materiais granulares utilizados.

Apesar do procedimento de cálculo ser considerado uma adaptação do método para misturas não-asfálticas, ele seguiu semelhante sistemática do método concebido por VAVRIK et al. (2002). A partir do tamanho nominal máximo dos grãos de cada composição, foi possível estabelecer peneiras de controle primária, secundária e terciária.

Estas peneiras são fundamentais para dividir as partículas em grupos de grãos graúdos ou de finos e até mesmo subcategorias, como por exemplo a fração grossa dos grãos finos. Isso permite que o cálculo defina o percentual adequado de grãos graúdos que formam a estrutura da mistura e a proporção de grãos finos que deve existir para preencher o vazio entre estes. O passo a passo mais detalhado de todo o procedimento se encontra no capítulo 5 com os resultados.

3.2. Fase 2 – Plano Experimental

A Tabela 5 apresenta o plano experimental da Fase 2 por completo, além do quantitativo específico de corpos de provas moldados e ensaios realizados tendo em vista que esta fase se concentra na análise das misturas em si, determinadas ao final da Fase 1. Estes ensaios desta possuem uma natureza mais voltada de analisar o desempenho das misturas em si, possibilitando a comparação entre variadas misturas.

Este plano experimental atende aos objetivos traçados de comparar diferentes parâmetros técnicos entre si e avaliar se a adição de rejeito traria algum benefício na pavimentação sob o ponto de vista da viabilidade técnica, sem o uso de cimento justamente para avaliar o impacto apenas do rejeito como material em si.

Tabela 5 – Plano Experimental da Fase 2

Ensaio	Quantitativo	Referências
Compactação Proctor	8	DNIT 443/2023 (Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio)
Índice de Suporte Califórnia (ISC)	8	DNIT 172/2016 (Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio)
Módulo de Resiliência (MR)	8	DNIT 134/2018 (Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio)
Deformações Permanentes pelo Método do Multiestágio	24	Adaptado de DNIT 179/2018 (Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de ensaio)

Optou-se por adotar uma análise que focasse nos ensaios mecânicos mais frequentemente utilizados para materiais granulares no Brasil. O ensaio de ISC funciona neste plano como um parâmetro para avaliar onde cada material poderia ser utilizado, devido aos valores mínimos de ISC estipulados pelo DNIT 141 (2022a). Já os ensaios de MR e de DP permitem avaliar o comportamento a cargas repetidas, simulando condições que são

observadas na prática. Dessa forma, é possível comparar o desempenho de diferentes misturas e determinar o efeito da adição de rejeito levando-se em consideração questões de longo prazo pois as deformações, por exemplo, se acumulam com o tempo e podem se estabilizar ou não.

Estes ensaios centrais foram precedidos pelo Ensaio de Compactação Proctor com a finalidade de determinar a umidade ótima para todas as misturas que foram determinadas após o final da Fase 1 do plano experimental, além de avaliar os resultados de Massa Específica Seca máxima alcançados como indicativo das misturas mais compactas.

3.2.1. Ensaio de Compactação Proctor

Foram executados ao todo um total de oito ensaios de compactação na energia modificada visando uma avaliação de uma possível viabilidade de uso das misturas em bases ou sub-bases de pavimentos, razão pela qual se adotou uma energia maior. Após a execução dos ensaios, os materiais utilizados foram descartados, sem a necessidade de reutilização

Utilizando-se o cilindro tripartido de diâmetro de 10 cm indicado pela DNIT 443 (2023c) como molde, eram separados no geral cerca de aproximadamente 5 kg de material dosado e seco (após dosagens definidas a partir do método Bailey) para serem utilizados nos ensaios de compactação. A partir daí era adicionada água em cada mistura em uma quantidade arbitrária, mas garantindo-se que o material continuasse predominantemente seco. Essa quantidade de água representa o ponto inicial de umidade analisado, tendo sido executados ao longo de um único ensaio um mínimo de 5 pontos de umidades distintas para cada mistura por meio da repetição do processo completo aqui descrito.



Figura 13 – Equipamento Mecânico de Compactação

Com água adicionada, a mistura era introduzida dentro do cilindro para compactação em 10 camadas separadas, sendo adotados 56 golpes por camada. Foi utilizada em todas as compactações nesse cilindro um soquete leve de 2,5 kg em um aparelho de compactação mecânico, com altura de queda de aproximadamente 30 cm. O equipamento utilizado pode ser observado na Figura 13, enquanto o molde tripartido se encontra na Figura 14.



Figura 14 – Cilindro Tripartido de 10 cm de diâmetro

A variação da umidade entre cada ponto avaliado por ensaio não necessariamente foi constante, se adaptando às necessidades práticas observadas pois algumas misturas apresentavam comportamentos mais variáveis com mais umidade ou menos dependendo do caso. Mas no geral, tentou-se trabalhar dentro de uma variação de 5% de umidade entre o ponto no ramo mais seco e o ponto no ramo mais úmido para cada mistura, ainda que exceções tenham sido necessárias a depender da curvatura da curva de compactação.

Foram adotados ao todo 5 pontos de umidade por ensaio de forma a garantir uma alta correlação entre os dados e esses valores de umidade foram determinados por meio de uma coleta de amostra do material, cinco vezes por ponto de umidade e sendo estabelecida uma média aritmética entre estes cinco valores para cálculo da umidade adotada.

A massa específica seca em cada ponto foi determinada pelo método de cálculo previsto pela norma DNIT 443 (2023c), baseando-se na massa úmida do corpo de prova após compactação; no volume aparente deste corpo de prova e nos valores de umidade efetivamente mensurados por meio da coleta de amostra após secagem na estufa.

3.2.2. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Enquanto todos os outros procedimentos na Fase 2 utilizaram o cilindro tripartido como referência na moldagem dos corpos de prova, o ensaio de ISC se mostrou sendo uma exceção por exigir um cilindro de tamanho maior, com diâmetro de cerca de 15 cm (DNIT 172, 2016).

Ainda assim, foram utilizadas como referência no processo de moldagem os valores de umidade ótima que foram obtidos ao final do ensaio de compactação Proctor, com o objetivo de se manter um parâmetro de comparação igual em todos os ensaios de forma que a umidade deve ser a mesma em todos. Um exemplo de cilindro maior utilizado especificamente para os ensaios de ISC pode ser visto pela Figura 15.



Figura 15 – Cilindro Grande de 15 cm de diâmetro

A compactação é executada conforme orientações da norma DNIT 172 (2016), utilizando-se um disco espaçador no fundo do cilindro e havendo 5 camadas aplicadas com 55 golpes por camada. Foi utilizado um soquete mais pesado para a compactação, de 4,5 kg e altura de queda de 46 cm.

Após a compactação, o disco espaçador é removido e o molde cilíndrico é invertido de modo a fazer com que o topo do material compactado seja a nova base. Sobre o molde cilíndrico é então fixado um tripé onde se encontra um extensômetro, para leitura da ocorrência de expansão ou retração do material que junto do molde é completamente imerso em água por um período de 4 dias (Figura 16). A norma menciona a leitura a cada dia do extensômetro diariamente, mas essa leitura constante não foi sempre possível de

ser praticada, de forma que foi mensurada apenas a leitura ao final de 4 dias. O que não se mostrou um problema pois como as misturas utilizadas são predominantemente materiais granulares, o que se verificou nos casos geralmente era estabilidade ou uma mínima retração sem relevância causada pelo assentamento dos grãos.



Figura 16 – Imersão em água por 4 dias

Em seguida após todo o período de imersão, os moldes com as misturas são retirados da água e é removido também o excesso de água sobre o topo do corpo de prova que se encontra dentro do molde. O molde então é levado para uma multiprensa para a realização do ensaio de penetração sobre o corpo de prova, com a multiprensa calculando automaticamente o valor do indicador ISC. Este equipamento de penetração está representado na Figura 17.



Figura 17 – Prensa utilizada para a penetração

O valor de ISC é basicamente o valor da pressão medida pelo equipamento em relação à pressão padrão estabelecida pela norma, expresso em percentagem. Foram consideradas como referências de cálculo as penetrações de 2,54 mm e 5,08 mm para definição do valor de ISC, adotando-se o maior ISC dentre estes dois valores de penetração específicos.

3.2.3. Ensaio de Módulo de Resiliência

O processo de compactação de corpo de prova para este ensaio segue as mesmas diretrizes adotadas no ensaio de compactação Proctor. Após a moldagem do corpo de prova a partir da umidade ótima definida para a mistura específica, é preciso preparar ele para que possa ser inserido no equipamento dinâmico triaxial. Nesse equipamento é executado o ensaio de resiliência, que avalia a capacidade da amostra de recuperar a sua forma original após a aplicação de carregamentos cíclicos.

O corpo de prova é colocado sobre uma base cilíndrica e em seguida encamisado por uma membrana de látex para então ser transferido para a base do equipamento triaxial, sendo colocadas pedras porosas e papel filtro tanto no topo quanto na base da mistura. A membrana ajuda a fixar o corpo de prova por baixo na base de apoio do triaxial e por cima no cabeçote que é conectado com os aparelhos LVDTs (*Linear Variable Differential Transformers*), responsáveis por fazer as leituras referentes aos deslocamentos do corpo de prova que são medidos ao longo do ensaio.

Após a instalação e fixação do corpo de prova e de todos os elementos necessários para isso, que podem ser encontrados em DNIT 134 (2018a), a câmara triaxial é fechada e lacrada, de forma a garantir que não ocorra perda de pressão durante o ensaio. O pistão de carga é responsável pela aplicação de cargas cíclicas após o início do ensaio, sendo aplicados diferentes valores de tensão desvio, mas também de tensão confinante que se encontram estabelecidos na norma mencionada. São aplicados ao todo 21 pares de tensão (σ_3 ; σ_d) por ensaio, 3 destes referentes somente às fases de condicionamento para estabilização, com 500 repetições aplicadas nestas fases (DNIT 134, 2018a).

Já os outros 18 pares de tensões correspondentes à determinação do MR em si e não existe um número de repetições exato a ser feito, mas o mínimo é de 10 repetições por par. Em casos que são necessários mais de 10 repetições de carga, o aparelho triaxial e o programa instalado prosseguem com o ensaio naturalmente de forma automática na tentativa de calcular o MR, sem a necessidade de especificar um número de repetições a ser seguido, isso ocorreu no geral com maior frequência somente para o primeiro par de tensões. Em

todo o procedimento foi adotada a frequência de 1 Hz para a aplicação dos ciclos de carga, considerando-se uma sequência de tensões para uso em base de pavimentos.

Tabela 6 – Pares de Tensão utilizados no ensaio de Módulo de Resiliência

Fase	Tensão Confinante (MPa)	Tensão Desvio (MPa)
Condicionamento	0,070	0,070
		0,210
	0,105	0,315
Principal	0,020	0,020
		0,040
		0,060
	0,035	0,035
		0,070
		0,105
	0,050	0,050
		0,100
		0,150
	0,070	0,070
		0,140
		0,210
	0,105	0,105
		0,210
		0,315
	0,140	0,140
		0,280
		0,420

A Tabela 6 apresenta todos os pares de tensões medidos pelos ensaios (DNIT 134, 2018a) embora os pares relativos à tensão confinante mais baixa, igual a 0,02 MPa, não tenham sido considerados na análise final dos resultados por reduzirem consistentemente em todas as amostras a correlação dos dados. Frequentemente se observava que o equipamento precisava de um número de ciclos mais alto no primeiro par de tensão para calcular os valores de MR, enquanto nos seguintes era mais comum somente o mínimo estipulado pela norma de 10 ciclos ser necessário. Isso também serviu como base para não considerar na análise final os resultados correspondentes a uma tensão confinante de 0,02 MPa, com estes sendo descartados.

Já a Figura 18 apresenta o equipamento triaxial que foi utilizado tanto para os ensaios de MR quanto para os ensaios de DP executados na pesquisa.



Figura 18 – Equipamento triaxial para aplicação cíclica de cargas

3.2.4. Ensaio de Deformações Permanentes

O procedimento de preparação e montagem do equipamento e acessórios deste ensaio é semelhante ao seguido para o ensaio de MR pois se trata do mesmo equipamento triaxial sendo utilizado. A instalação do corpo de prova moldado dentro da câmara cilíndrica, pode ser vista com mais detalhes na Figura 19.



Figura 19 – Corpo de Prova envolto por membrana látex, no equipamento triaxial

A diferença principal em relação ao ensaio anterior se deve somente ao diferente método de coleta de dados selecionado no próprio equipamento. A norma DNIT 179 (2018b) teve a finalidade de ser a principal referência na condução do ensaio, mas se trata de uma metodologia voltada para a lógica de estágio único. Apesar de esta ser a padronização mais estudada e recomendada por essa razão, optou-se por seguir o método do multiestágio para os fins desta pesquisa, de forma que adaptações foram tomadas em relação a esta norma.

As razões pela qual se optou pelo método do multiestágio foram variadas. A primeira destas se baseou na economia de recursos de materiais, pois pela referência seguida seriam necessários nove ensaios por mistura, número que foi reduzido para três. Como muitos dos procedimentos na prática levaram tempo, inclusive sendo necessário refazer muitos durante o processo de aprendizado, ainda mais materiais que o previsto foram utilizados de forma que poderia não haver agregados o suficiente para o procedimento do estágio único. Mas outra razão é de que o método do multiestágio é mais representativo da realidade ao apresentar pares de tensão variáveis que se alteram no tempo sobre a mesma amostra, com deformações que se acumulam para vários pares de tensões.

Outra vantagem importante considerada foi de que na realização de testes, foi verificada a possibilidade de variabilidade de resultados entre uma mesma mistura aplicada sobre o mesmo par de tensão. Se fossem necessários 9 ensaios por mistura, o grau de incerteza na correlação entre os resultados também seria maior por conta do maior número de ensaios realizados. Ao se fazer apenas 3 ensaios por mistura, muitas vezes foi possível refazer os ensaios para possibilidade de confirmação dos dados. Em poucos casos em que os resultados foram significativamente distintos, fez-se uma terceira avaliação para validação, ao final sendo adotado o valor de apenas um dos ensaios por se julgar que o resultado significativamente distinto não era representativo e fazer uma média prejudicaria uma boa análise.

Ou seja, houve a preocupação em minimizar ao máximo uma possível variabilidade de resultados entre corpos de provas iguais, tendo sido feita a escolha por maior certeza e exatidão no lugar da realização de maiores análises que o método do estágio único permitiria. Não foi possível realizar uma simulação do dimensionamento do pavimento por softwares voltados para essa finalidade por esta razão, pois são exigidos a definição de parâmetros de regressão tradicionais que somente podem ser calculados pelo método previsto na norma mencionada.

Ainda assim, o método do multiestágio é possivelmente o método mais adequado para a função de comparação de materiais e determinar qual destes seria efetivamente mais proveitoso em um cenário real de aplicação em pavimentos. Pode-se através dele comparar uma quantidade maior e mais distinta de materiais para assim avaliar qual seria o mais interessante de ser escolhido.

Já o método do estágio único poderia ter uma finalidade melhor de análise mais detalhada da mistura escolhida, sem a necessidade de realizar todos os ensaios para todas as misturas. Esse ponto é uma questão que poderia ser considerada em desenvolvimentos futuros da pesquisa pois não foi possível incluir nesta pela limitação de material.

De qualquer forma, para o método do multiestágio adotado, optou-se por adotar tensões confinantes fixas para cada ensaio, com a tensão desvio gradativamente aumentando a cada 10.000 ciclos de carga. Considerou-se um total de quatro pares de tensões avaliados consecutivamente por corpo de prova, com três destes sendo valores previstos na norma DNIT 179 (2018b) e por essa razão foram considerados parâmetros alinhados com o que é efetivamente esperado para pavimentos. Já o quarto par de tensão vai além do previsto pela norma, representando uma situação de sobrecarregamento para verificar se pelo menos nesta situação ocorreria o colapso do material.

Cada conjunto de par de tensões dentro de um ensaio é chamado de estágio. Cada estágio é aplicado sobre os resultados do estágio anterior, resultando em uma situação acumulativa de deformações e que totaliza 40.000 ciclos de carga por ensaio, sob uma frequência de 2 Hz. O que faz o ensaio ao todo durar aproximadamente 6 horas ao todo somente com a operação do equipamento triaxial, sem contar com a fase de preparação da amostra. Além disso, diferentemente dos ensaios de MR, para os ensaios de DP não é necessária uma fase de condicionamento.

Os ensaios foram executados por estágio de forma consecutiva, com cerca de um ensaio feito durante o mesmo dia. Quando o equipamento triaxial finalizava um estágio, alterava-se as configurações de tensões de forma a representar o par de tensões do estágio seguinte e dava-se continuidade ao ensaio sem a necessidade de retirar o corpo de prova do aparelho, de forma que as deformações fossem cumulativas. No geral foi feita uma rodada inicial de ensaios teste para as misturas e uma segunda rodada cujos resultados obtidos foram os de fato adotados na pesquisa. Nos poucos casos de alta discrepância entre os resultados entre as rodadas, foi executada uma terceira rodada com a finalidade de confirmação de dados.

Após a realização dos ensaios e consolidações dos resultados de deformações permanentes acumuladas, foi feita uma avaliação da capacidade de adaptação às cargas pelas misturas. Utilizou-se o critério do *shakedown* para estimar a tendência de estabilização das deformações, baseando-se nas classificações propostas por SOLIMAN *et. al* (2015) e apresentadas em maior detalhe no capítulo voltado para a análise dos resultados.

A Tabela 7 indica os pares de tensões aplicados para cada mistura considerada, totalizando-se três ensaios para cada oito misturas distintas, o que totalizou 24 ensaios efetivamente aproveitados.

Tabela 7 – Pares de Tensão utilizados no ensaio de DP no Método do Multiestágio

Ensaio	Tensão Confinante	Tensão Desvio	Razão de Tensões (σ_d/σ_3)
1	0,040 MPa	0,040 MPa	1
		0,080 MPa	2
		0,120 MPa	3
		0,160 MPa	4
2	0,080 MPa	0,080 MPa	1
		0,160 MPa	2
		0,240 MPa	3
		0,320 MPa	4
3	0,120 MPa	0,120 MPa	1
		0,240 MPa	2
		0,360 MPa	3
		0,480 MPa	4

4. Resultados dos Ensaio Iniciais

Este capítulo apresenta os resultados de cada um dos procedimentos iniciais detalhados no processo metodológico, além de realizar uma análise sobre o significado destes. Cada ensaio e seus resultados específicos foram separados em subcapítulos para melhor organização.

Como uma grande quantidade de ensaios foram executados, realiza-se aqui uma separação entre os diversos ensaios iniciais que foram realizados para uma compreensão adequada dos materiais utilizados assim como para melhor definição dos parâmetros adotados no estudo, dos ensaios principais cujos resultados possuem relação mais direta com o objetivo desta dissertação.

Dentre os Ensaio Iniciais se destacam os procedimentos de caracterização e classificação dos materiais utilizados no estudo, o procedimento adotado de definição de dosagem das misturas pelo Método Bailey e os Ensaio de Compactação para definição da umidade ótima a ser adotada para cada mistura.

4.1. Resultados de Caracterização

4.1.1. Granulometria

Além do rejeito de minério de ferro, foram obtidos diversos materiais granulares para compor a maior parte das misturas a serem avaliadas pelos ensaios principais, tendo em vista que o rejeito fino por si só não é um material apropriado a ser utilizado como base de pavimentos devido a sua granulometria. As faixas granulométricas de referência para esta camada estabelecidas pela norma DNIT 141 (2022a) preveem um limite máximo de 25% dos grãos tendo diâmetro abaixo de 0,075 mm sendo que o rejeito se encontra praticamente em sua totalidade abaixo desta especificação.

Por esse motivo, foram buscados diversos materiais com tamanhos entre si os mais distintos possíveis, de forma a se ter mais opções para serem consideradas no processo de dosagem. Além disso, materiais de granulometria mais grossa, como é o caso da brita, são mais prováveis de virem a contribuir com valores de resistência mais altos (BERNUCCI *et al.*, 2007). A Figura 20 mostra visualmente todos os materiais utilizados para mostrar as diferenças granulométricas entre estes, enquanto as curvas granulométricas com a identificação de cada um destes estão demonstradas na Figura 21.



Figura 20 – Agregados utilizados no Estudo. (I) Brita 1 (II) Brita 0 (III) Areia Grossa (IV) Pó de Pedra (V) Areia Média (VI) Rejeito de Minério de Ferro

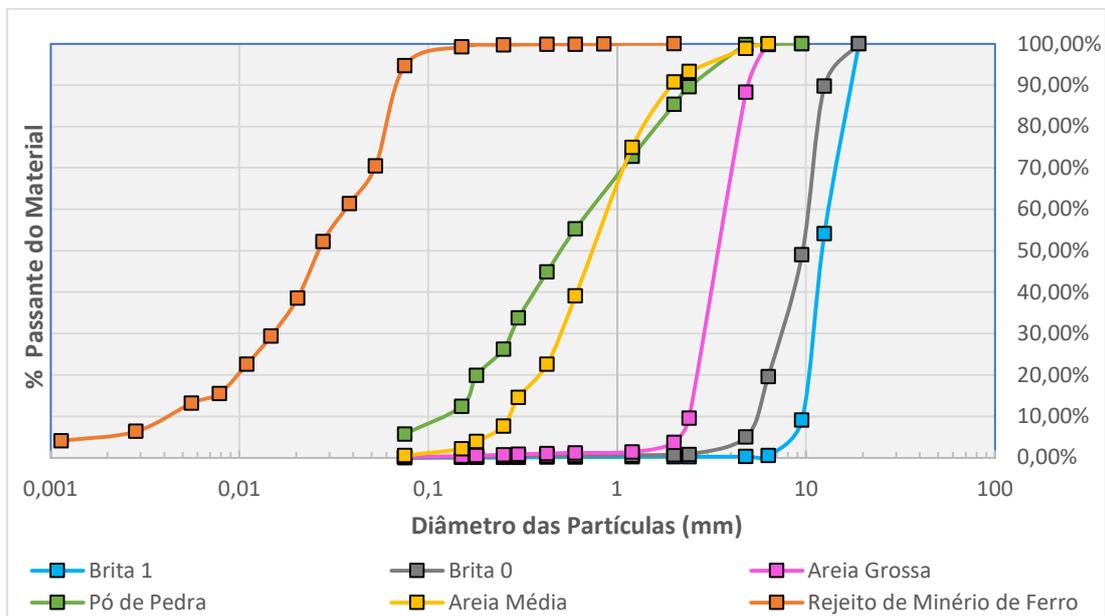


Figura 21 – Curvas Granulométricas dos Agregados utilizados

Como pode-se observar, chama-se a atenção o fato do rejeito se tratar de um material bem mais fino em comparação com os outros agregados, razão pela qual foi necessária a realização de um ensaio granulométrico de sedimentação e pela qual também foi escolhido fazer uma combinação com agregados de maiores dimensões para a realização dos ensaios.

Tabela 8 – Coeficientes de Uniformidade (Cu) e de Curvatura (Cc) calculados

Material	D10 (mm)	D30 (mm)	D60 (mm)	Cu	Cc
Brita 1	9,559	10,891	13,328	1,39	0,93
Brita 0	5,311	7,430	10,307	1,94	1,01
Areia Grossa	2,412	3,022	3,937	1,63	0,96
Pó de Pedra	0,123	0,275	0,762	6,21	0,81
Areia Média	0,267	0,504	0,950	3,56	1,00
Rejeito de Ferro	0,004	0,015	0,037	8,55	1,45

Também é notável que os grãos dos materiais granulares de granulometria maior – ambas as britas e a areia grossa – estejam fortemente concentrados em uma menor faixa granulométrica, razão pela qual as curvas se encontram mais próximas da vertical na Figura 21, o que se alinha com os coeficientes de uniformidade menores calculados na Tabela 8, pois menores valores indicam maior uniformidade entre os grãos. Mesmo o rejeito, que foi o material que obteve o maior coeficiente de uniformidade, pode ser considerado um material medianamente uniforme, algo que evidencia a uniformidade granulométrica de todos os materiais obtidos. Esta maior uniformidade se mostrou importante no procedimento de dosagem, onde para possibilitar a combinação entre agregados, tal previsibilidade granulométrica era necessária para que fosse possível serem respeitadas as proporções de referência estipuladas para o Método Bailey.

Já os coeficientes de curvatura indicam a gradação entre as partículas, com uma boa gradação se encontrando entre os valores de 1 a 3. O pó de pedra em específico foi o principal material que teve um coeficiente de curvatura mais baixo e acabou se mostrando difícil trabalhar com esse material na parte de dosagem pelo Método Bailey, razão pela qual procurou a areia média como substituta para misturas FA. As fórmulas de cálculo utilizadas para os dois coeficientes calculados na Tabela 8 se baseiam em D10; D30 e D60 e se encontram na normativa ABNT NBR 7181 (2016).

A divisão granulométrica por natureza de grão se encontra descrita pela Tabela 9 e se baseia nas especificações do Sistema Unificado de Classificação de Solos, o SUCS (ASTM D 2487, 2006).

Tabela 9 – Divisão Granulométrica dos Materiais obtidos para o estudo

Material	% Pedregulho	% Areia	% Silte + Argila
Brita 1	99,68%	0,32%	-
Brita 0	94,96%	4,96%	0,08%
Areia Grossa	11,68%	88,08%	0,24%
Pó de Pedra	0,24%	94,00%	5,76%
Areia Média	1,10%	98,35%	0,55%
Rejeito de Ferro	-	5,31%	94,69%

Nota-se que cada material tende a predominantemente se encaixar dentro de um único grupo, evidenciando as granulometrias bem distintas. Ambas as britas 1 e 0 tendem a ser classificadas como pedregulhos enquanto a areia grossa, o pó de pedra e a areia média são consideradas areias. Todos estes materiais são granulares, característicos por sua granulometria mais graúda, com maior atrito existente entre os grãos pois estes tendem a

se repelir. Misturas com predominância destes grãos mais graúdos tendem geralmente a apresentar resistências mais elevadas por conta do atrito entre as partículas (BERNUCCI *et al.*, 2007). Já o rejeito de minério de ferro é o único material de partículas finas e pela classificação SUCS ou HRB, se ele tende a ser mais siltoso ou argiloso depende da determinação do seu limite de liquidez e índice de plasticidade, o que ainda será determinado pelos limites de Atterberg, que possuem um ensaio próprio.

4.1.2. Massa Específica dos Grãos e Abrasão

A Tabela 10 indica os resultados encontrados de massa específica real tanto para o Rejeito de Minério de Ferro e alguns materiais granulares de maior granulometria quanto para duas composições de agregados estabelecidas para serem depois consideradas no processo de dosagem pelo Método Bailey, seguindo-se a ABNT NBR 6458 (2016b). O rejeito de minério de ferro por se tratar de um material bastante fino, teve somente a sua massa específica calculada.

Tabela 10 – Massa Específica dos grãos utilizados em ensaio

Agregado	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)
Rejeito de Minério de Ferro (100% de Rejeito)	2,92	-
Brita 1 ou Brita 0 (100% de Brita)	2,68	2,61
Conjunto de Britas (76% Brita 0 e 24% Brita 1)	2,68	2,61
Areia Grossa (100% de Areia Grossa)	2,59	2,52
Conjunto de Areia e Brita (78% Areia Grossa e 22% Brita 0)	2,61	2,54

A massa específica do rejeito ser maior que a da brita está dentro do esperado devido a substâncias relacionadas ao minério de ferro presentes em sua composição possivelmente contribuindo para uma maior densidade do material.

4.1.3. Limites de Atterberg

O conceito de limite de liquidez ou de plasticidade não faz muito sentido de ser aplicado sobre materiais granulares e não coesivos como é o caso da Brita ou da Areia pois estes não apresentam um comportamento plástico. De forma que se apresentam aqui exclusivamente os resultados obtidos para o rejeito de minério de ferro, que por ser um solo bastante fino, possui certo nível de coesão necessária para unir as partículas de maneira natural.

A Figura 22 indica os resultados dos ensaios para o limite de liquidez (LL), correspondente à umidade mais alinhada com um total de 25 golpes, baseando-se na reta definida por cinco amostras de umidades distintas cujo número de golpes utilizados nos ensaios foi verificado em laboratório. Pelo gráfico, é possível notar que houve boa correlação linear entre os dados, de maneira que são considerados bem representativos. O valor de LL é igual a 21,52% por meio da interpolação dos dados.



Figura 22 – Resultados do Ensaio de Limite de Liquidez do rejeito de minério de ferro

Já o cálculo do limite de plasticidade (LP) considerou a realização dos procedimentos correspondentes à ABNT NBR 7180 (2016d), tendo sido considerados a obtenção de 4 valores de umidade, um a mais que o especificado na norma. Estes valores, assim como a média do valor de LP e o cálculo resultante do índice de plasticidade (IP), podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de LP e IP calculado para o Rejeito de Minério

Amostra	Umidade Obtida na Fragmentação do Cilindro (%)	ABNT NBR 7180: Diferença de 5% em Relação ao LP Médio (LPi entre 16,93% até 18,71%)
1	LP1 = 18,07	OK
2	LP2 = 17,27	OK
3	LP3 = 17,72	OK
4	LP4 = 18,24	OK
LP = 17,82% (Média)		Índice de Plasticidade (IP) = LP – LL = 3,70%

Como o limite de liquidez foi abaixo de 50% e índice de plasticidade menor que 4%, o rejeito é classificado como silte pela classificação SUCS (ASTM D 2487, 2006). Já pela classificação estabelecida pela AASHTO M-145-91 (2004), o fato de ter mais de 36% de finos na granulometria combinado com um IP abaixo de 10% e LL abaixo de 40% classifica o rejeito como A-4, o que confirma um solo siltoso.

A norma DNIT 141 (2022a) descreve como especificações para os solos ou misturas de solos, um LL abaixo de 25% e IP abaixo de 6%. Ambas as especificações foram cumpridas pelo rejeito de minério de ferro e os outros agregados, por serem granulares, não possuem coesão significativa para possuir LL ou IP. De forma que se considera que

a mistura entre todos os agregados deste estudo atende as especificações exigidas para uso em camadas de base de pavimentos, sem a necessidade de realizar ensaios adicionais de equivalência de areia segundo a normativa.

4.1.4. Composição Química do Rejeito

A composição química do rejeito foi obtida por meio do ensaio de fluorescência de Raios-X e foi verificada a predominância de Hematita, um óxido de ferro de coloração mais avermelhada, o que se alinha mais com a cor amarronzada do rejeito. Junto da Hematita, também há uma presença significativa de Sílica – que se trata de um componente comum encontrado na natureza – e de Alumina, um óxido derivado do alumínio.

Dessa forma, apesar de o rejeito utilizado ser predominantemente composto por ferro, ele é mais heterogêneo do que o nome dá entender. Afinal, o minério de ferro na natureza é encontrado em formações geológicas que contêm uma ampla variedade de minerais. De forma que o processo de beneficiamento para a extração do ferro, separando-o das impurezas, necessariamente resultará em uma quantidade de outros minérios comuns como é o caso da Sílica por exemplo.

Os resultados de Composição Química estão descritos pela Tabela 12 para todas as substâncias encontradas que compõem pelo menos 0,1% do rejeito, enquanto substâncias com proporção abaixo de 0,1% foram incluídas no mesmo grupo de “Outros”.

Tabela 12 – Substâncias presentes na composição Química do Rejeito em %

Substância	%
Fe ₂ O ₃ - Hematita	64,5%
SiO ₂ - Sílica	23,8%
Al ₂ O ₃ - Alumina	10,4%
SO ₃ – Trióxido de Enxofre	1,0%
Tm ₂ O ₃ – Óxido de Túlio	0,2%
Outros (MnO; ZnO; ZrO ₂)	0,1%

No geral, não foi verificada a presença de minerais que possam ser considerados radioativos em suas formas puras e naturais. A substância mais indesejável encontrada na análise foi o Trióxido de Enxofre em 1,0%, que por características corrosivas poderia em tese prejudicar a performance técnica do pavimento ao contribuir para a geração de fissuras ou outros danos de nível estrutural.

A norma ABNT NBR 15116 (2004), referente a agregados reciclados destinados à pavimentação, estabelece um limite de até 2% de contaminantes associados a Sulfatos (SO_4), o que é o caso do Trióxido de Enxofre ainda que este não o seja. Além disso, este estudo realiza uma análise de misturas contendo diferentes quantidades de rejeito, de forma que a proporção real do SO_3 seja sempre significativamente menor na prática pois a mistura efetivamente avaliada se trata de uma composição de agregados mais grossos como brita e areia em conjunto com o rejeito.

Assim, considera-se que o rejeito de minério de ferro escolhido para ser utilizado nestas composições está quimicamente alinhado de forma a não trazer prejuízos nem para o meio-ambiente nem para o pavimento para que se destinam em si.

4.1.5. Análise Mineralógica do Rejeito

Por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), foram obtidas imagens ampliadas do rejeito de minério de ferro, sendo possível avaliar a estrutura mineralógica de seus grãos. No geral, dois principais tipos de grãos se destacaram nas imagens que foram realizadas.

O primeiro - grão tipo A - é mais bem definido por corresponder a grãos de maior tamanho, de característica arredondada ou sub-arredondada e com uma superfície relativamente mais lisa. Já o segundo - grão tipo B - demonstrou ter uma estrutura mais lamelar, com tamanhos bem mais variados e menores em comparação ao primeiro tipo, além de ter uma aparência mais reta e angulosa. A Figura 23 mostra alguns exemplos de cada um destes tipos de grãos, por meio de uma imagem ampliada em 500 vezes, sendo possível observar a heterogeneidade do material também no que diz respeito ao tamanho dos grãos.

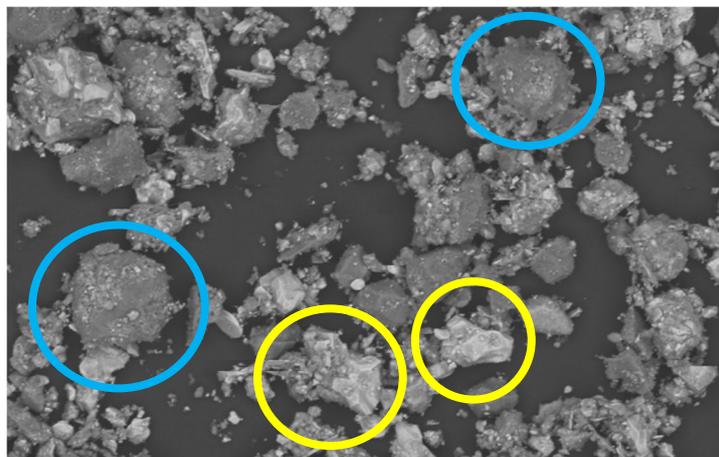


Figura 23 – Imagem ampliada do Rejeito de Minério de Ferro em 500x. Em Azul, grãos arredondados do tipo A. Em Amarelo, grãos lamelares do tipo B.

Análises químicas específicas de ambos os grãos permitem identificá-los como a Sílica (grãos tipo A) e a Hematita (grãos tipo B), alinhando-se com os resultados anteriormente obtidos pelo ensaio de fluorescência de Raios X. É interessante notar que a colocação das imagens obtidas também permite distinguir os tipos de grãos, com as hematitas apresentando uma coloração mais esbranquiçada na imagem em comparação com a cor escura da sílica.

A Figura 24 mostra simultaneamente em detalhe uma imagem de um grão de sílica escolhido para análise ao acaso, assim como a localização específica na imagem de substâncias associadas ao Ferro, ao Silício, ao Alumínio

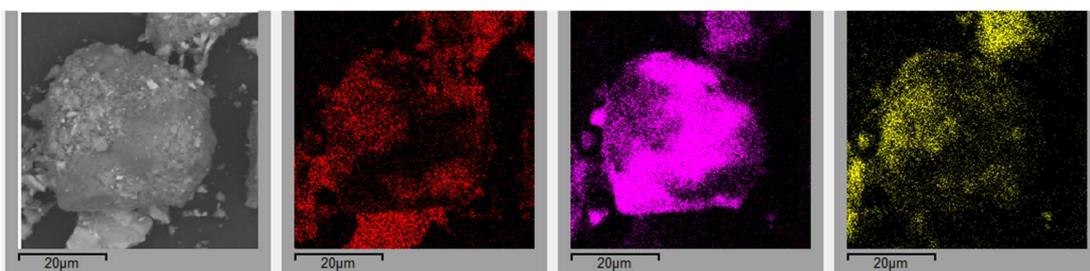


Figura 24 – Imagem ampliada de um grão de Sílica em 3000x. Em Vermelho, pontos de concentração de Ferro. Em Rosa, pontos de concentração de Silício. Em Amarelo, pontos de concentração de Alumínio.

É interessante observar que o Silício, substância que caracteriza a Sílica, se concentra justamente na superfície mais lisa do grão. Enquanto regiões mais irregulares por serem cobertas por grãos menores, são onde há maior predominância de Ferro e Alumínio. O que evidencia que se trata de um grão de Sílica coberto com impurezas de granulometria menor.

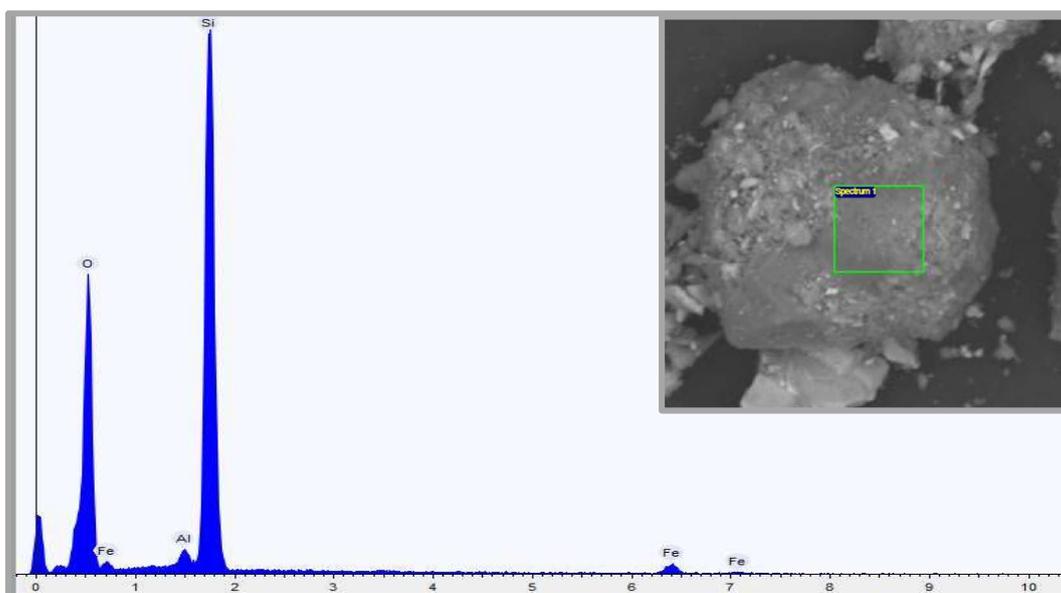


Figura 25 – Difratoograma do grão de Sílica na sua região mais lisa e pura.

As Figuras 25 e 26 apresentam análises do grão de sílica sob distintas perspectivas. Na Figura 25, analisando-se uma região mais lisa do grão sem esta estar com grãos menores aglomerados em sua volta, é possível notar uma dominância absoluta do Silício sob outras substâncias. Cerca de 94,8% da superfície é composta por Silício (Si) ou Oxigênio (O) - esse último sendo uma substância associada tanto à Sílica, quanto à Hematita ou Alumina, pois todas as substâncias possuem Oxigênio. Enquanto os 5,2% restantes são predominantemente Ferro (Fe), com uma pequena quantidade de Alumínio (Al) também. Já na Figura 26, há um maior equilíbrio entre as substâncias ao se avaliar uma região do grão maior coberta por partículas menores, confirmando que estas de fato são predominantemente de Alumínio e Ferro, juntos do próprio grão de Sílica. Um total de 23,0% da região analisada é composta por Ferro e 9,1% por Alumínio. Enquanto 15,2% do peso é de Silício e 52,4% de Oxigênio. Adicionalmente e exclusivamente nesta análise, verificou-se também um resquício de 0,3% de Potássio (K).

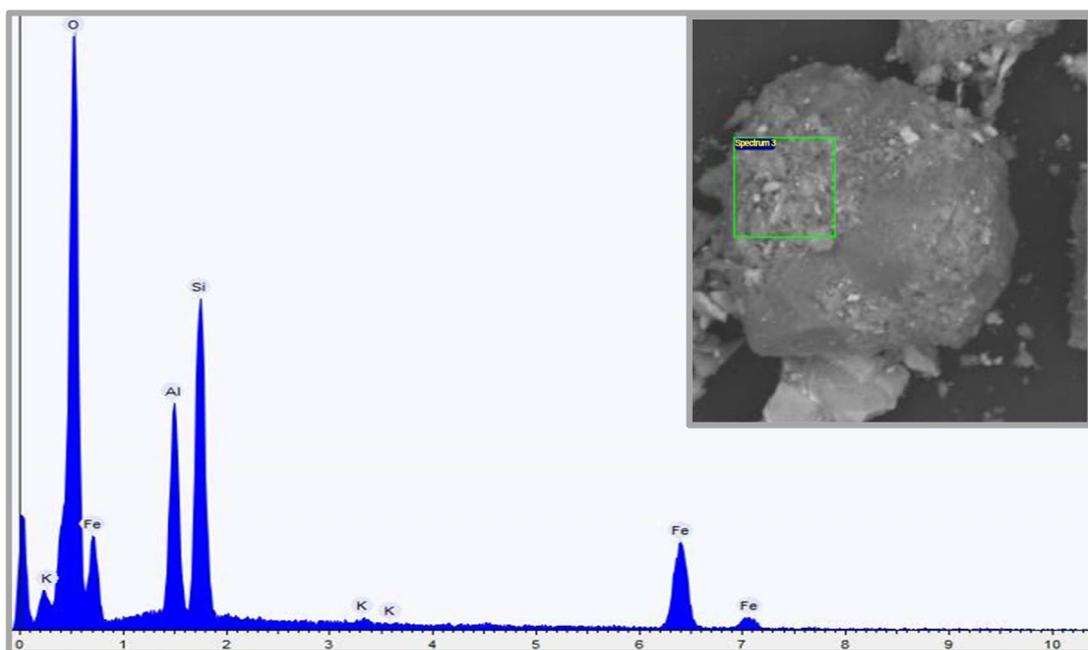


Figura 26 – Difratograma do grão de Sílica na sua região mais irregular, coberto por grãos menores.

O grão de Sílica analisado foi um dos maiores encontrados na análise do MEV, possuindo diâmetro próximo da faixa de grandeza de 40µm, o que está razoavelmente alinhado com o ensaio de granulometria realizado para o rejeito, no qual se verificou que mais de 61% das partículas possuíam um diâmetro menor que 38µm. Isso evidencia que o destorroamento, seguido do ensaio de sedimentação realizado para a granulometria do rejeito foi bem-sucedido em separar os grãos, pois estes foram obtidos em torrões de grãos aglomerados de tamanho muito maior que os próprios grãos.

A Figura 27 por outro lado traz o mapa de cores de um grão de Hematita. Nele, é possível observar que o Ferro (em vermelho) é a substância dominante por praticamente todo o grão em comparação com o Silício e o Alumínio. Existe um único grão arredondado menor incrustado no meio da Hematita que aparenta ser de Sílica ou Alumina a julgar pelo mapa de cores. É notável como o grão maior possui uma característica bem distinta do anterior, com linhas mais retas dando-lhe um aspecto mais cristalizado para sua forma. Além disso, no canto inferior direito da imagem, existe um outro grão com maior predominância de Alumínio, possuindo um aspecto distinto da Hematita ao ter uma superfície mais irregular.

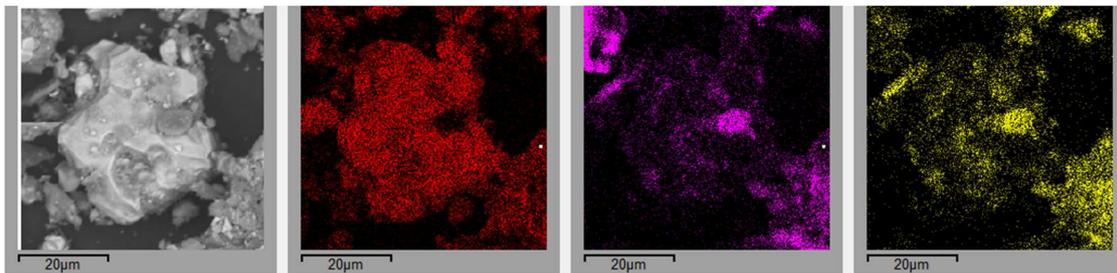


Figura 27 – Imagem ampliada de um grão de Hematita em 3000x. Em Vermelho, pontos de concentração de Ferro. Em Rosa, pontos de concentração de Silício. Em Amarelo, pontos de concentração de Alumínio.

A Figura 28 apresenta o difratograma de uma região mais regular do grão de Hematita, confirmando que o Ferro e Oxigênio são os elementos predominantes, representando 94,2% da região analisada. Enquanto os 5,8% restantes seriam uma minoria de Alumínio, seguido de uma pequena quantidade de Silício.

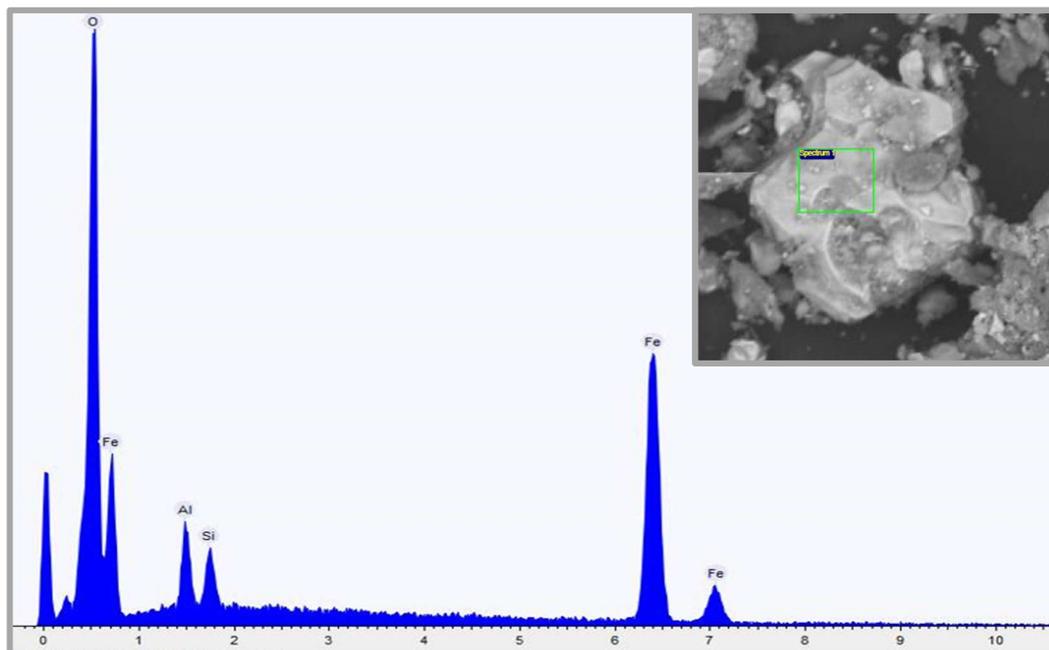


Figura 28 – Difratograma do grão de Hematita, em sua região mais regular.

De qualquer forma, ao menos no nível máximo de ampliação de 5000x atingido pelo equipamento, não foi possível identificar um grão específico de Alumina, ainda que se saiba que o Alumínio é um elemento significativo – mesmo que minoritário – em todas as análises já apresentadas até aqui.

Baseando-se na Figura 27, analisou-se especificamente o grão menor incrustado no grão maior de hematita e ainda assim não foi possível definir que este grão seria exatamente, porque níveis semelhantes de Alumínio e Silício foram encontrados na análise quantitativa do seu Difratoograma, representado pela Figura 29. 50,9% do peso na área analisada vem do Oxigênio; 16,8% do Ferro (trazido por influência do grão maior nas laterais da região avaliada) 16,0% do Silício; 12,9% do Alumínio; com minorias de 2,8% de Potássio e 0,6% de Magnésio (Mg).

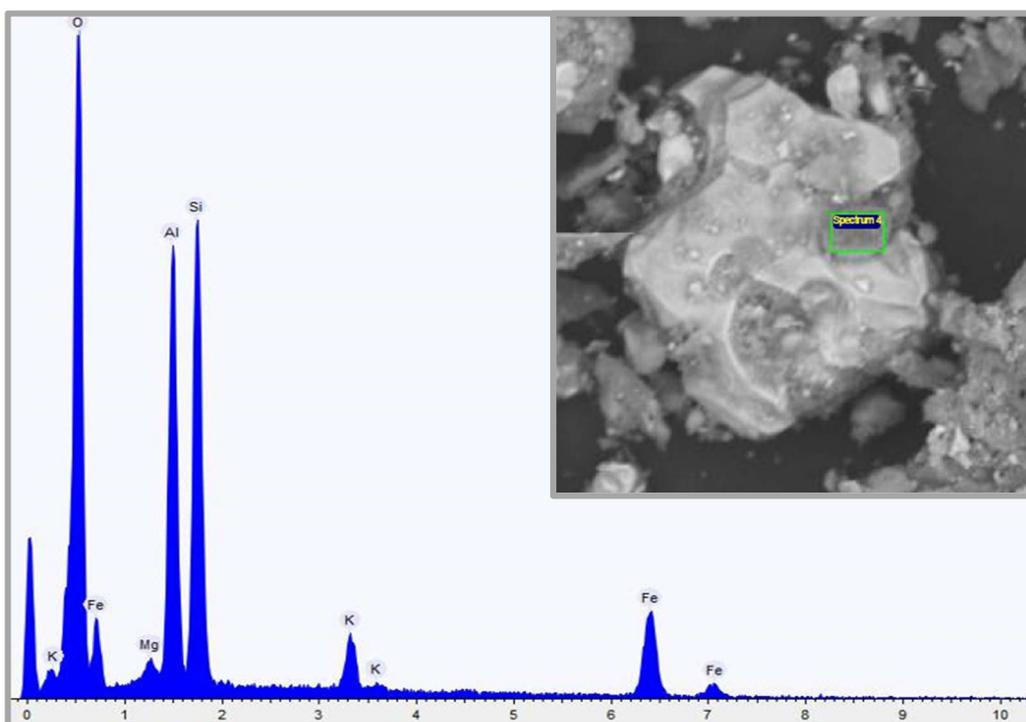


Figura 29 – Difratoograma de grão indefinido, incrustado na Hematita.

Nota-se que assim como na Figura 26, ao se analisar grãos menores, surge uma diversidade maior de grãos, ainda que elementos para além do Oxigênio, do Silício, do Ferro e do Alumínio sejam sempre minoritários. Muitos destes, como o Potássio ou o Magnésio, nem haviam sido detectados na amostra utilizada para a estimação da composição química por meio da fluorescência de Raios X. Isso pode ocorrer pelo fato de a análise pelo MEV ser bem mais local, de um grão específico, em vez de serem significativos a ponto de representar o rejeito de uma forma global. Ainda assim, é novamente reforçada a heterogeneidade do material.

4.1.6. Classificação MCT do Rejeito

O grupo de curvas de compactação realizadas para o rejeito de minério de ferro se encontram na Figura 30, onde é obtido o parâmetro d' com base em distintos valores de umidade e massas específicas aparente secas.

É importante notar que o parâmetro d' é definido como a inclinação da linha vermelha na Figura 30, que representa a inclinação da reta vermelha desenhada no gráfico, que deve ser paralela aos dados correspondentes a 12 golpes. Como no ensaio realizado foram feitas medições para este valor de 12 golpes, a linha vermelha foi desenhada considerando-se que se passa por cima da inclinação verificada para 12 golpes, considerando-se um intervalo de variação das umidades 9,5% e 11,5%.

Dessa forma, o parâmetro d' adotado ao final dos procedimentos foi igual a 149,85. O que corresponde à inclinação da reta vermelha multiplicada por 1000 (já que para o cálculo de d' a massa específica deve estar em kg/m^3).

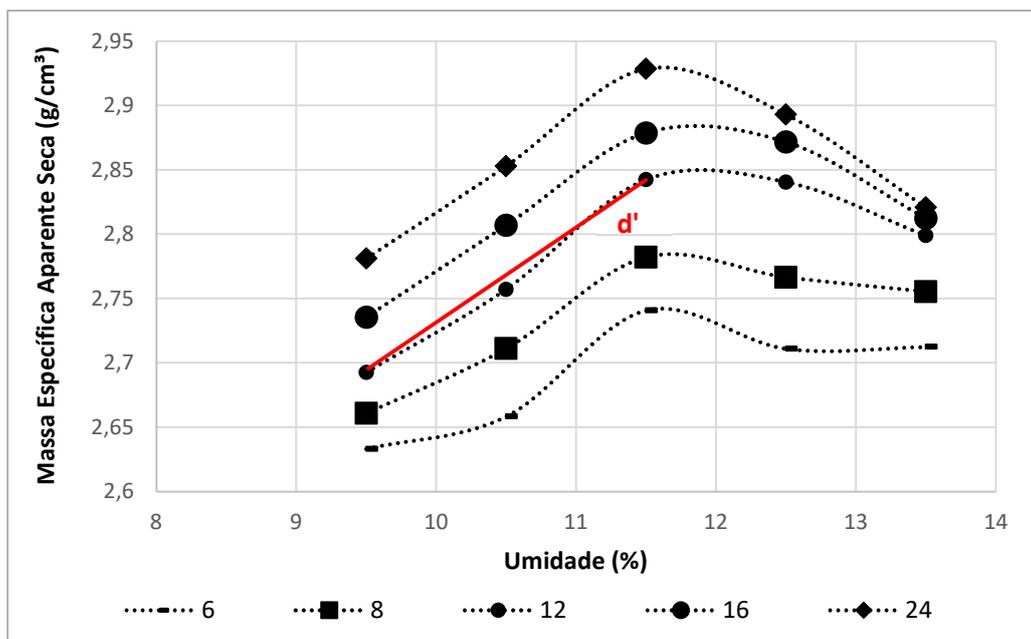


Figura 30 – Grupo de Curvas de Compactação do rejeito de minério de ferro

Já para o coeficiente de argilosidade c' , foi traçada uma reta na Figura 31 com interseção nas coordenadas (10, 2) que fosse o mais paralela possível à curva de umidade mais próxima a esta coordenada, que demonstrou ser a curva correspondente a 13,5% de umidade.

Assim, junto com as medições feitas durante todo o ensaio, ficaram estabelecidos todos os parâmetros determinados pela Tabela 13, com o valor de perda de imersão determinado

após análise da degradação do material em água, referente ao total degradado em relação ao volume extrudado para fora do cilindro.

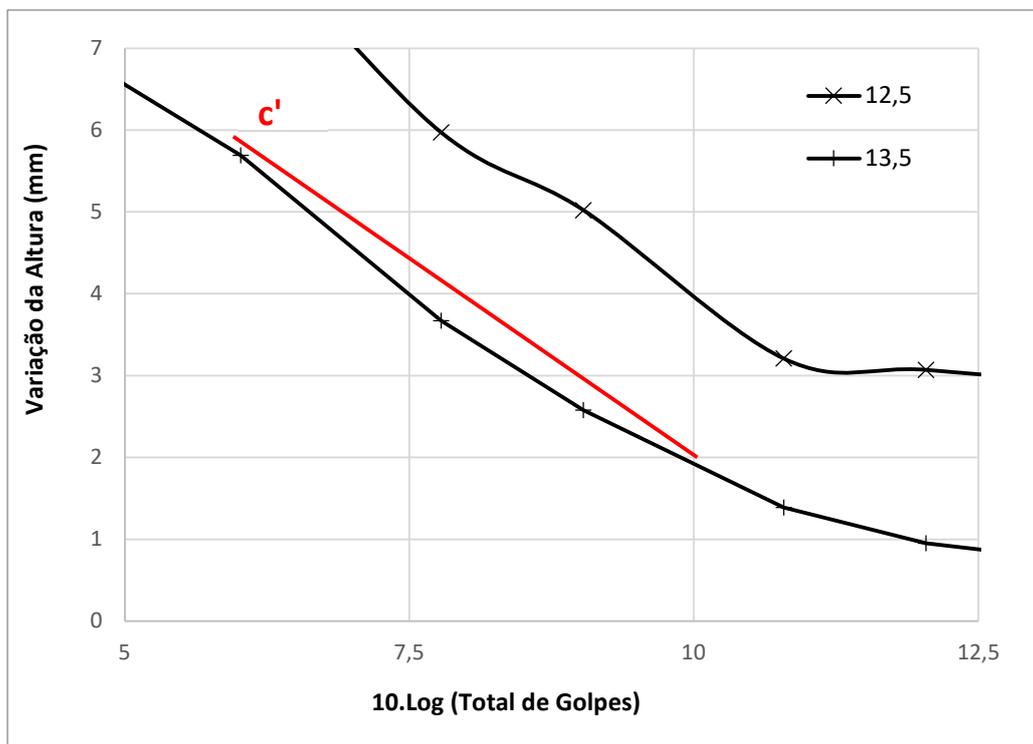


Figura 31 – Definição do parâmetro c'

Tabela 13 – Parâmetros obtidos no ensaio para o rejeito e Resultado MCT

Perda por Imersão	c'	d'	e'	MCT
406%	0,97	149,85	1,61	NS'

De forma que o rejeito é classificado como **Não-Laterítico Siltoso (NS')**. Segundo a normativa DNIT 259 (2023b), esse tipo de solo compreende siltes e siltes arenosos – o que está alinhado com o verificado no ensaio de granulometria. São solos muito resilientes e não se recomenda utilizá-los como material de camada de pavimentação, confirmando-se que o rejeito objeto de estudo se configura em um solo que ofereceria uma má resistência para o pavimento.

Nesse sentido, seria impossível utilizar somente o rejeito por completo, razão pela qual outros materiais foram obtidos para realizar uma composição de agregados. A utilização do rejeito teria de ocorrer em quantidades reduzidas, preferencialmente como *filler*. Apesar dos siltes serem agregados cujo uso em obras de infraestrutura é mais desfavorável, pois eles não possuem a mesma resistência de materiais graúdos como a brita e não têm a forte coesão igual a argilas, eles podem oferecer algum nível menor de

coesão que para materiais granulares como a brita simplesmente não existe. Por essa razão, um aproveitamento limitado do rejeito ainda poderia talvez ser justificado de um ponto de vista técnico, além da motivação ambiental.

A carta de classificação do rejeito como um material não-laterítico siltoso (NS') é apresentada pela Figura 32.

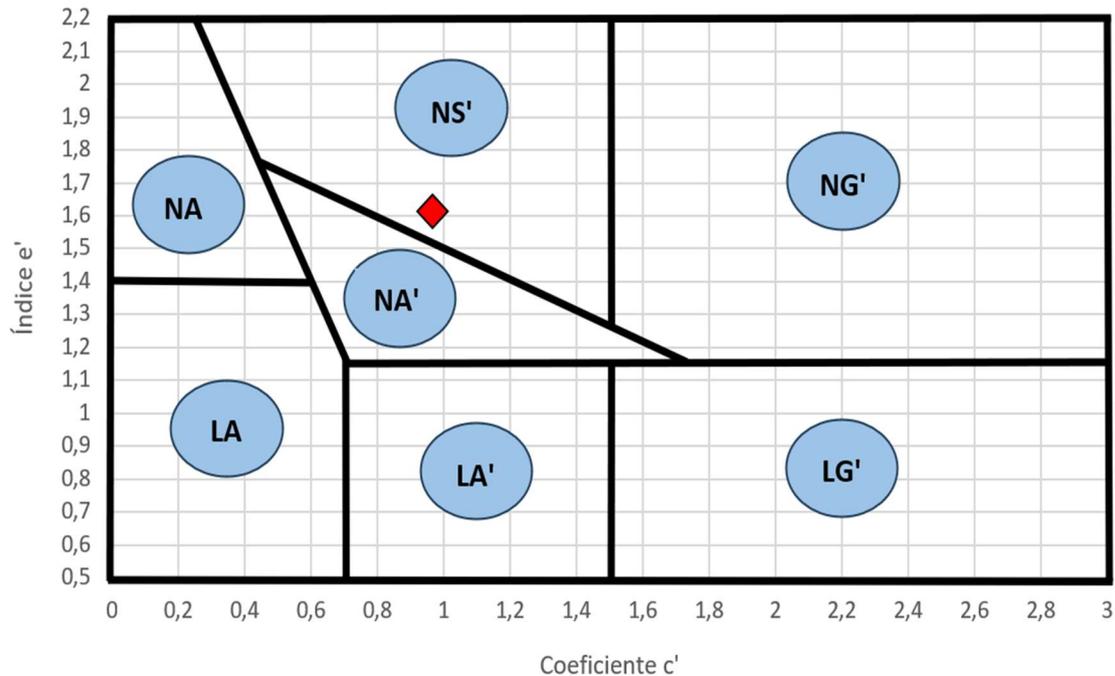


Figura 32 – Classificação MCT do rejeito de minério de ferro (resultado em vermelho)

4.2. Método de Dosagem Bailey

Foi definido anteriormente a necessidade de se misturar o rejeito com outros materiais mais resistentes de forma a viabilizar a sua reciclagem como material de pavimentação. Não somente isso, mas o rejeito deve ser utilizado em quantidades baixas, no máximo de forma a preencher vazios existentes e aumentar a coesão entre agregados mais resistentes que o silte. De forma que estes outros materiais seriam os protagonistas da mistura, com o rejeito sendo no máximo um complemento embora não se tenha uma ideia do quanto dele poderia ser aproveitado.

Por este motivo, fez-se necessário adotar um método de dosagem que pudesse não somente ajudar a ter uma referência para a quantidade de rejeito a ser utilizada, mas também ajudar a definir as proporções ideais dos outros agregados a serem utilizados de forma a potencializar uma melhor performance da mistura de agregados. Garantindo-se a

maior resistência possível, teoricamente se favoreceria a adição de uma maior quantidade de rejeito, que no geral possui efeito desestabilizador.

Por essa razão, a dosagem teria o objetivo de garantir uma maximização da densidade. Além disso, como agregados de tamanhos bem distintos seriam utilizados, a distribuição granulométrica teria de ser otimizada de forma a garantir uma boa interação entre estes grãos, com os menores ocupando os vazios formados pelos grãos maiores. Esta é a justificativa para se adaptar o método de dosagem Bailey neste procedimento, ainda que este seja mais utilizado em normativas voltadas para misturas asfálticas, pois estes conceitos são a base deste método.

Foram estabelecidas duas principais misturas para análise na adaptação do método com base em diferentes subdivisões estabelecidas por BERNUCCI *et al.* (2007) para solos-agregados:

1. Uma mistura baseada no contato entre grãos de maior tamanho, com os espaços vazios entre estes sendo preenchidos por grãos mais finos de forma a potencializar a densidade. Geralmente estas misturas possuem resistências mais elevadas e a utilizada neste estudo é chamada de CA (em referência a possuir agregados mais graúdos, “*Coarse Aggregates*” em inglês), mas também pode ser chamada de Solo-Brita.
2. Uma mistura baseada em uma dominância de grãos finos, na qual grãos mais grossos ficam suspensos em meio aos finos e não há contato direto entre eles. A resistência pode ser mais baixa por conta deste menor atrito e a coesão entre os grãos finos se torna mais relevante. Neste estudo, este tipo de mistura é chamado de FA (derivado de “*Fine Aggregates*” em inglês).

A escolha por dois tipos distintos de mistura possui a função justamente de avaliar o impacto do rejeito quando este interage com duas granulometrias distintas. Na mistura CA é o atrito que garante a resistência, de forma que se busca avaliar se existiria alguma quantidade de rejeito que contribuiria em elevar o desempenho da mistura, trazendo algum nível de coesão - ainda que bem limitada, tendo em vista que o rejeito se mostrou ser um silte - que poderia trabalhar de forma complementar ao atrito entre as britas sem representar um obstáculo negativo que diminuiria o desempenho técnico da mistura. E caso a adição do rejeito nunca represente uma melhoria na performance do pavimento em nenhuma quantidade, determinar até que nível seria interessante utilizar o rejeito como material na infraestrutura sem comprometer significativamente a sua alta qualidade.

Já na mistura FA, por ter uma maior superfície de contato entre os grãos que lhe permite ser mais dependente da coesão, busca-se avaliar se sequer haveria alguma contribuição do rejeito nesse sentido. Pois como se trata de um silte, um material com valores baixos de coesão, por estas misturas se quer verificar se este rejeito poderia ter qualquer impacto positivo nesse sentido, levando em consideração que estes tipos de misturas não são frequentemente usados em camadas de pavimentos por sua menor resistência.

Assim, foram necessários dois processos de dosagens destas misturas, que se encontram descritos em conjunto pelos subcapítulos a seguir, que foram separados para detalhar de forma mais clara de como foi feito o procedimento.

4.2.1. Definição das Composições Graúda e Fina das Misturas

Em cada uma das misturas, o método Bailey consiste em dividi-las em uma faixa granulométrica de grãos graúdos e uma faixa granulométrica de grãos finos, de forma a calcular a proporção adequada destes grãos na mistura, garantindo que sejam respeitados os limites de proporção entre grãos.

Dentre os agregados utilizados, várias tentativas de usar somente um deles como os grãos de origem graúda ou fina foram feitas, sem sucesso pois nunca era possível atender os limites de proporções especificados por VAVRIK et. al (2002) ou ao menos um valor próximo destes. Isso ocorria devido a existir uma variação granulométrica muito grande da brita para a areia, razão inclusive pela qual se obteve a areia grossa, por ser um material intermediário entre as britas e a areia média que ajudasse a solucionar ou a reduzir este problema ao mínimo possível.

De forma que se realizou uma composição de diferentes materiais para a formação das faixas granulométricas grossas e finas para cada uma das duas misturas. E para isso se utilizou do método de tentativa e erro, com o teste de distintas composições até que se fossem encontradas as soluções mais adequadas. Ou melhor dizendo, que contribuíssem para que se alcançasse o mais perto possível os limites de proporção da mistura final.

Tabela 14 – Materiais utilizados na Dosagem pelo Método Bailey

Misturas	Mistura CA	Mistura FA
Composição de Granulometria Grossa (Composição A)	24% de Brita 1 + 76% de Brita 0	22% de Brita 0 + 78% de Areia Grossa
Composição de Granulometria Fina (Composição B)	30% de Areia Grossa + 70% de Pó de Pedra	100% de Areia Média

A Tabela 14 indica os materiais que foram considerados como pertencentes a faixa grossa e a faixa fina de cada uma das duas misturas avaliadas. Nota-se que um mesmo agregado, a areia grossa, possui funções distintas em cada uma das misturas justamente por ser um intermediário dentre os agregados obtidos. Para a mistura CA por exemplo, faz parte da composição de grãos finos enquanto na mistura FA é convertida em parte da composição de grãos grossos.

4.2.2. Granulometria das Composições e Determinação das Peneiras de Referência

Tendo sido definidas as composições que vão formar cada mistura, é necessário estipular a granulometria de cada uma destas com o objetivo de estipular as peneiras que serão utilizadas como parâmetro ao longo do procedimento. A Tabela 15 contém a descrição dos grãos passantes de acordo com algumas peneiras utilizadas, seguindo-se as composições estipuladas para a Mistura CA.

Tabela 15 – Faixas Granulométricas das Composições da Mistura CA

Peneira		% de Grãos Passantes na Peneira		
Número (#)	Abertura (mm)	Composição A (Brita 1 e Brita 0)	Composição B (Areia Grossa e Pó de Pedra)	Filler (Rejeito)
1''	25	100,00%	100,00%	100,00%
3/4''	19	100,00%	100,00%	100,00%
1/2''	12,5	81,22%	100,00%	100,00%
3/8''	9,5	39,46%	100,00%	100,00%
1/4''	6,3	15,03%	99,87%	100,00%
4	4,8	3,91%	96,33%	100,00%
8	2,4	0,68%	65,60%	100,00%
16	1,2	0,54%	51,39%	99,96%
30	0,6	0,47%	39,06%	99,89%
50	0,3	0,33%	23,90%	99,76%
100	0,15	0,14%	8,83%	99,29%
200	0,075	0,06%	4,10%	94,69%

O mesmo processo foi executado para as composições referentes à mistura FA, com resultados indicados pela Tabela 16. Nela, é possível observar que a mistura FA tende a se concentrar entre as peneiras de número #4 e #50, que possuem aberturas menores em comparação com as peneiras que concentram a mistura CA observadas na Tabela 15, onde as peneiras entre as de número #1/2'' e #30 representam a granulometria da maior

parte dos grãos, excluindo-se o rejeito de minério de ferro como *filler*. Este rejeito é considerado como um elemento variável e aplicado em teores baixos para o propósito desta dissertação.

Tabela 16 – Faixas Granulométricas das Composições da Mistura FA

Peneira		% de Grãos Passantes na Peneira		
Número (#)	Abertura (mm)	Composição A (Brita 0 e Areia Grossa)	Composição B (Areia Média)	<i>Filler</i> (Rejeito)
1''	25	100,00%	100,00%	100,00%
3/4''	19	100,00%	100,00%	100,00%
1/2''	12,5	97,75%	100,00%	100,00%
3/8''	9,5	88,79%	100,00%	100,00%
1/4''	6,3	82,12%	100,00%	100,00%
4	4,8	70,00%	98,90%	100,00%
8	2,4	7,66%	93,30%	100,00%
16	1,2	1,26%	74,97%	99,96%
30	0,6	1,06%	39,08%	99,89%
50	0,3	0,77%	14,60%	99,76%
100	0,15	0,35%	2,20%	99,29%
200	0,075	0,20%	0,55%	94,69%

As peneiras de controle possuem a função de separar diferentes frações granulométricas que vão representar faixas distintas para as suas misturas correspondentes. A Peneira de Controle Primário (PCS) por exemplo, separa uma fração graúda de uma fração fina dos agregados totais. Já a Peneira de Controle Secundário (SCS) realiza uma divisão entre a fração fina, separando-a em uma fração graúda dos finos e uma outra fração fina dos finos. Por fim, a Peneira de Controle Terciário (TCS) faz uma avaliação da fração fina dos agregados finos.

Há também a Peneira Média (HS), utilizada para analisar a compactação da porção graúda e os vazios da mistura. Todas as peneiras são definidas com base no Tamanho Nominal Máximo (NMAS) de cada composição, que é igual à abertura da peneira de número imediatamente maior que a primeira que retêm mais que 15% dos agregados em relação ao total.

A Tabela 17 especifica os valores calculados para todos estes parâmetros mencionados considerando-se as orientações de cálculo do DNIT 438 (2022c). A peneira média

corresponde à peneira de abertura mais próxima de 50% do NMAS. Já a peneira de controle primário é a peneira com abertura mais perto de 22% do NMAS. As peneiras seguintes seguem lógica parecida, mas sendo 22% da abertura da peneira imediatamente anterior, com SCS sendo 22% de PCS e TCS sendo 22% de SCS.

Tabela 17 – Parâmetros de Referência para as Peneiras de Controle

Misturas	Composições	NMAS	HS	PCS	SCS	TCS
Mistura CA	Composição A	19,0mm	9,5mm	4,8mm	1,2mm	0,3mm
	Composição B	4,8mm	2,4mm	1,2mm	0,3mm	0,075mm
Mistura FA (Original)	Composição A	4,8mm	2,4mm	1,2mm	0,3mm	0,075mm
	Composição B	2,4mm	1,2mm	0,6mm	0,15mm	0,075mm
Mistura FA (Matriz de Finos)	Composição A	19,0mm	9,5mm	4,8mm	1,2mm	0,3mm
	Composição B	6,3mm	2,4mm	1,2mm	0,3mm	0,075mm

Os valores das peneiras FA foram corrigidos de forma a resultar em uma matriz de finos. Pelo método tradicional, as peneiras definidas para a mistura FA resultariam em uma mistura de Brita e Areia Grossa sendo muito predominantes e estes são os agregados graúdos da mistura, o que indica que o parâmetro estabelecido para o NMAS não favoreceu a formação de uma mistura de matriz de finos para o caso da mistura FA.

De forma que se considerou neste estudo que exclusivamente para a matriz de finos, o NMAS corrigido a ser considerado seria igual à abertura da última peneira pela qual se passam todos os agregados da mistura, sendo estes os valores indicados pela Tabela 17.

Essa alteração de peneiras fará com que a Mistura FA especificamente não alcance as especificações de limites de proporções de grãos calculados ao fim do procedimento, mas foi uma alteração necessária de ser feita para a determinação de uma matriz de predominância de finos, eliminado o contato entre os grãos e fazendo com que o principal fator a ser avaliado seja a possível coesão que o rejeito traria para a amostra. Como para estas misturas já se espera alcançar valores de resistência baixos e se deseja mais avaliar o efeito da adição de rejeito em uma mistura considerada como inviável em um cenário real, permitiu-se realizar esta alteração não prevista pelo método sabendo-se que não seria positiva para a resistência.

Já a Mistura CA seguiu perfeitamente as orientações e parâmetros estabelecidos pelo método Bailey e normativas relacionadas, pois o objetivo desta mistura é potencializar a resistência ao máximo de forma a favorecer a adição de maior quantidade de rejeito.

4.2.3. Cálculo das Massas Unitárias das Misturas

Segue-se em parte as orientações da norma DNIT 437 (2022b) para determinação da Massa Unitária Solta (LUW) e da Massa Unitária Compactada (RUW) de cada composição das misturas, com os resultados sendo descritos pela Tabela 18. LUW se associa a uma condição em que nenhum ou pouco esforço de compactação foi aplicado, enquanto RUW está relacionada a uma condição de compactação mais significativa segundo a TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2002).

Tabela 18 – Valores de Massa Unitária

Misturas	Composições	LUW (kg/m ³)	RUW (kg/m ³)	Fator E'	CUW (kg/m ³)
Mistura CA	Composição A	1630,3	1630,3	1,00	1630,3
	Composição B	1799,0	1799,0	-	-
Mistura FA	Composição A	1604,3	1604,3	0,73	1171,1
	Composição B	1477,0	1477,0	-	-

A norma DNIT não faz menção à Energia de Compactação utilizada como parâmetro, mas recomenda o cálculo da Massa Unitária Específica (CUW) com base no valor de MUs para agregados graúdos. Como este estudo realizado se trata de uma adaptação do método Bailey para materiais não-asfálticos e como se pretende fazer uma análise sob a influência da Energia Modificada de compactação, julgou-se mais representativo utilizar os valores de RUW como base do cálculo de CUW e não os valores de LUW. Caso este estudo estivesse baseado na Energia Normal como parâmetro, as orientações da norma DNIT teriam sido seguidas.

Os valores do Fator E' foram estabelecidos como o valor médio dentre as faixas recomendadas pela DNIT 438 (2022c) para misturas de comportamento graúdo (entre 95% e 105%) e fino (entre 60% e 85%), sendo aplicados sobre o valor de RUW para definição de CUW na faixa mais grossa de cada mistura. Para a faixa mais fina, o valor será calculado com base na proporção de vazios.

A partir de então, sabendo-se que a faixa mais graúda dos agregados tende a definir o total de vazios pelo espaço que é formado entre seus grãos, se define que a faixa fina (Composições B) deve ocupar o espaço vazio definido entre os grãos da faixa graúda (Composições A) de forma que os valores de CUW das composições A são utilizados como referência na definição do volume de vazios a ser ocupado pela faixa fina.

Os valores de Massa Específica Aparente dos grãos (Gsb) definidos anteriormente nesta dissertação são utilizados em conjunto de CUW para definição do volume total de vazios

(Vv) que deve ser preenchido, conforme representado na Tabela 19 e seguindo os cálculos da Equação 2.

$$Vv (\%) = \left(1 - \frac{CUW}{Gsb \cdot 1000}\right) * 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Tabela 19 – Volume de Vazios (Vv) formado entre os Agregados da Composição A

Misturas	CUW (kg/m ³)	Gsb (g/cm ³)	Vv (m ³)	Vv (%)
Mistura CA	1630,3	2,61	0,3751	37,51%
Mistura FA	1171,1	2,54	0,5390	53,90%

Como estes percentuais representam o total de vazios que devem ser ocupados pela composição B de cada mistura, basta multiplicar o RUW dos agregados da composição B pela proporção de vazios para definir a contribuição que a composição B deve ter:

- *Mistura CA*: $CUW = 0,3751 * 1799 = 674,9 \text{ kg/m}^3$
- *Mistura FA*: $CUW = 0,5390 * 1477 = 796,1 \text{ kg/m}^3$

A contribuição da composição A já foi definida anteriormente por meio do valor de CUW calculado na Tabela 18. De forma que a massa unitária final de cada mistura deve ser a somatória dos valores indicados anteriormente para esta composição com estes valores definidos para a composição B com base no volume de vazios calculado. A Tabela 20 apresenta os resultados de Massa Unitária após a soma de ambas as composições para as duas misturas.

Tabela 20 – Valores de Massa Unitária Total (MU total)

Misturas	Composições	CUW (kg/m ³)	CUW total (kg/m ³)	Proporção (Pi) em Relação ao Todo (%)
Mistura CA	Composição A	1630,3	2305,2	70,72%
	Composição B	674,9		29,28%
Mistura FA	Composição A	1171,1	1967,2	59,53%
	Composição B	796,1		40,47%

4.2.4. Definição das proporções de cada composição na Mistura

Para a Peneira PCS estabelecida para cada mistura, foi analisado na composição A o percentual passante de agregados enquanto na composição B se avalia o percentual retido de agregados. Lembrando que para a Mistura FA a peneira de referência foi alterada para formação de uma matriz de finos, em seguida foram calculados estes percentuais em relação às proporções em relação ao todo estabelecidas no fim do subcapítulo anterior na Tabela 20, com estes resultados referidos pela nomenclatura OSM (“*Opposite Sized*”).

Material”). Em seguida, foram definidos os valores corrigidos destas mesmas proporções com base no valor de OSM calculado. Segue-se como orientação o método estabelecido pela TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2002).

Os resultados estão apresentados pela Tabela 21, sem ter ainda a inclusão do rejeito de minério como *filler*, que consiste no passo seguinte, onde o rejeito fica incluído na fração fina da mistura, referente à Composição B. A Equação 3 indica o cálculo usado para definição das proporções corrigidas (P_c).

$$P_c = (P_i - OSM) + OSM_{op} \quad (\text{Equação 3})$$

No qual OSM_{op} corresponde ao valor de OSM da composição oposta. Por exemplo, para a composição A seria o valor de OSM correspondente à composição B e vice-versa.

Tabela 21 – Proporções corrigidas de cada composição

Misturas	Composições	Percentual Passante (A) ou Retido (B) na PCP	OSM (%)	Proporção corrigida (P_c) em Relação ao Todo (%)
Mistura CA	Composição A	3,91%	2,76%	82,19%
	Composição B	48,61%	14,23%	17,81%
Mistura FA	Composição A	70,00%	41,67%	27,99%
	Composição B	25,03%	10,13%	72,01%

Com os valores das proporções corrigidas, finalmente é possível definir a quantidade de material passante na peneira de número #200 (abertura de 0,075 mm) em uma mistura estabilizada com estas proporções. E com base neste valor, estabelecer a quantidade ideal de *filler* que determinará a quantidade de rejeito aplicado.

É importante observar que a quantidade de *filler* foi determinada pelo método de tentativa e erro, sendo testados diferentes percentuais de forma a se adotar aquele que permitisse chegar mais próximo aos limites das proporções de agregados, a serem explicados no próximo capítulo.

Tabela 22 – Total de Rejeito recomendado pelo Método Bailey

Misturas	Composições	Percentual passante na peneira #200	Total Passante de <i>Filler</i> (%)	Total de <i>Filler</i> definido (%)	Ideal de Rejeito a adicionar (%)
Mistura CA	Composição A	0,05%	0,78%	0,78%	0,00%
	Composição B	0,73%			
Mistura FA	Composição A	0,06%	0,45%	8,97%	9,00%
	Composição B	0,40%			

Um resumo do procedimento usado para a definição do cálculo de *filler* se encontra na Tabela 22, enquanto as proporções finais considerando a adição do rejeito como *filler* estão na Tabela 23.

Tabela 23 – Proporção final de materiais calculada pelo Método Bailey

Misturas	Brita 1	Brita 0	Areia Grossa	Pó de Pedra	Areia Média	Rejeito de Minério
Mistura CA	19,73%	62,47%	5,34%	12,47%	-	0,00%
Mistura FA	-	6,16%	21,83%	-	63,02%	9,00%

Se observa que na Mistura CA, não é recomendado a adição de nenhuma quantidade de rejeito como era esperado pelo fato de ser uma mistura onde a resistência é definida primariamente pelo atrito entre a brita, com um material como o rejeito tendo um potencial disruptivo e sua adição sendo mais justificada por uma justificativa de reciclagem do material. Nesse caso, era de fato necessário potencializar ao máximo a resistência do material para permitir que possuísse uma base de resistência elevada e que permitisse o acréscimo de rejeito sem inviabilizar o potencial uso do material.

Tabela 24 – Faixas Granulométricas das Misturas-base

Peneira		% de Grãos Passantes na Peneira	
Número (#)	Abertura (mm)	Mistura-base CA	Mistura-base FA
1''	25	100,00%	100,00%
3/4''	19	100,00%	100,00%
1/2''	12,5	84,56%	99,37%
3/8''	9,5	50,24%	96,86%
1/4''	6,3	30,14%	95,00%
4	4,8	20,37%	90,91%
8	2,4	12,24%	69,94%
16	1,2	9,60%	56,59%
30	0,6	7,34%	33,91%
50	0,3	4,53%	18,39%
100	0,15	1,69%	10,41%
200	0,075	0,78%	8,92%

Já na Mistura FA, apesar de serem esperadas resistências mais baixas e mais inviáveis de um ponto de vista técnico, se observa que a adição de rejeito em 9% trouxe os resultados

mais próximos dos limites que serão estabelecidos no próximo capítulo, evidenciando que a adição de rejeito nesta mistura pode possuir uma justificativa técnica para além da ambiental, com o rejeito contribuindo para uma melhor resistência

As misturas definidas pela Tabela 23 são consideradas as misturas de base deste estudo. Ou seja, variações na proporção de rejeito pelos ensaios realizados foram feitas de forma a se manter igual relação entre as proporções de todos os outros agregados. Tais misturas-base em si possuem a granulometria indicada pela Tabela 24, após a estabilização de todos os materiais.

4.2.5. Limites de proporções entre os Agregados

Por fim, verifica-se se as faixas granulométricas das misturas-base atendem os limites de proporções especificados pela TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2002), com o propósito de avaliar os resultados da estabilização granulométrica.

As peneiras utilizadas como referência são as já mencionadas anteriormente, sendo que para a mistura FA se utiliza nesta etapa de avaliação as peneiras originais calculadas pois estas que são previstas pelo método, tendo sido apenas feita uma adaptação anteriormente para obtenção da matriz de finos desejada.

Existem três parâmetros a serem avaliados na mistura CA: a proporção graúda de ambas as misturas (%G); a proporção graúda dos grãos finos (%Fg) e a proporção fina dos grãos finos (%Ff), todas respectivamente determinadas pelas Equações 4, 5 e 6.

$$\%G = \frac{(\% \text{ passante em HS} - \% \text{ passante em PCS})}{(100 - \% \text{ passante em HS})} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\%Fg = \frac{(\% \text{ passante em SCS})}{(\% \text{ passante em PCS})} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\%Ff = \frac{(\% \text{ passante em TCS})}{(\% \text{ passante em SCS})} \quad (\text{Equação 6})$$

Para a mistura FA o processo é semelhante, mas há um procedimento de redefinição de peneiras (sem qualquer relação com a adaptação feita anteriormente) e estas novas peneiras que são usadas como referência nos cálculos das proporções, substituindo as peneiras antigas. O PCS de referência da mistura FA passa de 1,2 mm para 0,3 mm e o HS de 2,4 mm para 0,6 mm por exemplo. A Equação 4 também passa a ser igual a Equação 7.

$$\%G = \frac{(\% \text{ passante em HS nova} - \% \text{ passante em PCS nova})}{(\% \text{ passante em PCS original} - \% \text{ passante em HS nova})} \quad (\text{Equação 7})$$

Os resultados dos cálculos assim como a comparação com os limites estabelecidos como recomendados por VAVRIK et al. (2002) e que são definidos com base no NMAS, estão descritos pela Tabela 25.

Tabela 25 – Proporções granulométricas e Limites estabelecidos

Proporção	Mistura CA	Limites Padrão CA	Atende?	Mistura FA	Limites Padrão FA	Atende?
% G	60,04%	60% a 75%	SIM	68,41%	60% a 100%	SIM
% Fg	47,13%	35% a 50%	SIM	48,51%	35% a 50%	SIM
% Ff	47,18%	35% a 50%	SIM	-	Não é calculado	-

4.2.6. Avaliações Gerais

Pela Tabela 25 percebe-se que o Método de Dosagem Bailey atendeu os limites especificados tanto para a mistura CA quanto para a mistura FA, de forma que ambas se encontram enquadradas dentro da proposta do procedimento e as dosagens explicitadas serão consideradas como a base para as misturas que serão analisadas neste estudo. As variáveis estipuladas para a quantidade de rejeito foram determinadas ao fim deste procedimento, definindo-se os teores de 0% de rejeito na mistura CA e 9% de rejeito em FA como as misturas-base que atendem as especificações do Método Bailey e que em teoria se esperam resultados mais elevados de resistência. Dessa forma, os resultados dos ensaios descritos nos próximos capítulos devem também ter a função de confirmar ou não se estas variáveis de fato potencializam os resultados de resistência.

Pelo fato dessa quantidade ótima variar entre 0% e 9% nas duas misturas, se utilizou da faixa entre 0% de rejeito e 10% de rejeito como aquelas nas quais se obteriam maiores resistências, sendo estabelecidas as variáveis de 0%, 5% e 10% para as proporções de rejeito. Na mistura FA especificamente, foi adotado o valor de 9% no lugar de 10% para se alinhar exatamente com o resultado da dosagem da mistura-base.

Com a possibilidade de se adicionar uma quarta variável, escolheu-se adotar a proporção máxima de rejeito que poderia ser adicionado em teoria justamente para poder avaliar o comportamento das misturas dentro de uma faixa de variação maior. Como a norma DNIT 141 (2022a) estabelece para bases de pavimentos um máximo de 25% dos agregados passando pela peneira de abertura 0,075 mm, seguindo-se a faixa de granulometria D especificada pela norma, fixou-se uma variável de 24% de rejeito neste estudo. Assim foram definidas as quatro variáveis de proporção de rejeito e as duas variáveis de tipo de mistura (CA e FA) para os procedimentos seguintes.

5. Resultados dos Ensaio Principais

Este capítulo apresenta os resultados dos procedimentos principais que efetivamente quantificaram o comportamento das misturas estabelecidas ao final do capítulo anterior. Estão incluídos nestes o ensaio de compactação que determinou a umidade ótima que foi utilizada em cada mistura; o ensaio de ISC para determinação da capacidade de suporte; o ensaio de MR para avaliação do comportamento elástico e o ensaio de DP pelo método do multiestágio para comparação das misturas por um outro ponto de vista de resistência.

Ao final, é interessante comparar os resultados encontrados pois não necessariamente os maiores valores de resistência serão encontrados para a mesma proporção de rejeito em todos os ensaios, de forma que noções de uma quantidade ideal de rejeito podem vir a variar de acordo com o parâmetro estabelecido.

5.1. Resultados de Ensaio de Compactação Proctor

É importante reforçar que a Energia Modificada de compactação foi utilizada como parâmetro em todas as misturas deste capítulo, de forma que os resultados apresentados devem ser considerados sob o contexto de que a maior energia de compactação foi aplicada, o que potencializa os resultados tendo em vista o objetivo de utilização do material em pavimentos. Nesse sentido, os resultados de massa específica aparente obtidos são em teoria os mais elevados possíveis dentro dos parâmetros de compactação previstos por normativas brasileiras.

5.1.1. Misturas CA

A Tabela 26 apresenta um resumo dos resultados de massa específica aparente seca e os valores de umidade ótima correspondentes para cada mistura. Pode se observar que conforme mais rejeito é acrescentado, maior tende a ser a massa específica máxima, o que se alinha com o valor da massa específica do rejeito ser maior que a da brita.

Tabela 26 – Resumo dos Resultados de Ensaio de Compactação para misturas CA

Mistura	Proporção de Rejeito e Material Granular	Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm ³)	Umidade Ótima
0% CA	0% rejeito + 100% material granular	2,577	6,17%
5% CA	5% rejeito + 95% material granular	2,665	4,76%
10% CA	10% rejeito + 90% material granular	2,747	4,57%
24% CA	24% rejeito + 76% material granular	2,792	4,89%

A Figura 33 representa graficamente os resultados da Tabela 26 por meio das curvas de compactação de cada uma das misturas. Nota-se que a curva correspondente a 24% CA é a mais acentuada dentre as quatro apresentadas, o que indica uma maior sensibilidade desta mistura em relação à variação da umidade ainda que esta mistura alcance os valores de massa específica mais altos por conta da maior presença do rejeito.

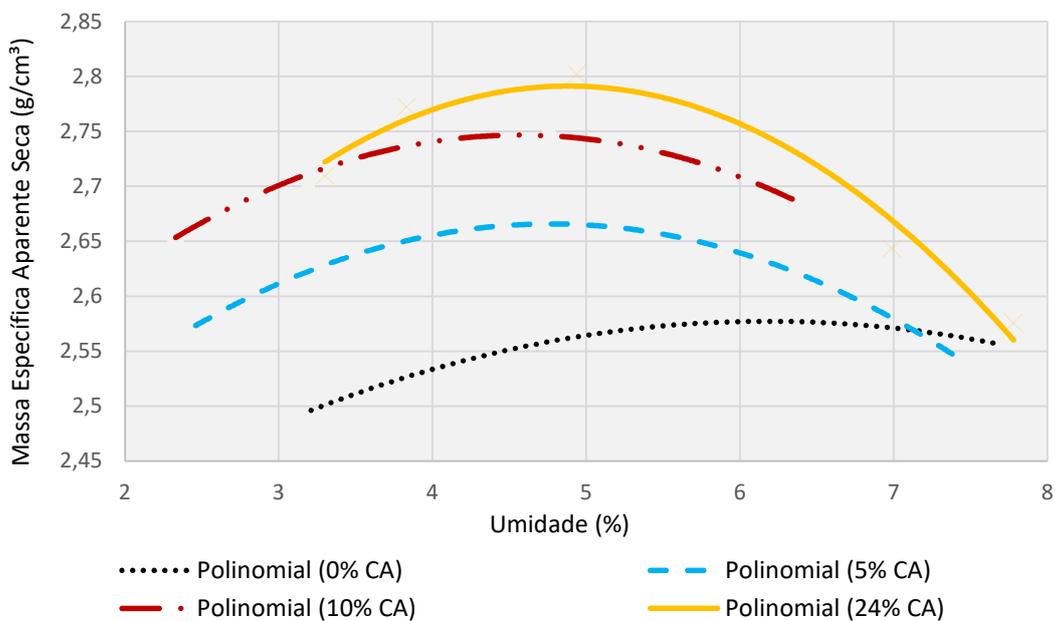


Figura 33 – Curvas de Compactação das Misturas CA

Em contraposição, a mistura 0% CA possui a curva que mais se aproxima da horizontal, indicando maior previsibilidade da densidade com a variação da umidade, uma característica positiva pois faz com que seja mais improvável que pequenas variações na umidade tragam prejuízos significativos para a resistência dos materiais.

No que diz respeito aos valores de umidade ótima, foi encontrado um valor maior para a mistura sem rejeito, enquanto nas outras esses valores se mantiveram estáveis e próximos entre si, com uma faixa de variação entre 4,57% e 6,17%. De forma que no geral a adição de rejeito causou uma redução da umidade enquanto elevou a massa específica, o que se correlaciona com o espaço de vazios diminuindo pois com o preenchimento do rejeito destes vazios, há menor espaço a ser ocupado pela água.

Por fim, é notável que as adições iniciais de rejeito tiveram um maior impacto nessa elevação da massa específica máxima atingida. Mas na mistura 24% CA, o aumento deste valor foi menor em relação ao valor encontrado para a mistura 10% CA, evidenciando que é possível que os maiores impactos positivos da adição de rejeito estejam na adição das frações iniciais.

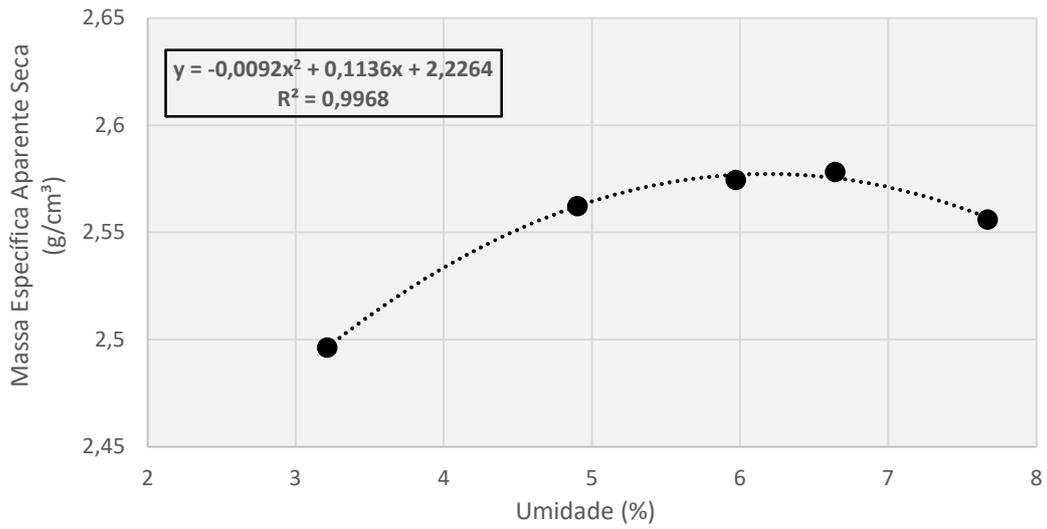


Figura 34 – Curva de Compactação da Mistura 0% CA

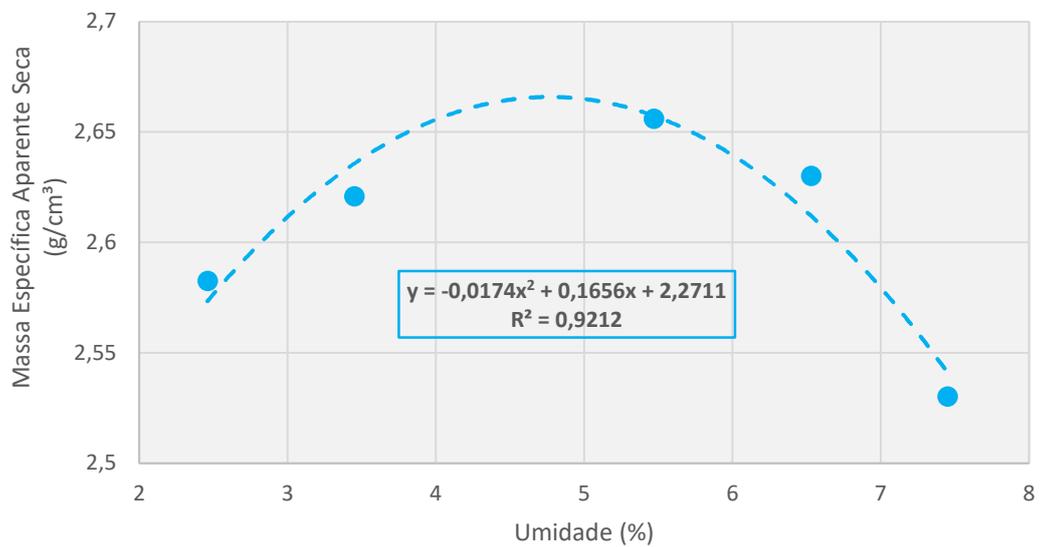


Figura 35 – Curva de Compactação da Mistura 5% CA

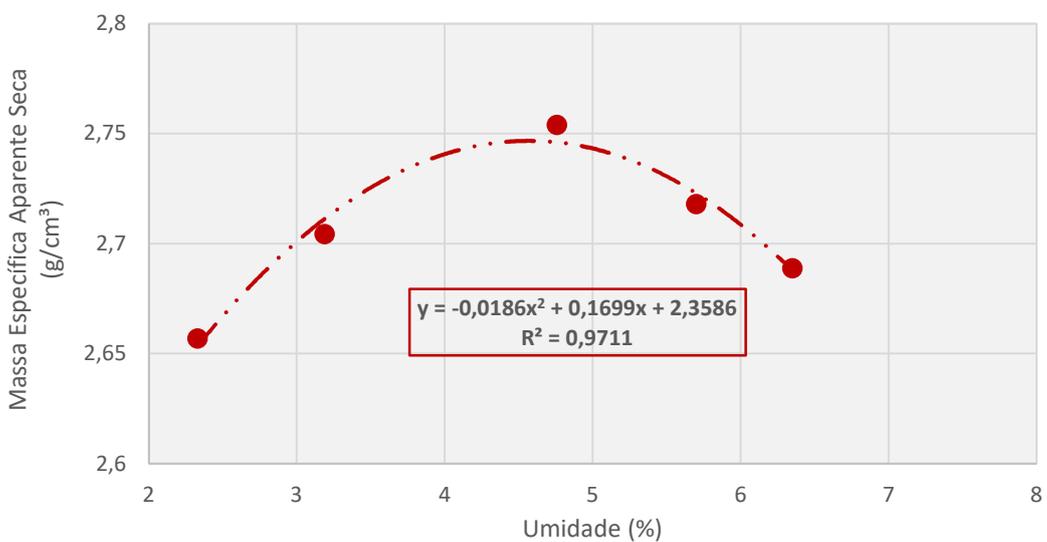


Figura 36 – Curva de Compactação da Mistura 10% CA

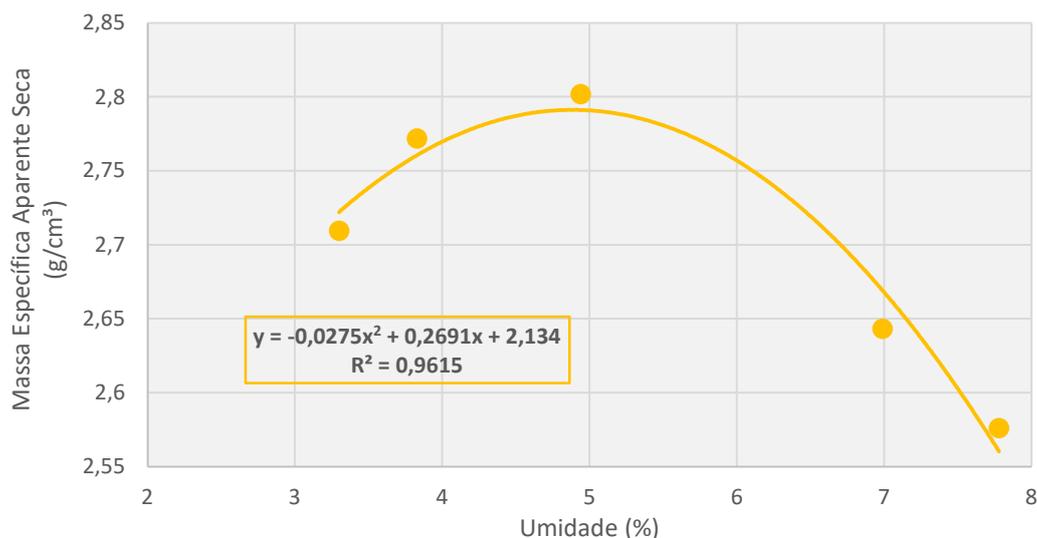


Figura 37 – Curva de Compactação da Mistura 24% CA

As Figuras 34, 35, 36 e 37 trazem as curvas individualmente, com os pontos específicos de mensuração que permitiram que fossem traçadas, assim como também as equações de cada uma das curvas e a correlação R^2 entre os dados. Os pontos de umidade foram definidos visualmente em laboratório por meio do aspecto da mistura durante o procedimento.

5.1.2. Misturas FA

A Tabela 27 contém a descrição dos resultados gerais encontrados para as misturas FA no ensaio de compactação. Novamente, a massa específica seca apresentou tendência de crescimento de acordo com o acréscimo de rejeito, enquanto o valor de umidade ótima gradativamente foi se reduzindo. Isso reforça que a adição de rejeito traz essa tendência que é importante de ser notada por conta da menor necessidade de água, um elemento que pode representar maior incerteza para o desempenho estrutural.

Tabela 27 – Resumo dos Resultados de Ensaio de Compactação para misturas FA

Mistura	Proporção de Rejeito e Material Granular	Massa Específica Aparente Seca Máxima (g/cm³)	Umidade Ótima
0% FA	0% rejeito + 100% material granular	2,189	10,01%
5% FA	5% rejeito + 95% material granular	2,281	8,38%
9% FA	9% rejeito + 90% material granular	2,408	7,93%
24% FA	24% rejeito + 76% material granular	2,601	6,31%

Os valores de massa específica para as misturas FA foram notavelmente mais baixos que os das misturas CA, enquanto os valores de umidade ótima foram mais altos. A adição de rejeito nas misturas FA claramente favoreceu mais fortemente a realização da

compactação no laboratório, o que é refletido pelo aumento maior da massa específica entre as amostras em comparação com as misturas CA, onde esse aumento também ocorreu com a adição de rejeito, mas de uma forma mais leve.

A Figura 38 representa graficamente os resultados da Tabela 27 por meio das curvas de compactação de cada uma das misturas. Novamente se verificou a gradual acentuação das curvas com a adição de rejeito, indicando o efeito de maior variabilidade dos rejeitos nos resultados a depender da quantidade de água na mistura.

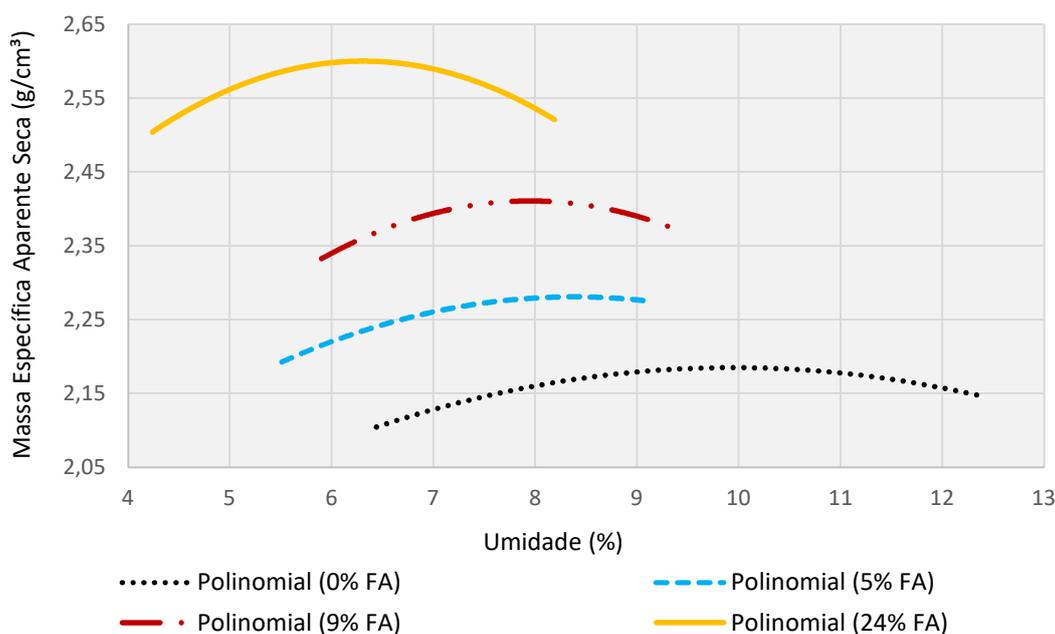


Figura 38 – Curvas de Compactação das Misturas FA

Nas misturas FA se verificou uma maior dificuldade de se trabalhar no ramo mais úmido, razão pela qual algumas curvas estão mais curvas e concentradas no ramo seco e próximo da umidade ótima. No entanto, é possível observar uma tendência ainda mais clara que nas misturas CA, com as curvas ocupando posições mais separadas na Figura 38. E desta vez o incremento na massa específica máxima foi mais constante, tendo maior salto da amostra de 9% FA para 24% FA. Já nas misturas CA, a variação da massa específica da amostra 10% CA para a 24% CA havia sido a menor.

Isso fortalece as indicações de dosagem encontradas no Método Bailey como bem-sucedidas, pois as amostras 0% CA e 9% FA eram justamente as que haviam atendido as especificações de limite do método para o seu grupo de mistura, apontando que uma maior quantidade de rejeito é mais positiva nas misturas FA. Ainda assim, os valores mais baixos de massa específica aparente máxima para as misturas FA pode ter relação com menores valores de resistência, algo que será avaliado nos outros ensaios realizados.

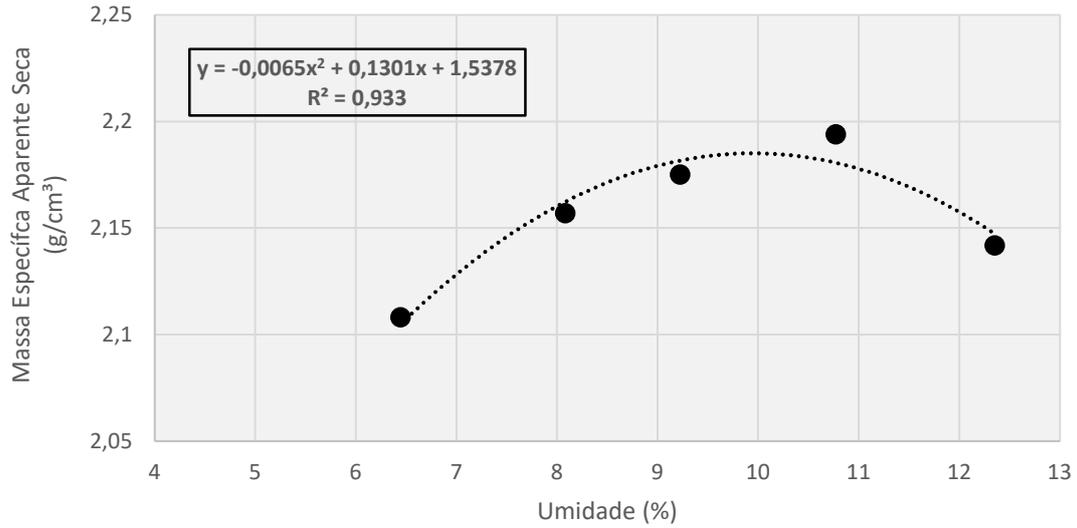


Figura 39 – Curva de Compactação da Mistura 0% FA

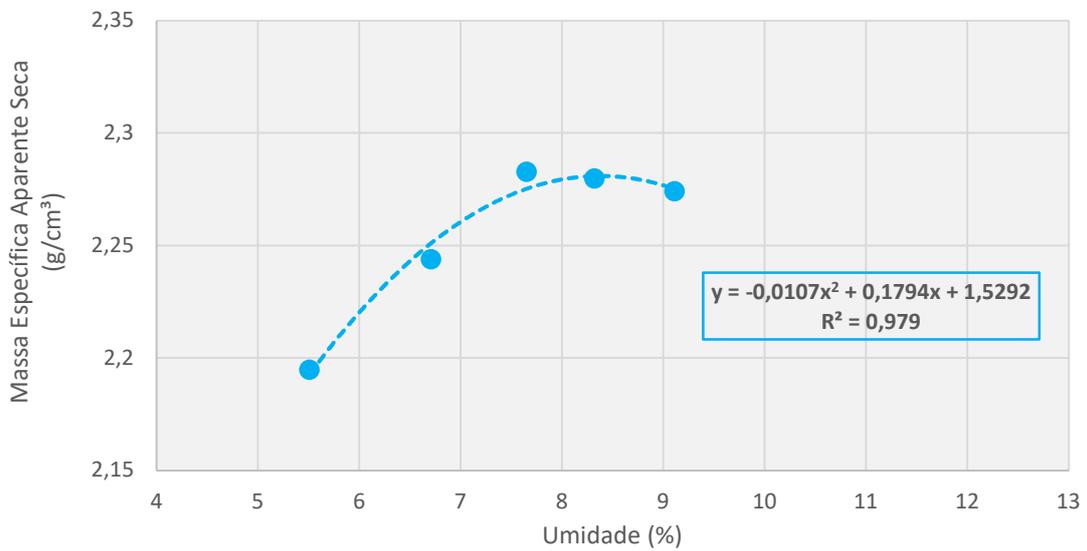


Figura 40 – Curva de Compactação da Mistura 5% FA

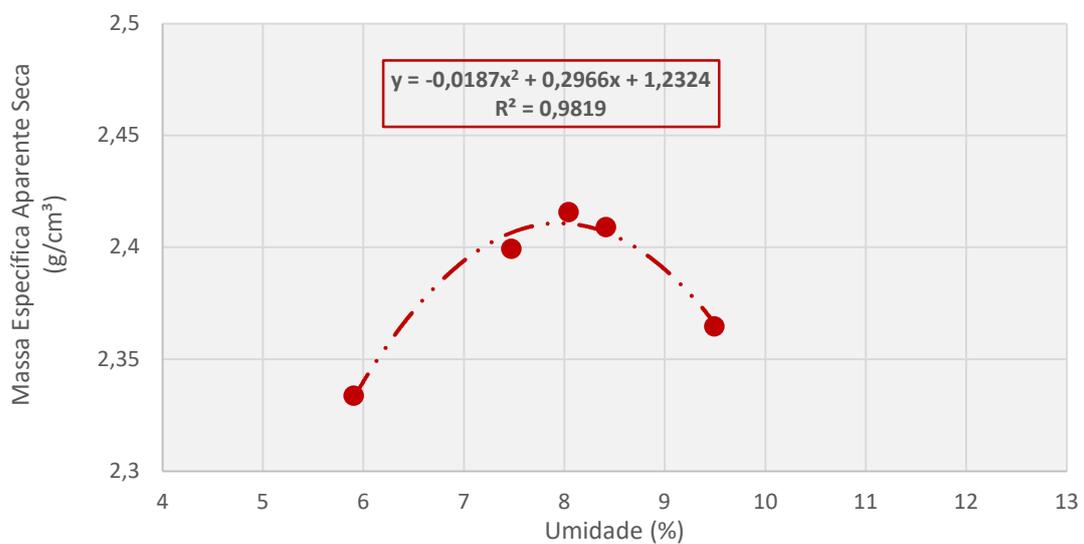


Figura 41 – Curva de Compactação da Mistura 9% FA

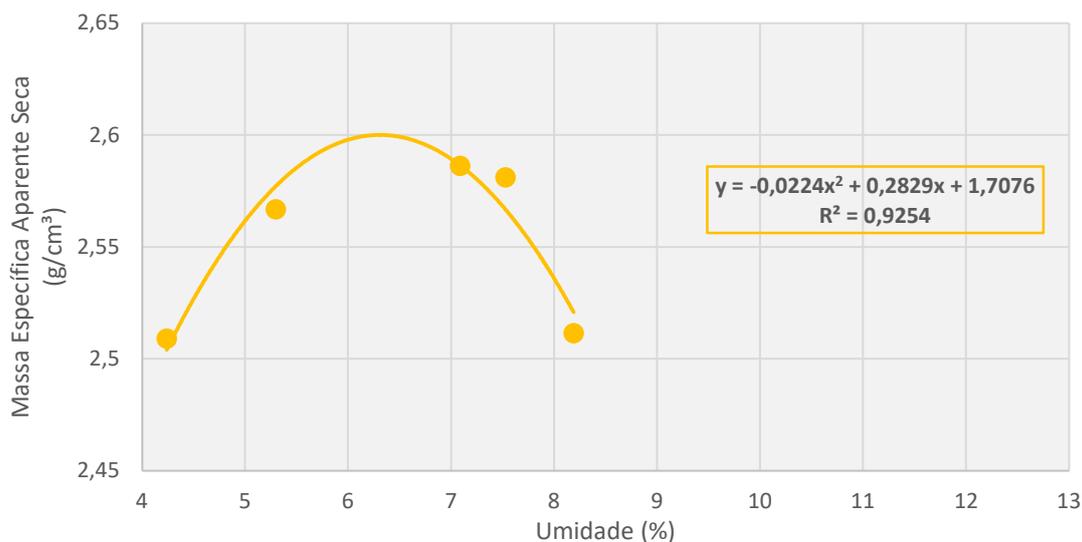


Figura 42 – Curva de Compactação da Mistura 24% FA

De qualquer forma, as Figuras 39, 40, 41 e 42 trazem os traçados específicos das curvas de compactação das misturas FA, assim como também as equações correspondentes de cada uma das curvas e a correlação R^2 entre os dados. Em média, as misturas FA apresentaram maior variabilidade nos parâmetros obtidos pelos ensaios de compactação em comparação com as misturas CA. Os resultados dos próximos ensaios devem proporcionar uma visão mais ampla se esta observação se alinha para questões diretamente ligadas à resistência ou não.

Separadamente para uma mistura pura de 100% de rejeito, também foi determinada uma curva de compactação Proctor para melhor caracterização do rejeito em si, embora esta mistura não tenha sido avaliada nos ensaios de MR ou de DP por conta de seu desempenho muito baixo nos ensaios de ISC. Esta se encontra desenhada na Figura 43 e teve como base a energia modificada, confirmando-se uma curva de maior acentuação que indica maior sensibilidade à umidade e de maior massa específica seca máxima em relação às curvas apresentadas anteriormente.

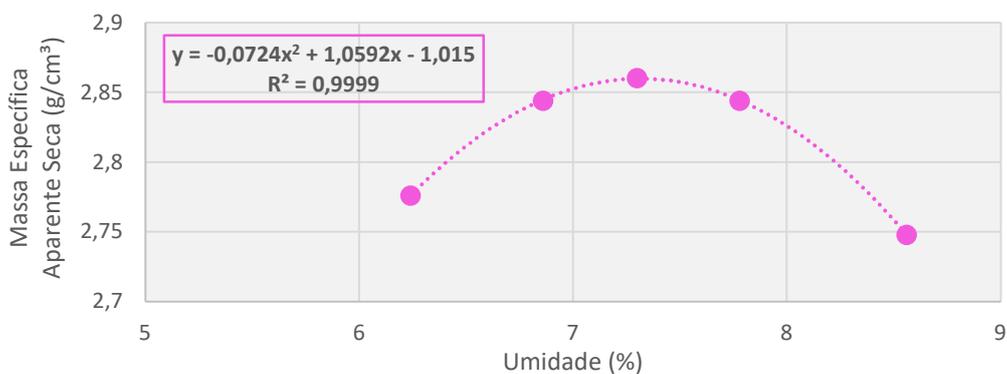


Figura 43 – Curva de Compactação do Rejeito Puro

5.2. Resultados de Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

De todos os ensaios executados, este é o único que possui valores especificados em normas brasileiras (DNIT 141, 2022a) para camadas de base de pavimentos, sendo estabelecido o valor de ISC igual ou acima de 60% para intensidades de tráfego mais leves ou 80% para intensidades mais pesadas. Para sub-bases o valor requerido pelo DNIT 139 (2010) para o ISC é igual ou acima de 20%.

Os valores de expansão máxima do solo na imersão na água, procedimento feito em conjunto com a metodologia para definição do Índice de Suporte Califórnia, também possuem seus limites especificados pelas normativas. A expansão não deve ultrapassar 0,5% para materiais destinados para camadas de base e 1,0% para misturas utilizadas em sub-base.

De maneira que os resultados de ISC e expansão apresentados permitem classificar a viabilidade do uso das misturas na pavimentação com base nestas especificações. Tendo em vista o uso da energia modificada na compactação e o método Bailey de dosagem para potencializar o intertravamento entre os grãos, entende-se que foram adotadas técnicas com o objetivo de se verificar os maiores valores de capacidade de suporte possíveis para os materiais utilizados em seus respectivos tipos de mistura, CA e FA.

A Figura 44 apresenta os resultados de ISC encontrados para as misturas CA. É possível confirmar índices elevados como se esperava, com as misturas contendo 0%; 5% e 10% todas obtendo valores de ISC acima de 60% e 80%, o que fariam delas misturas viáveis para camada de base de pavimentos mesmo na condição de um tráfego mais intenso que exige um ISC mínimo de 80%.

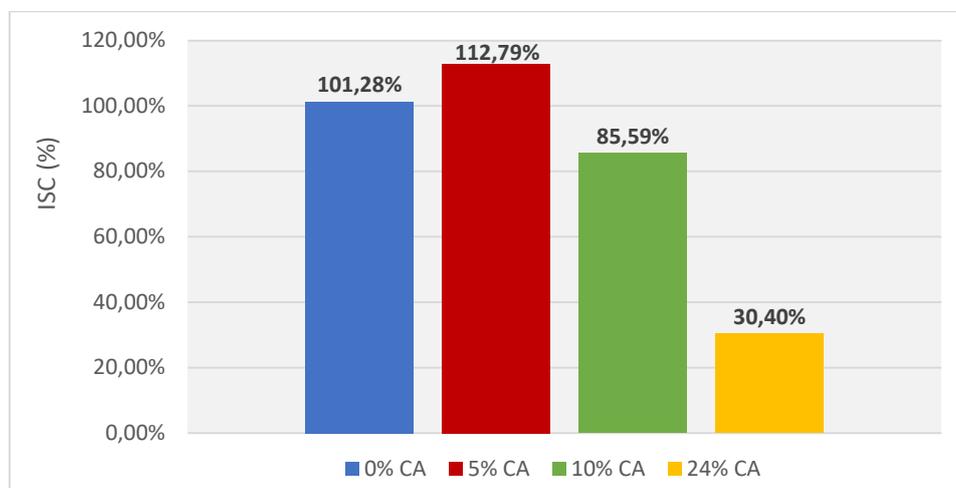


Figura 44 – Resultados de ISC (%) das misturas CA

Pode-se observar que a mistura 24% CA foi a única que não se encaixou tecnicamente com os requisitos para base de pavimentos, mas ainda assim poderia ser utilizada como mistura de sub-base. Houve uma queda brusca no valor de ISC entre as proporções de 10% e 24%, evidenciando que a partir de certa proporção maior de rejeito, o impacto na redução da capacidade de suporte passa a ser demasiado grande para ser considerado tecnicamente interessante a adição de rejeito.

Ainda assim, os resultados até a proporção de 10% de rejeito foram no geral positivos, com o rejeito apresentando um impacto melhor nas misturas CA do que o esperado após a dosagem pelo Método Bailey. Isso porque a mistura que havia se encaixado nos limites de proporção era a de mistura 0% CA, o que indicava que talvez a adição de qualquer quantidade de rejeito pudesse ser prejudicial para o indicador ISC.

No entanto, a mistura de 5% CA foi a que apresentou maiores valores de ISC, ainda que tanto 0% CA e 5% CA tenham ambas terminado com ISC acima de 100%. Isso indica que o preenchimento de vazios possa ter trazido alguma contribuição até certa proporção limitada de rejeito. Enquanto o excesso do rejeito a partir de certo ponto tende a ofuscar o protagonismo do contato entre as britas, com perda de resistência que afeta o ISC.

Pelos resultados, se conclui que a adição de até 5% do rejeito seria justificável de um ponto de vista técnico. Valores acima de 5% de rejeito já poderiam representar uma queda na resistência mais ainda ter um resultado de valor alto viável para uso desde que não fossem muito maiores. A mistura de 10% CA por exemplo, reteria mais de 84% do valor de ISC da mistura de 0% CA ao mesmo tempo em que atende as especificações mais rígidas para bases de pavimentos segundo a normativa do DNIT. De forma que caso em certa situação se deseje elevar o potencial de reciclagem da mistura em troca de apenas uma leve redução da resistência, ainda seria justificável a adição do rejeito.

Ainda assim, não seria possível aproveitar elevadas quantidades do rejeito, acima de 20%, a não ser na camada de sub-base. Quanto maiores são as exigências para o ISC da camada do pavimento, menor é o potencial de reciclagem pois a partir de um certo ponto o rejeito tem um efeito desestabilizador na mistura.

Já os resultados observados para as misturas FA estão na Figura 45. Como esperado, os resultados da matriz de finos são bastante mais baixos em relação aos encontrados para as misturas CA, sendo possível somente o uso destas em camadas de sub-base. A exceção seria a mistura 24% FA, que seria inutilizável por possuir um valor de ISC muito baixo.

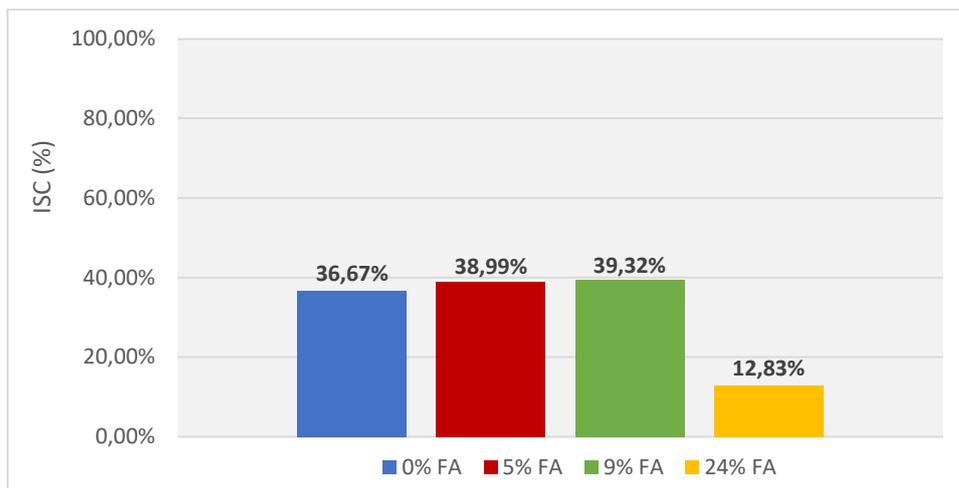


Figura 45 – Resultados de ISC (%) das misturas FA

Ainda assim, é confirmada a tendência que era esperada a partir do resultado do Método Bailey, no qual a mistura-base era a mistura 9% FA. De fato, pelo ensaio de ISC esta amostra mostrou ter o maior valor de capacidade de suporte, ainda que esta diferença não seja exatamente significativa, com apenas pouco mais de 2,5% de variação no ISC em relação à mistura sem a presença de rejeito. Isto indica que apesar do potencial de aproveitamento das misturas FA ser uma quantidade maior de rejeito que nas misturas CA, os maiores benefícios foram observados nas misturas CA onde a adição de somente 5% de rejeito foi suficiente para obter um aumento de mais de 10,0% no valor de ISC.

Dessa forma, pode-se dizer que o benefício trazido pelo rejeito teve um maior impacto em elevar a resistência quando o material foi aplicado de uma forma complementar a uma mistura que já era resistente por si só, baseada primariamente no atrito entre grãos (CA). Já em uma mistura de resistência baixa (FA) na qual a coesão entre os grãos ocuparia um maior protagonismo em relação à resistência, apesar de se mostrar benéfica os resultados foram limitados ou até mesmo insignificantes, possivelmente por conta da limitação trazida pelo silte nesse respeito. Assim, a adição de rejeito como *filler* é até justificável do ponto de vista técnico, embora seja mais em um sentido de neutralidade, mantendo-se níveis semelhantes de ISC com até 9% de rejeito.

Em relação aos resultados de expansão encontrados, estes estão descritos na Tabela 28 para todas as misturas. Na verdade, não se verificou a ocorrência de expansão em nenhuma das misturas, o que ocorreu no geral foi a estabilidade praticamente total das misturas CA e uma leve retração nas misturas FA que é praticamente nula, decorrente do rearranjo de partículas durante a imersão que é normal ocorrer em valores baixos como

os mensurados para materiais granulares, ainda mais levando-se em consideração o menor ISC das misturas FA em comparação com as misturas CA.

Tabela 28 – Resultados de Expansão para as Misturas

Misturas		Expansão (%)
CA	0% CA	0,00%
	5% CA	0,00%
	10% CA	0,00%
	24% CA	- 0,04%
FA	0% FA	- 0,17%
	5% FA	- 0,34%
	9% FA	- 0,09%
	24% FA	- 0,17%

Deve-se observar que devido à impossibilidade de acompanhamento diário, além do fato de as variações serem praticamente nulas, o valor de expansão somente foi mensurado no dia final do procedimento de imersão. Os resultados em geral atenderam as especificações das normativas, por não ter sido verificada a ocorrência de expansão.

Separadamente e somente para os ensaios de ISC e expansão, para efeitos de caracterização do material, também foi avaliado o comportamento de uma mistura pura contendo 100% de rejeito de minério de ferro, na energia modificada. Foi encontrado um valor de ISC de 9,1% para o rejeito puro nestas condições em sua umidade ótima, com expansão medida de 0,34%, diferentemente da retração verificada nas outras misturas. Apesar do valor de expansão se adequar às especificações, a capacidade de suporte mensurada é demasiado reduzida para qualquer aproveitamento do material sem a realização de qualquer tipo de estabilização.

Etim *et al.* (2017) no geral verificou valores de ISC otimizados dentro de uma faixa entre 0% até 10% de rejeito de minério de ferro fino dentro de misturas solo-cal, encontrando um teor ótimo de 8% tanto em condições saturadas quanto não saturadas em suas análises. O estudo também realiza ensaios de compressão simples que se encontram alinhados com estes resultados. Mesmo não sendo aqui utilizada a cal nesta pesquisa, que poderia gerar reações pozolânicas que contribuem para maiores resultados de resistência, a mesma tendência de aumento de indicador ISC – indiretamente relacionado à resistência - até certa proporção semelhante foi verificada, seguida de redução desta resistência em proporções de rejeito fino mais elevadas.

5.3. Resultados de Ensaio de Módulo de Resiliência

O ensaio de Módulo de Resiliência (MR) foi um dos principais procedimentos executados para avaliações mecanicistas das misturas em conjunto com os ensaios de DP, sendo recomendado pela DNIT 141 (2022a). Possui a função de avaliar o comportamento elástico das misturas, também chamado de resiliente por conta da capacidade elástica de se recuperar assim que as cargas deixam de ser aplicadas.

Segundo uma análise realizada em CUNTO (1998), solos granulares tendem a ter seu comportamento resiliente mais influenciado por tensões confinantes enquanto solos coesivos são mais influenciados pelos valores de tensão desvio. Razão pela qual optou-se por analisar os resultados de MR por meio de ambas as tensões tanto separadamente quanto em conjunto.

A primeira análise é feita por meio de uma simples verificação da variação do MR por valores médios de tensões confinantes fixos aplicados, independentemente da tensão desvio. A segunda análise relaciona os valores de MR encontrados com a tensão desvio para diferentes razões de tensões σ_1/σ_3 , cujos valores correspondentes são relacionados pela Equação 8.

$$\sigma_1 = \text{Tensão Principal Máxima} = \sigma_d + \sigma_3 \quad (\text{Equação 8})$$

De forma que estas razões de tensões σ_1/σ_3 presentes na segunda análise são basicamente equivalentes a razão entre a tensão desvio pela tensão confinante acrescido de uma unidade. Se a tensão desvio for igual à tensão confinante por exemplo, o valor da razão σ_1/σ_3 é 2. Quando a tensão desvio é o dobro da confinante, a razão passa a ser igual a 3 e assim sucessivamente. Conforme essa razão de tensões aumenta, mais se estimula o material estudado a entrar em ruptura, tendo em vista que a tensão principal aplicada possui efeito desestabilizador. Em materiais granulares com bom intertravamento entre grãos, se espera que o MR aumente conforme se eleva a razão de tensões.

Também é feita uma terceira análise dos resultados por meio dos coeficientes de regressão calculados que melhor se ajustam aos dados obtidos, avaliando-se a variação destes. Tais coeficientes se referem a k_1 , k_2 e k_3 da Equação 9 sugerida pelo modelo composto, o qual obteve os melhores resultados de ajuste na pesquisa de BONZANINI (2011), prevendo o valor do MR com base tanto na tensão confinante quanto pela tensão desvio.

$$MR = k_1 * \sigma_3^{k_2} * \sigma_d^{k_3} \quad (\text{Equação 9})$$

Deve ser notado que para cada mistura foram mensurados todos os valores de MR para cada um dos 18 pares de tensão estabelecidos pelo DNIT 134 (2018a). No entanto, foi verificado que o valor correspondente ao primeiro par de tensões tendia a ser mais dissociado do restante, extremamente mais elevado que o esperado em todas as misturas. Conforme o equipamento triaxial media os dados para o cálculo de MR, esse problema diminuía e desaparecia para os pares de tensões seguintes de forma que se entendeu essa questão como o equipamento se ajustando no início do ensaio pois às vezes eram necessários mais de 10 ciclos de carga para se alcançar um resultado enquanto nos pares de tensão seguintes não era verificada esta questão, bastando o mínimo de 10 ciclos de carga estabelecidos pelo DNIT 134 (2018a).

De maneira que todas as análises feitas aqui consideraram apenas os dados de 15 pares de tensão, com os 3 pares de tensão correspondentes à tensão confinante mais baixa de 0,02 MPa tendo sido descartados para esta finalidade devido à sua baixa correlação. Os resultados de MR são apresentados por meio de gráficos e das equações calculadas por cada um dos modelos.

5.3.1. Modelo Simples - Módulo de Resiliência x Tensão Confinante

As misturas avaliadas são compostas predominantemente por materiais granulares, e, portanto, é compreendido que o atrito entre os grãos é a principal origem da resistência dessas misturas. Nesse contexto, a tensão confinante, que é aplicada lateralmente ao redor das misturas, tem um papel fundamental. Ao ser aplicada, ela força o contato entre os grãos, o que aumenta o atrito entre as partículas, o que contribui para maior resistência do material mesmo considerando que as partículas granulares tendem naturalmente a se repelir devido às suas características físicas, como o formato e a carga superficial, o que pode dificultar o contato entre elas.

Devido a essa influência, se julgou ser interessante em realizar uma comparação dos resultados das misturas com base na tensão confinante como variante, independentemente do valor da tensão desvio. Como existem 3 razões de tensões σ_1/σ_3 previstas pela normativa em diferentes tensões confinantes fixas na qual a tensão desvio que se ajusta de acordo com a razão, foi possível condensar os 15 dados analisados em 5 para cada mistura por meio do valor de MR médio de 3 valores obtidos para uma mesma tensão confinante, independente da razão de tensões mensurada. Esse tipo de procedimento somente foi realizado na análise da tensão confinante pois seus valores especificados em

norma tendem a ser fixos, enquanto os valores de tensão desvio são definidos em razão do valor da tensão confinante.

A Figura 46 apresenta o conjunto de curvas para todas as misturas CA. A primeira observação a ser feita com base na figura é de que para estas misturas se confirmou a influência bem significativa da tensão confinante, com os resultados de resiliência para todas as misturas sendo bem próximos para tensões σ_3 baixas, mas se distanciando conforme maiores valores de σ_3 eram aplicados.

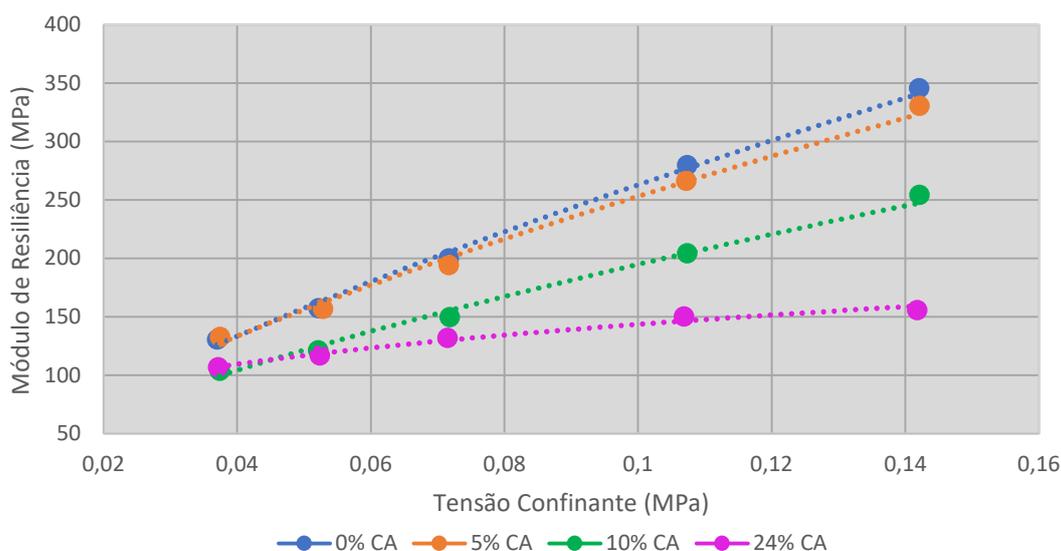


Figura 46 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante para Misturas CA

No entanto essa influência é claramente maior de acordo com a maior proporção de materiais granulares presentes na mistura, o que implica em uma quantidade de rejeito menor. Na mistura 24% CA o fato de o MR ter tido um aumento mínimo com o aumento de σ_3 possivelmente indica que a adição de rejeito nesta proporção de 24% compromete significativamente o desempenho da mistura pois a curva referente a ela está mais próxima da horizontal, o que não se esperaria para materiais granulares.

No entanto, a mistura 5% CA apresentou resultados muito próximos aos da mistura 0% CA, indicando que a adição de rejeito na proporção de 5% não traz efeitos negativos significativos do ponto de vista do comportamento resiliente. Já a mistura 10% CA representou um meio termo no qual se observa que em tensões confinantes elevadas o potencial do atrito entre os grãos deixa de ser explorado ao seu máximo, mas ainda atingindo valores notavelmente mais altos que a mistura, evidenciando que o potencial resiliente original não foi totalmente comprometido com a adição do rejeito.

A segunda observação a ser realizada é que estes resultados se alinham mais com o esperado pela dosagem pelo Método Bailey do que com os resultados de ISC que haviam verificado melhor desempenho para a mistura 5% CA. Não se esperava necessariamente que todos os resultados se alinhassem pois são verificadas características distintas que são influenciadas por alguns parâmetros distintos entre si. O ISC é uma medida de capacidade de suporte enquanto o MR avalia a rigidez por meio do comportamento elástico do material, sendo mais instintivo por exemplo que na mistura com maior proporção de materiais granulares como a brita sejam alcançados os maiores valores de rigidez. E como já mencionado, σ_3 possui maior influência sobre as características de atrito dos materiais granulares.

A Tabela 29 contém a descrição das equações das curvas que melhor se correlacionam com os dados apresentados na Figura 46. Foi encontrada boa correlação entre dados para todas as misturas. Como esta primeira análise é feita independentemente da tensão desvio, é possível ignorá-la assumindo $k_3 = 0$ e adaptar o modelo composto da Equação 9 para um modelo simples com a presença somente de k_1 e k_2 que podem ser obtidos por meio das curvas desenhadas.

Tabela 29 – Equações das curvas e coeficientes para uma modelagem simples de MR (Misturas CA)

Mistura	Equação da Curva – Figura 46	Correlação R ²	k1	k2
0% CA	$MR = 1445,6 * \sigma_3^{0,7402}$	0,9971	1445,6	0,7402
5% CA	$MR = 1263,2 * \sigma_3^{0,6981}$	0,9954	1263,2	0,6981
10% CA	$MR = 935,75 * \sigma_3^{0,6814}$	0,9937	935,7	0,6814
24% CA	$MR = 284,26 * \sigma_3^{0,2967}$	0,9817	284,3	0,2967

É notável que a correlação dos dados vai reduzindo aos poucos conforme uma maior quantidade de rejeito é adicionada, ainda que minimamente. Ambos os valores de k_1 e k_2 se reduzem com a adição de rejeito e isso implica em perda de resiliência embora se confirme que esta é reduzida até 10% de rejeito e somente foi comprometida de maneira mais significativa com a adição de 24% de rejeito.

Avaliando-se as misturas FA, que apesar de também serem predominantemente compostas por materiais granulares ainda são areias bem mais finas que as britas dominantes nas misturas CA e granulometria mais próxima do rejeito, obtêm-se as curvas determinadas pela Figura 47. Neste caso se verifica uma variação mínima do MR com a adição do rejeito, embora novamente sejam observados maiores resultados nas tensões confinantes mais elevadas para as misturas sem qualquer adição de rejeito. Apesar do fato

das curvas referentes a 0% FA e 5% FA serem praticamente idênticas, novamente indicando que uma adição de até 5% não possui influência significativa para este parâmetro.

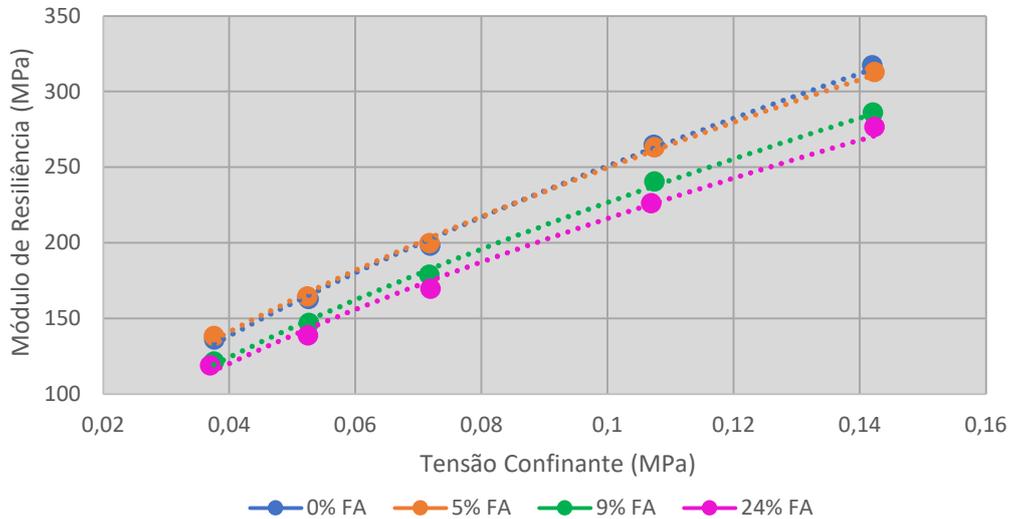


Figura 47 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante para Misturas FA

De qualquer forma, mesmo nas medidas referentes a 9% FA e 24% FA foi verificada uma variação bem mais baixa, o que mostra que quantidades mais altas de rejeito influenciam de forma bem menor a resiliência neste material em comparação com as misturas CA, que se demonstraram bem mais sensíveis à adição do rejeito. A mistura 24% FA inclusive chega a obter nas tensões mais elevadas um MR acima do que é visto na mistura 10% CA apesar de ter um ISC menor que a sua metade, evidenciando uma baixa correlação entre a capacidade de suporte e o comportamento elástico.

A Tabela 30 descreve as equações das curvas mais bem correlacionadas com os dados da Figura 47, novamente transformando o modelo composto da Equação 9 para um modelo simples com a presença somente de k1 e k2 que podem ser obtidos por meio das curvas desenhadas ao assumir k3 = 0.

Tabela 30 – Equações das curvas e coeficientes para uma modelagem simples de MR (Misturas FA)

Mistura	Equação da Curva – Figura 47	Correlação R ²	k1	k2
0% FA	$MR = 1114,8 * \sigma^3^{0,6476}$	0,9982	1114,8	0,6476
5% FA	$MR = 1045,9 * \sigma^3^{0,6219}$	0,9985	1045,9	0,6219
9% FA	$MR = 1024,3 * \sigma^3^{0,6548}$	0,9985	1024,3	0,6548
24% FA	$MR = 941,09 * \sigma^3^{0,6388}$	0,9945	941,1	0,6388

Os coeficientes de regressão encontrados confirmam a tendência de menor variação dos resultados. k_1 tende a reduzir mais lentamente com a adição de rejeito enquanto k_2 praticamente não se altera, razão pela qual as curvas aparentam estar mais paralelas entre si, já que a alteração da tensão confinante possui efeito semelhante em todas as misturas independentemente da quantidade adicionada de rejeito.

O MR, por estar relacionado com a deformação resiliente – aquela com capacidade de se recuperar após a remoção da carga aplicada – está associado com a rigidez ou flexibilidade da mistura. No entanto, a deformação resiliente é apenas parte das deformações que podem ocorrer, existindo tanto a resiliente (elástica e recuperável) quanto a permanente (plástica e não recuperável) de forma que estes comportamentos devem ser analisados em conjunto para serem comparados os desempenhos das misturas avaliadas de forma adequada.

A mistura 24% FA ter MR maior que a mistura 10% CA indica que esta sofre menores deformações recuperáveis, mas em compensação as deformações não recuperáveis podem ser mais elevadas, o que é esperado com o resultado bem mais baixo de ISC obtido para a mistura de 24% FA. Além disso, o fato de as misturas FA serem majoritariamente compostas por areia – que possuem um intervalo granulométrico menor com o rejeito silteoso em comparação com a maior presença de britas nas misturas CA – pode resultar em uma distribuição granulométrica que é mais favorável para menores variações na resiliência ao preencher melhor os espaços entre os grãos de areia do que os pedregulhos, resultando em melhor interação granulométrica.

As misturas CA até possuem certa quantidade de areia e pó de pedra para preencher os espaços entre as britas, de forma que a adição do silte idealmente preencheria os vazios entre estes outros materiais. Mas como a proporção destes materiais são mais limitados, há um maior limite na quantidade de rejeito a se adicionar antes que ele se torne excessivamente dominante na mistura e traga efeitos mais negativos. O Método Bailey já apontava este cenário ao mostrar 0% de rejeito para as misturas CA e 9% de rejeito para as misturas FA como os mais ideais, indicando o impacto mais desfavorável do rejeito para as misturas CA.

Nas misturas FA isso não se confirmou pelo MR, com a adição de rejeito verificando sempre a manutenção ou redução da resiliência. De forma que se deve entender que a adição de um material mais fino às misturas granulares terá a tendência de reduzir a sua rigidez elástica, não sendo algo recomendável na melhoria da performance elástica do

material. Ainda assim, esta é uma observação que leva em consideração somente os resultados de MR, já tendo sido verificado anteriormente que para o indicador ISC, certos teores de rejeito adicionados contribuíram para o desempenho das misturas FA mais do que para as misturas CA.

De forma geral, é notável que a adição de rejeito é mais tecnicamente favorável para as misturas FA ainda que as misturas CA possuam um ponto de partida mais elevado em seus parâmetros que permite a adição de rejeito de forma a atender maiores exigências, como verificado pelos ensaios de ISC. No entanto, é uma análise que somente leva em consideração a tensão confinante, ainda que se considere que ela seja a mais influente em materiais granulares. Sendo necessário avaliar um possível impacto da tensão desvio, seja de forma independente em um modelo simples ou por meio do modelo composto.

5.3.2. Modelo Simples - Módulo de Resiliência x Tensão Desvio

As avaliações do comportamento do MR em relação a tensão desvio não verificou resultados tão distintos em comparação com os anteriores. Para as razões de tensões mais elevadas, os valores de k3 praticamente se mantiveram bem próximos aos valores de k2 determinados na análise da variação da tensão confinante. Em um modelo simples, estes valores aparentam se combinar de forma a se ajustar aos valores de resiliência, o que impossibilita uma análise comparativa. De forma que é necessária a avaliação pelo modelo composto para conclusões mais determinantes sobre os coeficientes em si.

Tabela 31 – Equações das curvas em função da tensão desvio (Misturas CA)

σ_1/σ_3	Mistura	Equação da Curva	Correlação R ²	k1	k3
2	0% CA	$MR = 1231,2 * \sigma d^{0,6801}$	0,9901	1231,2	0,6801
	5% CA	$MR = 950,86 * \sigma d^{0,5958}$	0,9806	950,9	0,5958
	10% CA	$MR = 819,78 * \sigma d^{0,6471}$	0,9832	819,8	0,6471
	24% CA	$MR = 176,32 * \sigma d^{0,1459}$	0,9038	176,3	0,1459
3	0% CA	$MR = 872,79 * \sigma d^{0,7528}$	0,9959	872,8	0,7528
	5% CA	$MR = 798,35 * \sigma d^{0,7191}$	0,9949	798,4	0,7191
	10% CA	$MR = 579,34 * \sigma d^{0,6850}$	0,9919	579,3	0,6850
	24% CA	$MR = 257,29 * \sigma d^{0,3468}$	0,9888	257,3	0,3468
4	0% CA	$MR = 673,11 * \sigma d^{0,7469}$	0,9989	673,1	0,7469
	5% CA	$MR = 645,91 * \sigma d^{0,7249}$	0,9987	645,9	0,7249
	10% CA	$MR = 463,39 * \sigma d^{0,6574}$	0,9965	463,4	0,6574
	24% CA	$MR = 245,94 * \sigma d^{0,3622}$	0,9651	245,9	0,3622

Visualmente não é tão interessante reproduzir os gráficos de módulo de resiliência por tensão desvio pois eles apresentam as mesmas tendências com a variação de rejeito que as já observadas nos gráficos de resiliência em função da tensão confinante. As curvas são bem semelhantes as já apresentadas também porque a resiliência tende a aumentar com o aumento da tensão desvio da mesma forma que ocorreu com a confinante, evidenciando que ambos k_2 e k_3 devem ser positivos. Como as misturas são materiais predominantemente granulares, se julgou a análise em função da tensão confinante como a mais apropriada para o caso de um modelo simples. De qualquer forma, a Tabela 31 e a Tabela 32 contêm os resultados de todas as misturas em função somente da tensão desvio (assumindo-se $k_2=0$ na Equação 9) para diferentes razões de tensões σ_1/σ_3 .

Tabela 32 – Equações das curvas em função da tensão desvio (Misturas FA)

σ_1/σ_3	Mistura	Equação da Curva	Correlação R^2	k_1	k_3
2	0% FA	$MR = 926,42 * \sigma d^{0,5734}$	0,9908	926,4	0,5734
	5% FA	$MR = 870,95 * \sigma d^{0,5477}$	0,9921	871,0	0,5477
	9% FA	$MR = 873,45 * \sigma d^{0,5913}$	0,9916	873,5	0,5913
	24% FA	$MR = 722,36 * \sigma d^{0,5317}$	0,9811	722,4	0,5317
3	0% FA	$MR = 727,56 * \sigma d^{0,6602}$	0,9974	727,6	0,6602
	5% FA	$MR = 707,73 * \sigma d^{0,6450}$	0,9984	707,8	0,6450
	9% FA	$MR = 668,48 * \sigma d^{0,6696}$	0,9988	668,5	0,6696
	24% FA	$MR = 627,55 * \sigma d^{0,6688}$	0,9943	627,6	0,6688
4	0% FA	$MR = 564,66 * \sigma d^{0,6545}$	0,9994	564,7	0,6545
	5% FA	$MR = 543,67 * \sigma d^{0,6313}$	0,9991	543,7	0,6313
	9% FA	$MR = 506,15 * \sigma d^{0,6483}$	0,9981	506,2	0,6483
	24% FA	$MR = 510,64 * \sigma d^{0,6804}$	0,9988	510,6	0,6804

É notável que o coeficiente k_1 , o valor da rigidez inicial do solo pois não está correlacionado a nenhuma tensão, tende a se reduzir não somente com a adição de rejeito, mas conforme a razão de tensão σ_1/σ_3 aumenta. Isso indica que a tensão desvio mais elevada possui um efeito desestabilizador como esperado, diferentemente da tensão confinante que quanto mais elevada, maior a contribuição para a resiliência como já verificado. Isso é verificado ainda que os valores de k_3 tenham sido positivos, indicando o aumento da resiliência conforme σd é elevada e evidenciando o comportamento não-linear da resiliência.

É possível que ao mesmo tempo que as tensões desvio mais elevadas em relação a tensão confinante contribuam para uma maior degradação estrutural com a diminuição do valor de k_1 ao mesmo tempo que possuam em certo nível um efeito estabilizador ao contribuir para uma maior compactação das misturas, as tornando mais densas e isso é algo que contribui para a rigidez.

Neste cenário, o coeficiente k_3 é o indicador mais adequado para evidenciar este possível acontecimento por estar associado à tensão desvio, aumentando em ambos os tipos de mistura conforme a razão de tensões se eleva de 2 para 3, mas se estabilizando quando esta passa a ser igual a 4. Demonstrando que a mistura inicialmente ainda possuía algum espaço para maior compactação, mas eventualmente um limite é atingido conforme razões de tensões mais elevadas eram aplicadas.

5.3.3. Modelo Composto

Os modelos anteriores fizeram diferentes avaliações que permitem a verificação do impacto da tensão confinante e desvio de uma forma mais direta e simples. Na primeira análise com a tensão confinante se optou por focar em especial no efeito causado pela adição do rejeito pelo fato desta ser mais influente sobre materiais granulares, algo que pode ser observado visualmente pelas curvas dos gráficos apresentados. Na segunda análise se optou por focar nos efeitos contraditórios notados para a tensão desvio nas misturas, que pode ter simultaneamente um efeito desestabilizador e estabilizador para a rigidez mesmo quando essa tensão desvio aumenta em relação à tensão confinante.

No entanto, para ter um entendimento real dos coeficientes de regressão, o modelo composto é o mais adequado justamente porque nem a tensão desvio e nem a confinante são fatores independentes para a rigidez ou sequer tem igual peso. Na segunda análise, se observou que os valores de k_3 se aproximaram dos valores de k_2 da primeira análise mesmo se esperando valores de k_2 mais significativos que os de k_3 por se tratar de misturas mais granulares, que conseqüentemente serão mais influenciadas pela tensão confinante pelo que foi verificado na revisão teórica desta pesquisa (CUNTO, 1998).

Por essa razão, se suspeita que durante as projeções dos modelos simples, ao se assumir um valor de k_2 ou k_3 iguais a zero, houve o efeito destes terem sido em maior parte “absorvidos” pelos coeficientes considerados de forma a possibilitar um maior ajuste entre os dados. Assim, foi decidido calcular os coeficientes de regressão em um modelo com duas variáveis com auxílio da ferramenta “*Solver*” do Microsoft Excel por um

método de minimização da diferença entre o módulo de resiliência atribuído pelo modelo e o efetivamente medido durante o ensaio triaxial.

Estes coeficientes de regressão permitem não só confirmar a tensão que possui maior impacto sobre a resiliência das misturas, mas também avaliar com maior detalhe o que ocorre de acordo com a variação da quantidade de rejeito. Como k2 está associado às tensões confinantes, pode-se inferir o impacto do rejeito siltoso especificamente sobre a rigidez trazida pela interação e atrito entre os grãos. Já k3, relacionado às tensões desvio, permite melhor entendimento sobre a rigidez que é trazida pela coesão do material.

A Tabela 33 traz os resultados calculados para todas as misturas, tanto de CA quanto de FA. Os valores de correlação apresentados se referem à correlação entre os 15 valores de MR efetivamente medidos por ensaio em cada mistura e os valores calculados pelo modelo composto com base nos coeficientes determinados. Novamente não se consideraram nos cálculos os 3 valores correspondentes à tensão confinante mais baixa de 0,02 MPa.

Tabela 33 – Coeficientes de Regressão verificados para o Modelo Composto (Misturas CA)

Mistura	Equação da Curva	Correlação	k1	k2	k3
0% CA	$MR = 1488,1 * \sigma^3^{0,7236} * \sigma d^{0,0372}$	0,9971	1488,1	0,7236	0,0372
5% CA	$MR = 1282,1 * \sigma^3^{0,6410} * \sigma d^{0,0834}$	0,9943	1282,1	0,6410	0,0834
10% CA	$MR = 942,14 * \sigma^3^{0,6052} * \sigma d^{0,1041}$	0,9951	942,1	0,6052	0,1041
24% CA	$MR = 254,83 * \sigma^3^{0,1229} * \sigma d^{0,1711}$	0,9549	254,8	0,1229	0,1711
0% FA	$MR = 1136,4 * \sigma^3^{0,6428} * \sigma d^{0,0165}$	0,9972	1136,4	0,6428	0,0165
5% FA	$MR = 1065,2 * \sigma^3^{0,6225} * \sigma d^{0,0088}$	0,9968	1065,2	0,6225	0,0088
9% FA	$MR = 1035,2 * \sigma^3^{0,6475} * \sigma d^{0,0152}$	0,9978	1035,2	0,6475	0,0152
24% FA	$MR = 980,84 * \sigma^3^{0,6304} * \sigma d^{0,0329}$	0,9923	980,8	0,6304	0,0329

Para as misturas CA se observa um constante decréscimo dos coeficientes k1 e k2, de forma mais lenta até a mistura 10% CA, diminuindo com maior força em 24% CA. Em compensação, o valor de k3 apresentou aumento com relação à proporção de rejeito. Já para as misturas FA, os coeficientes k2 e k3 apresentaram uma relativa estabilidade enquanto o k1 decresceu, mas de uma forma bem mais tímida que nas misturas CA.

Primeiramente, k2 ser no geral maior que k3 comprova que o modelo simples utilizado na análise somente da tensão confinante era de fato o mais apropriado para os materiais utilizados por serem predominantemente granulares. Como estes materiais costumam ser

resistentes, mas com grãos instáveis entre si, a força confinante estimula a neutralizar essa questão e potencializa as características de resistência destes materiais. Os valores mais altos de k_2 indicam a maior contribuição para o MR por estas qualidades.

A mistura 24% CA foi a única exceção a apresentar k_3 acima de k_2 . Isto indica que a partir de certa quantidade de rejeito na mistura CA, este material passa a apresentar um excesso que altera a natureza do comportamento da mistura e o rejeito silteoso deixa de interagir primariamente com as areias e passa a ocupar os espaços entre as britas, afetando o potencial de resistência. Isso faz sentido ao se notar que nas misturas CA o componente de pó de pedra representava cerca de 12% do total da mistura-base (0% CA), fazendo com que as proporções acima de 10% de rejeito passem a interagir mais diretamente com os grãos maiores e estimulando quedas mais drásticas do k_2 , além de também do k_1 . Tanto que nas misturas de 0%; 5% e 10% CA as quedas no coeficiente k_2 são compensadas por aumentos de k_3 em níveis próximos. Somente em 24% CA a redução de k_2 ocorre em um nível muito superior ao aumento de k_3 .

O aumento de k_3 nas misturas CA, apesar de contraintuitivo, suporta que a adição de rejeito ajudou a elevar parcialmente o MR por conta do efeito da tensão desvio. Existem diferentes possíveis razões para isso. Baseando-se na experiência em laboratório, era visto que as misturas com rejeito sempre apresentavam maior facilidade para compactação além da sua manutenção ser também mais simplificada. As misturas sem nenhum rejeito eram muito difíceis de manusear e desmanchavam facilmente o que as fazia necessitar um cuidado extra de forma a não comprometer as misturas. De forma que se acredita que a adição de rejeito contribuiu no sentido de adicionar maior estabilidade interna nas misturas, associada à característica mais coesiva de materiais mais finos que é de fato a principal contribuição trazida.

Além disso, o rejeito possui densidade mais elevada por conta das substâncias de ferro de maneira que a sua adição de forma a preencher vazios na mistura é algo positivo desde que o seu excesso não prejudique a principal fonte de resistência da mistura, que é advinda do contato entre os grãos. Entretanto, somente pelo MR não pode se dizer que essa contribuição justifica a adição de rejeito pois ela vem acompanhada de quedas, ainda que leves em proporções baixas, do k_2 . De forma que ocorre uma neutralização dos efeitos e é por isso que em análises anteriores, as reduções do MR eram mais baixas nas menores proporções adicionadas de rejeito.

O resultado das misturas FA é muito mais ambíguo, mas se entende que está associado a uma melhor interação da granulometria do rejeito com a granulometria da areia média usada nestas misturas de forma que a natureza das misturas não se altera com proporções tão baixas de rejeito em uma mistura que tem a maioria do seu peso composta por areia. Assim, a mistura continua a ser definida pela areia e o k2 continua a ser dominante em comparação com k3, ambos não verificando alterações significativas independentemente do rejeito utilizado. Apenas k1 constantemente diminui com a adição de rejeito, mas de uma forma bem lenta. Ou seja, por um lado o impacto negativo é bem menor nas misturas FA pois o prejuízo no MR é praticamente mínimo, enquanto as misturas CA são bem mais sensíveis a este material. Por outro lado, também não se verificou o impacto positivo visto nas misturas CA, com melhoria mais significativa na coesão entre grãos ou na compactação da mistura.

CHOWDHURY (2021) diz que k3 é geralmente negativo, mas pode ser positivo caso as misturas apresentem comportamento de endurecimento, fenômeno no qual o material se torna mais rígido conforme é submetido a mais deformações plásticas, o que é uma característica desejável. Logicamente, os maiores valores de k3 nas misturas CA é algo que pode representar um bom potencial para outros parâmetros ainda que esse endurecimento seja neutralizado nos ensaios de MR pela queda de outros coeficientes. O ensaio de DP possivelmente oferece um olhar distinto em relação a todos estes fatores considerados, estando também mais bem associado com um fator mais crítico pois as deformações plásticas por não serem recuperáveis podem apresentar consequências maiores a longo prazo, ainda mais se não forem eventualmente controladas.

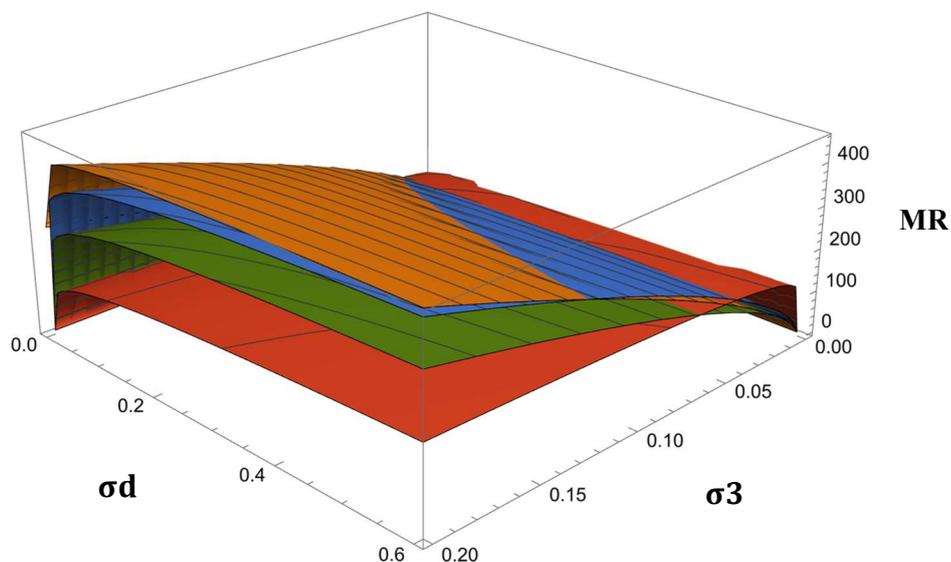


Figura 48 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante x Tensão Desvio (MPa) em Misturas CA

Por fim, os planos na Figura 48 correspondem aos gráficos das equações do modelo composto do MR para as misturas CA, sendo possível observar simultaneamente os efeitos trazidos pelas tensões de confinamento e desvio. Em laranja se tem o gráfico de 0% CA; em azul o de 5% CA; em verde 10% CA e em vermelho 24% CA.

O gráfico de 24% CA (em vermelho) tende a destoar dos restantes ao se apresentar mais horizontalmente, com acréscimos de MR muito baixos com o aumento das tensões. Também é interessante notar que existe uma faixa no topo onde certos pares de tensão resultam em maiores valores de MR para 5% CA (azul) em comparação com os outros gráficos, evidenciando que nem sempre 0% CA (laranja) terá necessariamente o maior valor de MR a depender das tensões que são consideradas.

A Figura 49 possui os gráficos correspondentes aos resultados do modelo composto para as misturas FA e é visualmente notável que praticamente não houve influência do rejeito para estes casos, ou então esta influência foi muito reduzida. O que demonstra a menor sensibilidade das misturas FA ao rejeito em comparação com as misturas CA para o parâmetro do MR.

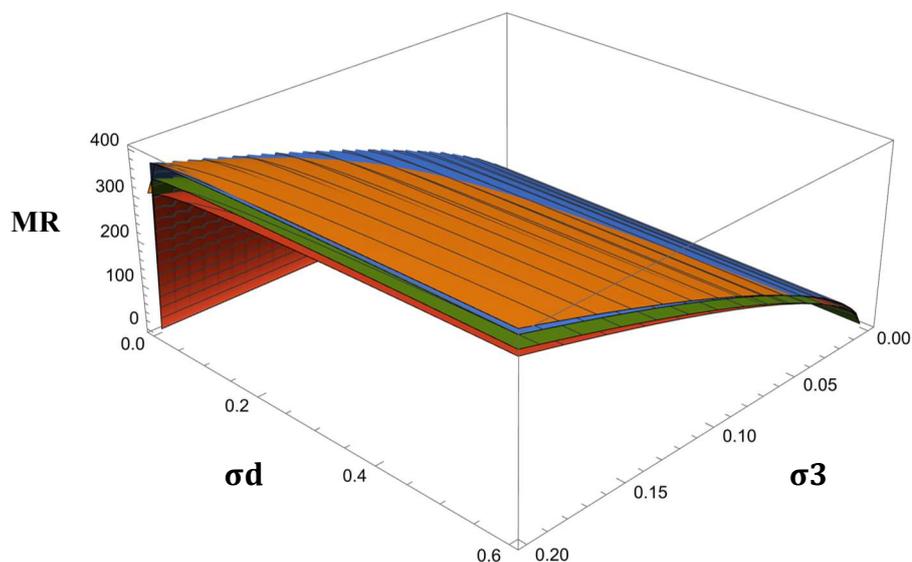


Figura 49 – Módulo de Resiliência x Tensão Confinante x Tensão Desvio (MPa) em Misturas FA

Os planos na Figura 49 correspondem a 0% FA em laranja; 5% FA em azul; 9% FA em verde e 24% FA em vermelho. Nenhum apresentou um formato distinto dos outros como o 24% CA havia ao apresentar uma inclinação mais horizontal do plano, o que evidencia que a adição do rejeito não veio alterar a natureza estrutural das misturas mesmo nas proporções mais elevadas do material, como em 24% FA. Isso confere uma maior previsibilidade do MR para as misturas FA, independentemente do rejeito adicionado.

5.4. Resultados de Ensaio de Deformação Permanente

Complementares aos ensaios de MR, estes ensaios realizados no equipamento triaxial dinâmico e são mais adequados para prever a resistência de materiais de pavimentação no longo prazo pois estão relacionados com deformações que não tem a possibilidade de serem recuperadas. Como este estudo trabalha com a ideia de adição de um material fino que apresenta uma maior plasticidade que materiais granulares não possuem e o rejeito também contribui para a compactação em certos casos, é interessante avaliar como a presença do rejeito afeta as misturas tendo em vista o parâmetro da deformação permanente (DP).

A análise das deformações pelo método do multiestágio possui o principal benefício de economizar tempo e recursos, apesar de possuir a limitação de não ser possível definir uma equação para a DP por um modelo semelhante ao que foi utilizado para o MR, com base em tensões confinantes e desvio fixas pois estas são variáveis no método do multiestágio.

PÉREZ-GONZÁLEZ *et al.* (2024) afirma que se estabelecendo limites de referência para a taxa de deformação plástica, a estabilidade de materiais granulares pode ser avaliada e comparada por meio da Teoria do *Shakedown*, sendo possível prever a deformação à longo prazo. De forma que maior prioridade foi dada em classificar e comparar os resultados com base na estabilização plástica de cada uma das misturas ao se avaliar os três distintos limites de *shakedown* mencionados por SOLIMAN *et al.* (2015).

Além disso, também se busca analisar se poderia existir alguma correlação entre os dados de deformação permanente acumulados de forma que se permitisse prever o ideal ótimo de rejeito a ser adicionado para a potencialização de resultados. Como foi adotado o método do multiestágio, calcular os parâmetros de regressão para a definição da equação das curvas de DP não foi possível pelo fato de serem aplicados pares de tensão distintos sobre o mesmo corpo de prova, de forma que um modelo tradicional que oferece uma única tendência não se encaixaria para os dados obtidos.

Modelos alternativos e mais complexos foram considerados para o multiestágio com bons resultados de correlação em SALOUR *et al.* (2016) mas envolvendo parâmetros bem distintos e não relacionados à tensão desvio ou confinante, de forma que se optou por não realizar esse tipo de análise para determinar uma equação para os valores de DP da forma que foi feito para os resultados de MR.

5.4.1. Deformações Permanentes Acumuladas – Misturas CA

Avalia-se tanto para as misturas CA e FA o patamar máximo de deformação alcançado após a execução de todos os 4 estágios de tensões de 10000 ciclos em todas as misturas, permitindo que se avalie quais obtiveram um desempenho mais favorável. Os 3 primeiros estágios correspondem às razões de tensões estabelecidas como parâmetros em DNIT 179 (2018b), enquanto o quarto estágio vai além do previsto para pavimentação e se refere a σ_1/σ_3 igual a 5. Todas os corpos de prova moldados possuíam uma mesma altura inicial igual a 200 mm, permitindo a comparação de DP em milímetros.

As Figuras 50, 51, 52 e 53 apresentam os resultados de deformação permanente acumulados para misturas CA ao longo dos 4 estágios de tensão para cada, considerando-se tensões confinantes (indicadas como Tc nos gráficos) que não se alteraram ao longo do procedimento. O aumento da tensão desvio a cada estágio estimula que deformações mais elevadas sejam estimuladas, mantendo uma contínua desestabilização das misturas com o objetivo de se avaliar melhor o limite de cada uma delas.

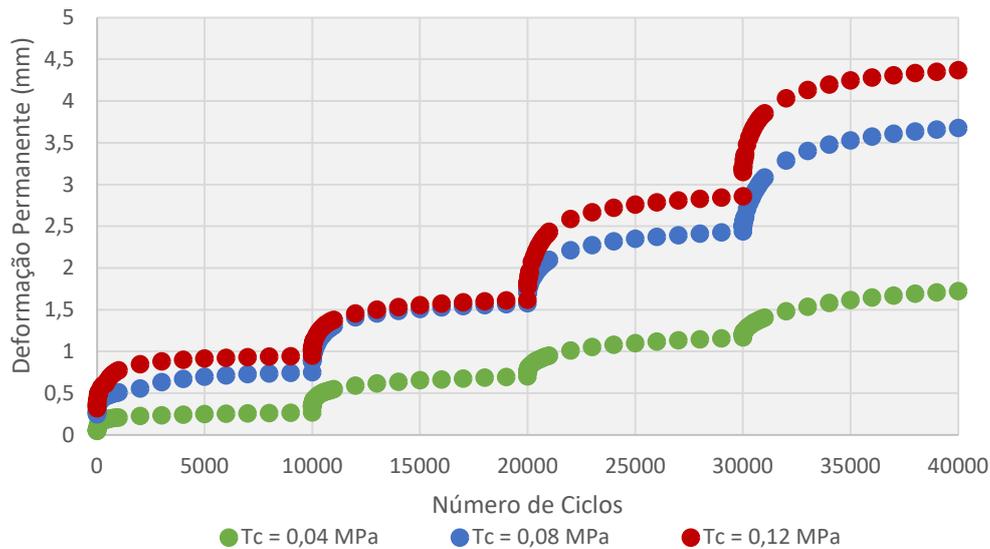


Figura 50 – Deformação Permanente Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 0% CA

Embora cada valor de tensão confinante fixa possa indicar distintos resultados, algumas conclusões podem ser retiradas ao se analisar o todo como um geral. A primeira é que diferentemente dos resultados de MR, a adição de rejeito contribuiu para uma redução da DP, algo que é favorável para o desempenho. Isso pode ser notado em especial para as linhas de deformações referentes a tensões confinantes de 0,08 e 0,12 MPa, que apresentaram os maiores níveis de deformação justamente para as misturas 0% CA que haviam apresentado os maiores valores de MR.

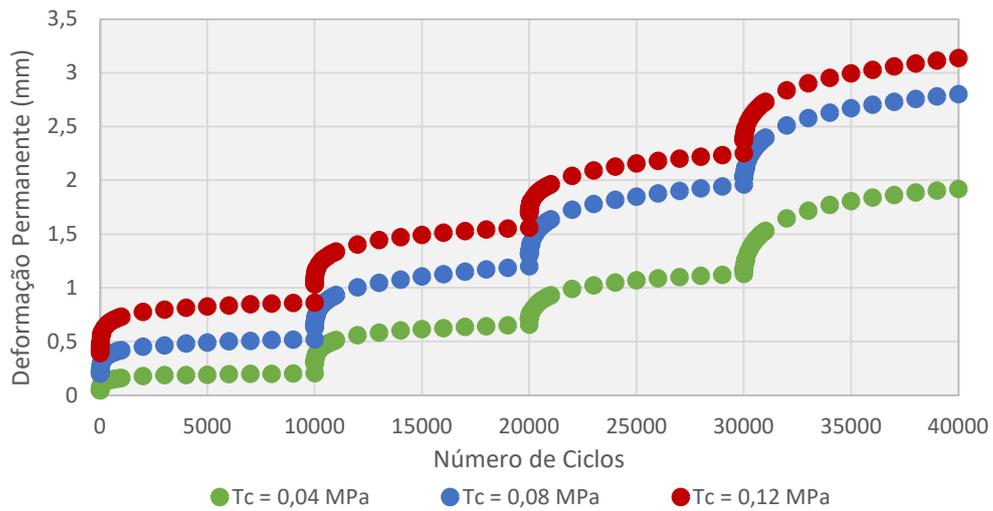


Figura 51 – Deformação Permanente Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 5% CA

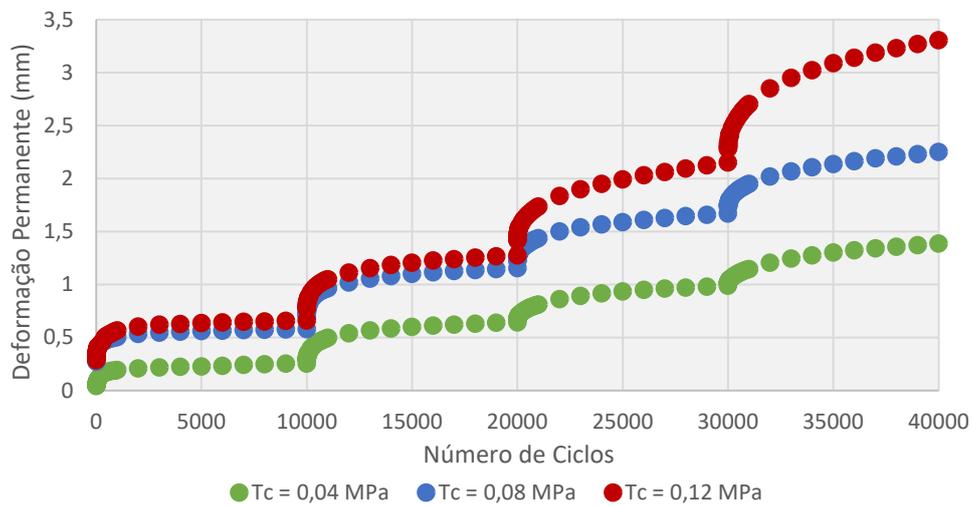


Figura 52 – Deformação Permanente Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 10% CA

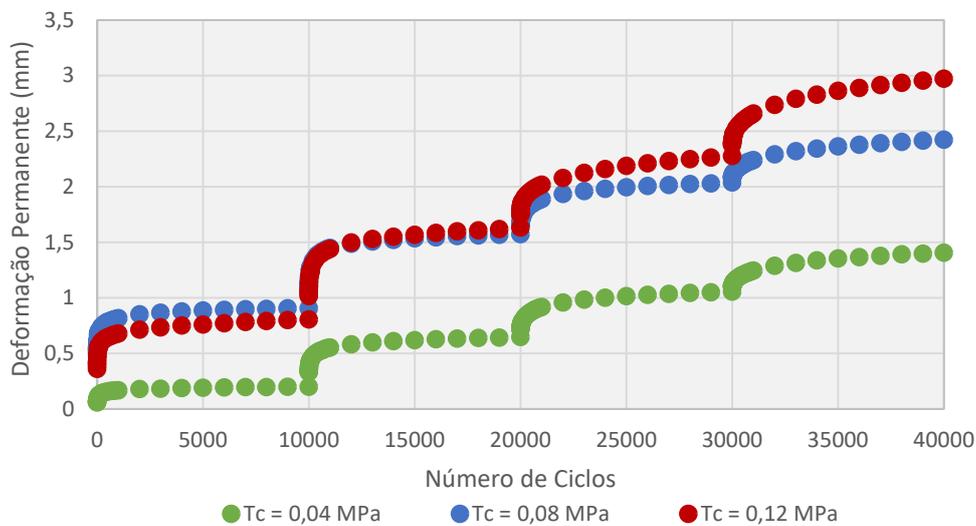


Figura 53 – Deformação Permanente Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 24% CA

Assim, é verificado um resultado que contraria as expectativas criadas a partir dos valores de ISC e MR, onde se havia verificado resultados mais favoráveis para as misturas 5% CA e 0% CA, ainda que sejam efetivamente comparados parâmetros distintos já que a resiliência tende a avaliar um comportamento elástico enquanto os ensaios de DP se concentram em um comportamento plástico que não é recuperável. Até mesmo a mistura 24% CA, que possui uma capacidade de suporte ISC mais baixa e não adequada para base de pavimentos, apresentou resultados de deformação mais baixos que a mistura-base de 0% CA.

Vale mencionar, no entanto, que estes resultados se alinham com o verificado visualmente e de forma tátil durante a execução dos ensaios, sendo mais fácil trabalhar com misturas com maior quantidade de rejeito pelo fato de estas se apresentarem como mais estáveis e duras. A adição de rejeito, um material mais fino, contribui para um maior preenchimento dos vazios entre as britas e isso pode contribuir para limitar as deformações permanentes independentemente dos valores de ISC e de MR verificados anteriormente.

É importante que todos estes parâmetros sejam considerados de uma forma conjunta pois eles não apontam todos para uma única resposta sobre o impacto da adição de rejeito, que traz consequências que podem ser interpretadas de forma positiva como também negativa. Por exemplo, apesar de uma menor deformação permanente ser desejável ela não necessariamente compensaria uma perda significativa da capacidade de suporte ISC ou do MR que também são importantes. De forma que não é possível justificar a utilização da mistura 24% CA sobre a mistura 0% CA com base somente nos resultados de deformação permanente obtidos tendo em vista os resultados obtidos anteriormente.

Outra avaliação que pode ser feita e que à primeira vista também pode ser percebida como contraditória é que as deformações associadas a tensões confinantes mais altas possuíram as maiores deformações sendo que a tensão confinante possui um efeito estabilizador em especial para materiais granulares. O que ocorre é que como as razões de tensões são as mesmas em cada estágio, as tensões desvio que são desestabilizantes vão acompanhar o aumento da tensão confinante, de forma que as linhas associadas a valores de σ_3 mais altos como 0,12 MPa também estão associadas a tensões desvio mais altas. Isso indica que a tensão desvio possui maior influência que a tensão confinante sobre os resultados de DP.

É uma observação oposta ao que havia sido observado no modelo composto das equações de MR, onde se comprovou que para todas as misturas exceto a 24% CA, a tensão

confinante aplicada possui influência bem mais significativa sobre o módulo de resiliência medido. Isso pode ajudar a compreender melhor as distinções observadas entre os resultados de MR e DP com a adição de rejeito resultando em efeitos distintos, sendo possível que o rejeito ao menos até um certo nível tenha contribuído para uma maior resistência às tensões desvio em troca de reduzir os benefícios trazidos pela tensão confinante que são mais característicos para materiais granulares. Como a DP aparenta ser mais influenciada pela tensão desvio nos resultados obtidos, é natural que a adição de rejeito obteria resultados mais favoráveis para os ensaios de DP do que o de MR.

Ainda assim, é notável que o efeito da tensão desvio não deve ser interpretado como contante entre as misturas avaliadas. As curvas correspondentes a σ_3 iguais a 0,08 MPa e 0,12 MPa tendem a ser mais próximas entre si do que com a curva referente a σ_3 de 0,04 MPa, o que indica que o aumento das tensões absolutas (σ_1) com a manutenção da proporção σ_1/σ_3 possui menor impacto a partir de certo nível de σ_1 quando este é alcançado. A maior proximidade das curvas referentes a valores de σ_3 mais altos também indica que a tensão desvio passa ter sua influência um pouco mais reduzida em relação à tensão confinante com o aumento de σ_1 , ainda que se mantenha maior.

Isso não significa implicar que a tensão confinante não possui nenhum efeito positivo para redução das deformações permanentes, apenas que o efeito desestabilizador da tensão desvio acabou por ser mais significativo em comparação. Apenas no estágio 1 da mistura 24% CA se observa a curva referente a $\sigma_3 = 0,08$ MPa, resultando em deformações levemente maiores que a curva $\sigma_3 = 0,12$ MPa, mas isso é algo que é revertido com os incrementos na tensão desvio em estágios seguintes.

VENKATESH et al. (2018) trabalhou e seu estudo com um material distinto do utilizado nesta análise, ao avaliar um solo argiloso e voltado para o subleito. Também executou ensaios de MR e DP. Ainda assim, foram observadas as mesmas conclusões, de que a tensão confinante passou a ser menos influente para as deformações permanentes em comparação com o que havia sido notado no módulo de resiliência. E isso porque em solos coesivos como a argila já se observa uma menor influência da tensão confinante sobre o MR em comparação com materiais granulares, sugerindo que esta distinção entre os resultados de MR e DP é comum independentemente do material analisado.

A Tabela 34 apresenta os resultados acumulados de deformação ao final do estágio 3 e do estágio 4. O estágio 3 é apresentado por representar as deformações acumuladas sob estados de tensões previstos na normativa do DNIT, sendo possivelmente mais

representativos de condições reais geralmente encontradas em campo. Já o estágio 4 representaria uma condição além do que é utilizado como parâmetro para comparar o comportamento das misturas em situações mais difíceis. Os resultados de deformação permanente (ϵ_p) são apresentados em função do percentual deformado em relação ao comprimento original e se encontram divididos por cor para facilitar a comparação de misturas com diferentes proporções de rejeitos submetidas aos mesmos valores de tensões.

Tabela 34 – Deformações Permanentes Acumuladas ao final dos estágios em Misturas CA

Mistura	Tensão Confinante (σ_3)	Tensão Absoluta (σ_1) – Estágio 3	ϵ_p (%) – Fim Estágio 3	Tensão Absoluta (σ_1) – Estágio 4	ϵ_p (%) – Fim Estágio 4
0% CA	0,04 MPa	0,16 MPa	0,5845	0,20 MPa	0,8615
	0,08 MPa	0,32 MPa	1,2192	0,40 MPa	1,8386
	0,12 MPa	0,48 MPa	1,4295	0,60 MPa	2,1842
5% CA	0,04 MPa	0,16 MPa	0,5649	0,20 MPa	0,9596
	0,08 MPa	0,32 MPa	0,9800	0,40 MPa	1,4010
	0,12 MPa	0,48 MPa	1,1254	0,60 MPa	1,5678
10% CA	0,04 MPa	0,16 MPa	0,4943	0,20 MPa	0,6928
	0,08 MPa	0,32 MPa	0,8354	0,40 MPa	1,1250
	0,12 MPa	0,48 MPa	1,0757	0,60 MPa	1,6525
24% CA	0,04 MPa	0,16 MPa	0,528	0,20 MPa	0,7032
	0,08 MPa	0,32 MPa	1,0188	0,40 MPa	1,2119
	0,12 MPa	0,48 MPa	1,1378	0,60 MPa	1,4866

A Tabela 34 não somente confirma o efeito positivo da adição de rejeito para as deformações permanentes antes visualizado pelos gráficos, mas também permite avaliar melhor a tendência de comportamento do material. Ao fim do estágio 3 por exemplo, que representa o fim da aplicação das tensões mais elevadas previstas na normativa do DNIT, se nota que a mistura 10% CA é na verdade a que apresentou as menores deformações permanentes. De forma que a adição de rejeito, apesar de mais positiva que do que verificado em ensaios anteriores, é menos justificada para a mistura 24% CA ainda que esta tenha obtido resultados mais favoráveis de DP que a mistura-base de 0% CA

É possível inclusive traçar uma curva entre os dados obtidos com a finalidade de verificar alguma possível correlação que permita determinar se existiria um percentual ótimo de rejeito. A Figura 54 obteve bons resultados de correlação para a deformação acumulada nas misturas CA ao final do terceiro estágio, o que foi uma surpresa pois a deformação pelo método do multiestágio ainda não se trata de um procedimento padrão, sem muitos estudos a evidenciar a possibilidade de comparação ou relação entre deformações acumuladas, sendo mais comum somente a análise do comportamento *Shakedown*.

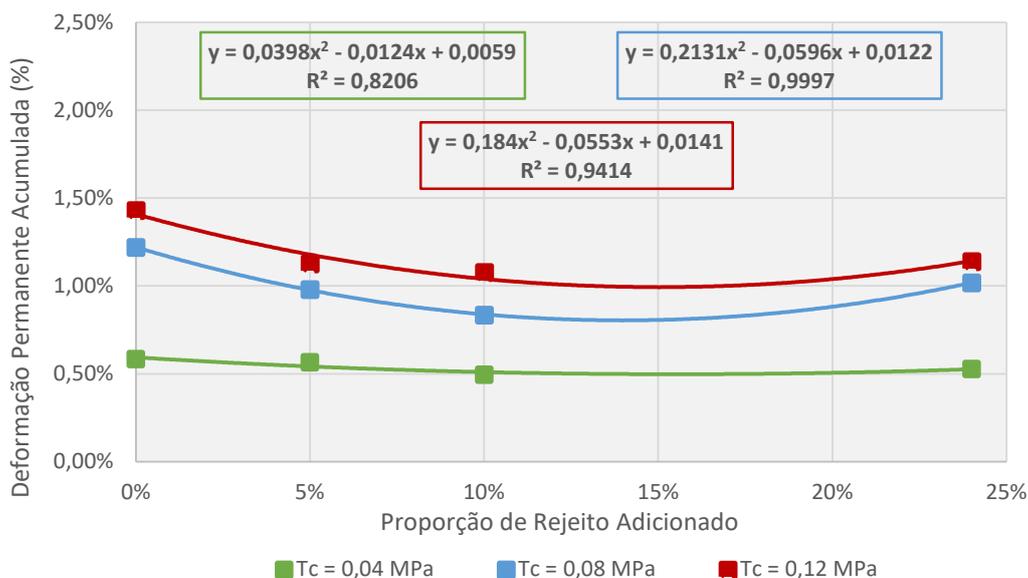


Figura 54 – Relação entre Deformação Permanente e proporção de rejeito em misturas CA

A análise dos pontos mínimos traçados na Figura 54 também evidenciou que a quantidade ótima de rejeito para cada curva foi semelhante independentemente na diferença existente nas tensões absolutas aplicadas em cada uma delas. Indicando que a quantidade de rejeito a ser adicionado visando potencializar menores resultados de DP não deve se alterar com distintas tensões, o que contribui para uma melhor previsibilidade. A Tabela 35 indica a quantidade de rejeito ótimo para cada uma das curvas de tensões confinantes, assim como a média ponderada destes valores levando em consideração a correlação verificada.

Tabela 35 – Estimativa da proporção de rejeito ótimo pela deformação permanente em misturas CA

Tensão Confinante	% Ótimo de Rejeito	Correlação R ²
0,04 MPa	15,58%	0,8206
0,08 MPa	13,98%	0,9997
0,12 MPa	15,03%	0,9414
Média Ponderada =	14,81%	

A média ponderada corresponde a uma estimativa que leva em consideração todos os resultados, mas é possível que quanto maior a correlação mais próximo do melhor resultado se encontrem os dados, de forma que se considera o resultado encontrado para $\sigma_3 = 0,08$ MPa de cerca de **14% de rejeito** como também sendo uma boa estimativa. Em qualquer um dos casos, é uma quantidade significativa que contrasta com os melhores resultados vistos tanto para a capacidade de suporte ISC – na qual a mistura 5% CA obteve os melhores resultados - quanto para módulo de resiliência onde 0% de rejeito foi a quantidade ideal em todos os dados efetivamente mensurados ainda que a modelagem tenha previsto maiores resultados de MR com 5% de rejeito em tensões confinantes mais baixas.

5.4.2. Deformações Permanentes Acumuladas – Misturas FA

O mesmo procedimento bem-sucedido para as misturas CA foi seguido para as misturas FA, as quais pode-se adiantar que se deformaram muito mais que as misturas CA, como era originalmente esperado antes da realização dos ensaios de MR. Um dos corpos de provas referente à mistura 0% FA inclusive não suportou os pares de tensão no estágio 4 e se rompeu durante a execução do ensaio.

Primeiramente, isso indica que os ensaios de DP mostraram uma melhor relação com os ensaios de ISC do que os ensaios de MR, onde em alguns casos a depender da proporção de rejeito, as misturas FA chegaram a ter MR maior que as misturas CA para as maiores quantidades de rejeito. O que é útil pois o índice ISC é o único parâmetro com valores específicos exigidos por normativa no Brasil para base e sub-base de pavimentos.

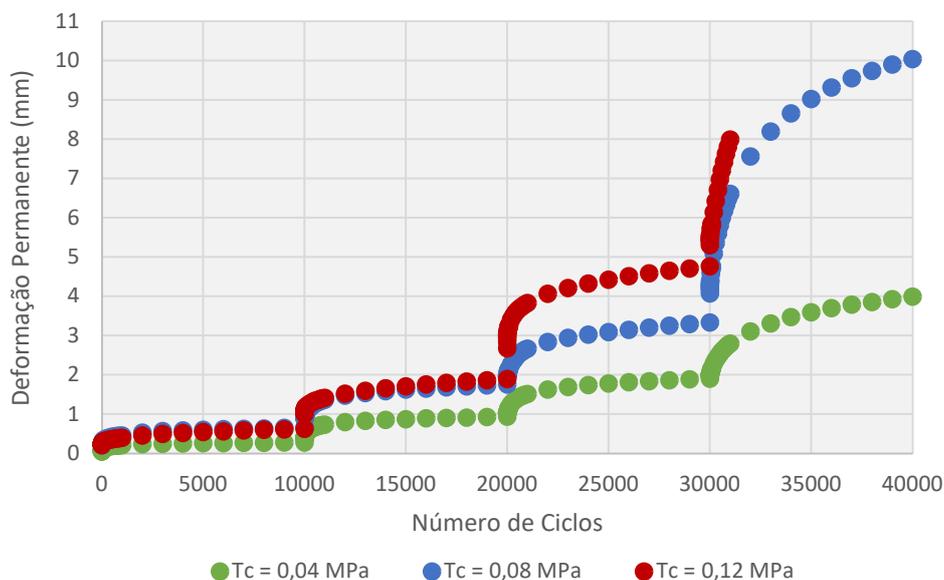


Figura 55 – Deformação Permanente Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 0% FA

Novamente, os 3 estágios iniciais são iguais às razões de tensões presentes em DNIT 179 (2018b), já o quarto estágio possui σ_1/σ_3 igual a 5. Todas as misturas partiram de um mesmo comprimento inicial igual a 200 mm. As Figuras 55, 56, 57 e 58 contêm os resultados de DP acumuladas para as misturas FA ao longo dos 4 estágios de tensão para cada, com tensões confinantes (T_c nos gráficos) fixas ao longo do procedimento em cada corpo de prova.

Nas misturas FA, a adição do rejeito contribuiu para uma redução ainda mais significativa das deformações permanentes acumuladas, maior que a verificada nas misturas CA por mais que também houvesse maior espaço para essa redução tendo em vistas as deformações extremamente elevadas observadas para as misturas 0% FA.

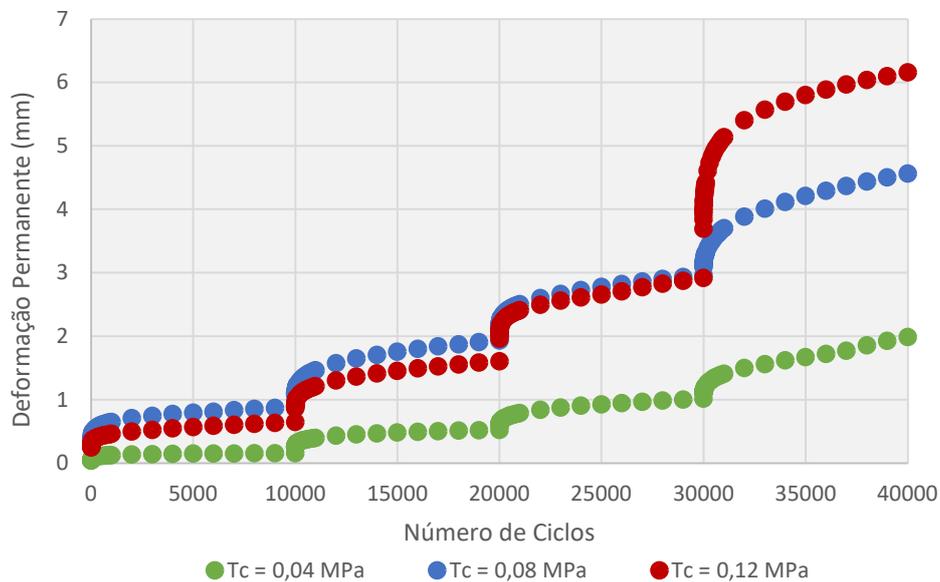


Figura 56 – Deformação Permanente Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 5% FA

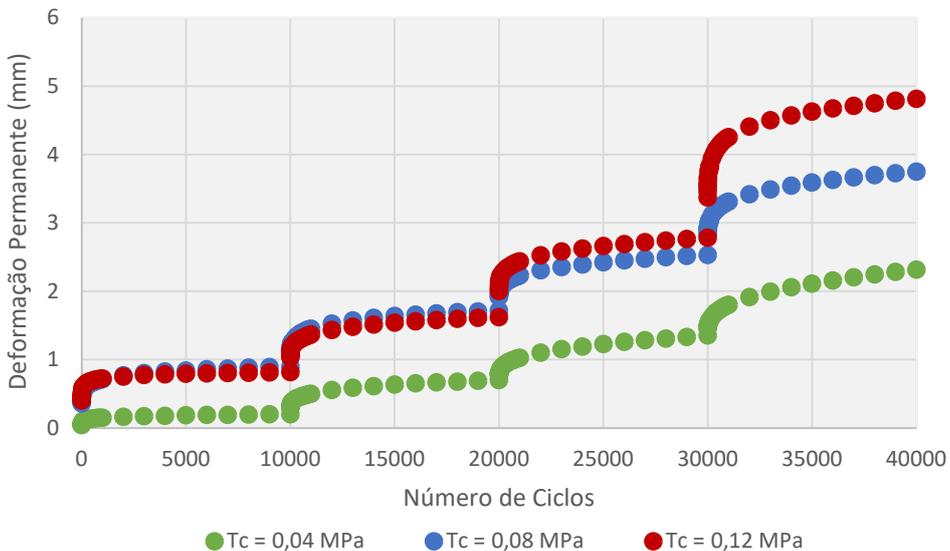


Figura 57 – Deformação Permanente Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 9% FA

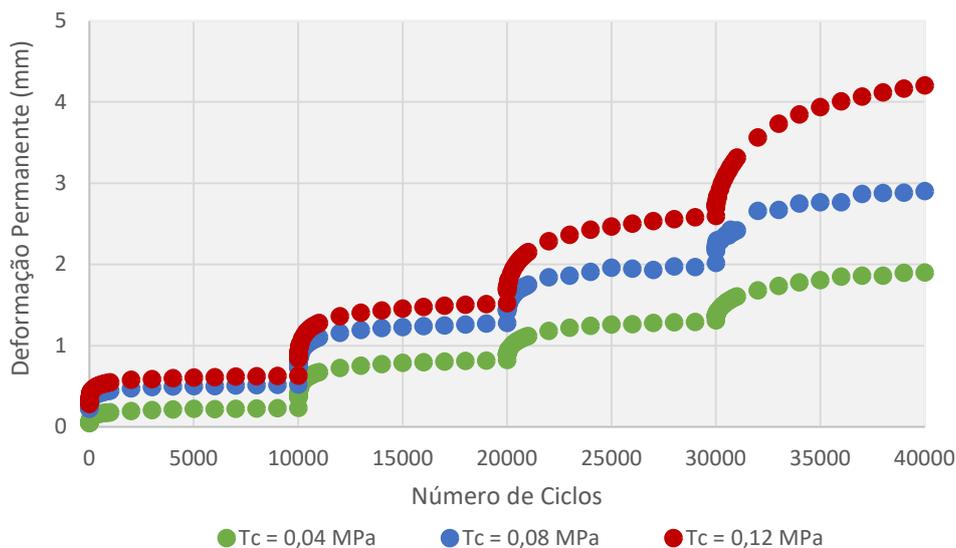


Figura 58 – Deformação Permanente Acumulada x Número de Ciclos para a mistura 24% FA

No geral, o ocorrido foi semelhante ao verificado para as misturas CA, com as maiores tensões absolutas geralmente resultando em deformações mais elevadas e a adição de rejeito novamente obtendo resultados positivos com a redução mais alta da deformação sendo que isto não havia sido verificado nos ensaios de resiliência. Aliás, os resultados de MR haviam indicado que as misturas CA eram as mais sensíveis à adição de rejeito com a redução do valor de MR, o que é algo desfavorável. Já os resultados de DP mostram as misturas FA como as mais sensíveis à variação do rejeito mais de uma maneira mais favorável.

Além disso, uma outra observação importante é que enquanto as misturas CA no geral apresentaram valores de DP relativamente constantes a cada estágio, pode-se observar que para as misturas FA essa deformação tende a crescer cada vez mais a cada estágio, o que indica uma maior sensibilidade à tensão desvio. O que era de certa forma aguardado devido ao menor ISC das misturas FA, mas o interessante é que esse crescimento tende a ser menos acelerado conforme maior quantidade de rejeito foi adicionado. Mesmo com a mistura 24% FA apresentando a menor capacidade de suporte ISC e menor MR foi nela que foi possível encontrar as variações mais constantes na deformação a cada estágio, conferindo maior previsibilidade no comportamento da mistura.

O rejeito siltoso, por ser um material fino, tende a preencher de forma ainda mais adequada os espaços entre a areia do que a brita, o que acabou por ser mais bem refletido nos ensaios de DP. Por exemplo, 24% de rejeito nas misturas CA havia passado a representar um excesso de rejeito que acaba por afetar mais significativamente a

resistência das misturas CA, o que foi refletido com um aumento bem leve da deformação acumulada em relação à mistura 10% CA. Já nas misturas FA é claro que há um espaço maior para a adição do rejeito – algo previsto desde a dosagem pelo Método Bailey – o que resultou nas misturas 24% FA serem as que apresentam o melhor desempenho.

Ou seja, é confirmada a mesma aparente contradição que havia sido notada para as misturas CA. As amostras sem rejeito de 0% CA e 0% FA possuíam o melhor comportamento elástico enquanto as amostras 10% CA e 24% FA foram as que tiveram melhor comportamento plástico. Já os resultados de ISC haviam previsto um meio termo entre estes resultados, com as misturas 5% CA e 9% FA apresentando maiores índices de capacidade de suporte.

Assim, foi notado que o comportamento plástico foi o que reagiu da melhor forma com a adição de rejeito dentre todos os parâmetros considerados. A adição do rejeito de forma a reduzir os vazios faz a mistura ser mais compacta e o excesso de rejeito não traz reduções muito grandes de resistência como a que foi indiretamente observada pelo ISC de 24% CA, pois o rejeito não resulta em deformações permanentes mais altas. O que evidencia a distinção entre as “resistências” efetivamente relacionadas com cada ensaio.

No entanto, para as misturas FA se aparenta ser mais difícil determinar exatamente o que configuraria esse excesso pois amostras com quantidade de rejeito acima de 24% não foram consideradas neste estudo, de forma que não se foi possível confirmar com base somente nas medições efetivadas se quantidades ainda mais elevadas de rejeito resultariam em um aumento ou uma contínua diminuição das deformações permanentes. Mas assim como o ISC das misturas FA cresceu até certo ponto antes de diminuir, é possível que este limite ótimo também exista sob o ponto de vista das deformações permanentes e que somente seja maior, da mesma forma que havia sido confirmado para as misturas CA.

A Tabela 36 apresenta os resultados acumulados de deformação ao final do estágio 3 e do estágio 4. Os resultados de deformação permanente (ϵ_p) na tabela correspondem ao percentual que foi deformado em relação ao comprimento original dos corpos de prova, que possuíam 200 mm antes do início dos ensaios. Para as misturas FA nota-se em especial a maior sensibilidade da mistura 0% FA, na qual um dos corpos de prova ($\sigma_3 = 0,12$ MPa) não conseguiu finalizar o ensaio no estágio 4 até o fim por causa de seu rompimento, enquanto outro ($\sigma_3 = 0,08$ MPa) chegou a deformar em níveis acima de 5%.

Tabela 36 – Deformações Permanentes Acumuladas ao final dos estágios em Misturas FA

Mistura	Tensão Confinante (σ_3)	Tensão Absoluta (σ_1) – Estágio 3	ϵ_p (%) – Fim Estágio 3	Tensão Absoluta (σ_1) – Estágio 4	ϵ_p (%) – Fim Estágio 4
0% FA	0,04 MPa	0,16 MPa	0,9509	0,20 MPa	1,9953
	0,08 MPa	0,32 MPa	1,6644	0,40 MPa	5,0151
	0,12 MPa	0,48 MPa	2,3802	0,60 MPa	Interrompido
5% FA	0,04 MPa	0,16 MPa	0,5084	0,20 MPa	0,9930
	0,08 MPa	0,32 MPa	1,4825	0,40 MPa	2,2828
	0,12 MPa	0,48 MPa	1,4584	0,60 MPa	3,0780
9% FA	0,04 MPa	0,16 MPa	0,6765	0,20 MPa	1,1571
	0,08 MPa	0,32 MPa	1,2664	0,40 MPa	1,8747
	0,12 MPa	0,48 MPa	1,3912	0,60 MPa	2,4076
24% FA	0,04 MPa	0,16 MPa	0,6558	0,20 MPa	0,9504
	0,08 MPa	0,32 MPa	1,0087	0,40 MPa	1,4506
	0,12 MPa	0,48 MPa	1,2991	0,60 MPa	2,1021

O rejeito dessa forma, apesar de ser um material considerado bom por si só, quando misturado com um material que também não muito recomendado para a pavimentação por conta de seus altos níveis de DP, acaba resultando em uma mistura que atende melhor às expectativas de desempenho. Ainda que o ISC verificado para as misturas FA seja limitado por valores abaixo de 40%, com o material somente podendo ser utilizado como sub-base e de preferência em locais de tráfego mais leve, deformações permanentes em misturas FA com as maiores proporções de rejeito tenderam a se equalizar com valores próximos aos verificados para as misturas CA, a mistura-base de brita.

Assim, é possível minimizar significativamente as deformações permanentes verificadas para as misturas FA de forma que estas sejam próximas as de misturas com valores de capacidade de suporte ISC mais elevados. Também há como determinar a relação entre as deformações obtidas e as diferentes proporções de rejeito da forma como havia sido feito para as misturas CA com a finalidade de estimar uma possível quantidade de rejeito ótimo. Os resultados de deformação permanente em função do teor de rejeito para as misturas FA se encontram na Figura 59, com a separação das curvas feita pela tensão confinante aplicada nos corpos de prova.

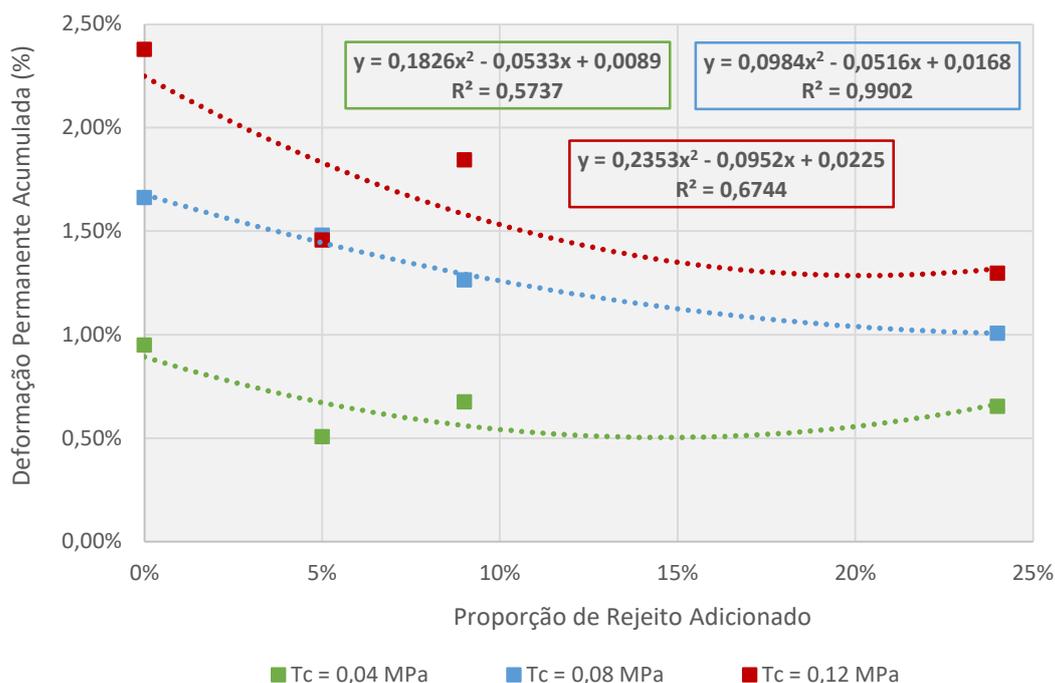


Figura 59 – Relação entre Deformação Permanente e proporção de rejeito em misturas FA

Desta vez, as curvas apresentaram comportamentos menos consistentes entre si. Nota-se que as deformações permanentes em 5% FA em duas das curvas tendeu a uma deformação menor que 9% FA em duas das curvas, sendo estas justamente as duas que valores de correlação foram mais baixos. Isso pode simplesmente indicar que não é possível estabelecer uma correlação clara nos dados de DP acumulada para misturas menos resistentes e instáveis com maior predominância de areia, mas talvez também possa indicar que dois dos três corpos de prova de 5% FA medidos não foram tão representativos por alguma razão e se comportaram de uma forma que se deformou menos que o esperado. De qualquer maneira, a curva referente à tensão confinante de 0,08 MPa apresentou correlação alta entre os dados, sendo ela a mais recomendada na estimativa de uma proporção de rejeito ótimo.

Tabela 37 – Estimativa da proporção de rejeito ótimo pela deformação permanente em misturas FA

Tensão Confinante	% Ótimo de Rejeito	Correlação R ²
0,04 MPa	14,59%	0,5737
0,08 MPa	26,22%	0,9902
0,12 MPa	20,23%	0,6744
Média Ponderada =	21,44%	

A Tabela 37 indica a quantidade de rejeito ótimo para cada uma das curvas de tensões confinantes, assim como a média ponderada destes valores considerando-se a correlação verificada embora essa seja menos recomendada como referência devido às correlações mais baixas encontradas. Neste caso, é possível notar que mesmo realizando-se uma média ponderada com base nos valores de correlação, ainda existe uma diferença significativa de quase 5% entre a média calculada e a proporção de rejeito que encontrou correlação alta entre os dados. Independentemente do meio escolhido para estimar a proporção ótima de rejeito, em ambos ela é **acima de 20% de rejeito**, indicando que este valor é maior para as misturas FA do que nas misturas CA, no qual havia ficado entre a faixa de 14% e 15% aproximadamente.

Ou seja, o rejeito tende a contribuir tecnicamente de forma mais intensa para as misturas FA, ainda que mesmo assim não sejam substitutas mais adequadas que as misturas CA, que já possuem um ponto de partida de maior ISC e deformações mais baixas. Ainda assim, em um cenário hipotético em que essas misturas com base em areia fossem utilizadas em sub-bases de pavimentos de tráfego mais leve, a adição de uma quantidade maior de rejeito teria seus benefícios, ainda que mesmo assim essa quantidade não possa ser na proporção estimada pelos ensaios de deformações permanentes, devido ao valor de ISC proibitivo verificado para a mistura 24% FA.

5.4.3. Análise de *Shakedown*

Conforme os pavimentos sofrem deformações permanentes, o desejado é que eventualmente ocorra a estabilização destas estruturas de maneira que as únicas deformações que passem a ter efeito sobre o pavimento sejam reversíveis. Esta condição é chamada de estado de *shakedown*, na qual independentemente do número de cargas cíclicas aplicadas, a estrutura eventualmente alcança um estado de equilíbrio (WERKMEISTER *et al.*, 2004).

Três estados podem ser verificados para os materiais utilizados. O primeiro é o já descrito, com a ocorrência de *shakedown* plástico que contribui para a estabilização das deformações. O segundo pode ser chamado de estado de fluência plástica, no qual as deformações plásticas ainda ocorrem, mas de uma forma lenta, o que é positivo para a vida útil do pavimento no longo prazo. Já o terceiro é o estado de colapso incremental e as deformações permanentes são progressivas a cada ciclo de carga e o colapso pode ocorrer depois de um número relativamente baixo de ciclos. O estado de *shakedown* (S) e o de fluência (F) são geralmente mais desejáveis para a função de pavimentação,

enquanto o estado de colapso incremental (CI) não o é por não permitir o funcionamento da estrutura no longo prazo.

Como não foi feito um ensaio tradicional de deformações permanentes, adotando-se o procedimento de multiestágio que possui uma limitação de apenas 10.000 ciclos de carga para cada par de tensão, adotou-se o parâmetro utilizado por SOLIMAN *et. al* (2015) no qual se analisa a variação da deformação entre os ciclos de número 3.000 e 5.000 para um par de tensões específico. Esse procedimento foi feito separadamente para cada estágio para se determinar o efeito do carregamento cíclico sobre cada uma das misturas avaliadas.

O *shakedown* plástico é caracterizado quando a diferença entre as deformações durante estes dois ciclos (ϵ_{3000} e ϵ_{5000}) é menor que 0,0045% e o colapso incremental quando essa diferença passa a ser maior que 0,0400% do comprimento inicial do corpo de prova no início de cada estágio. Já o estado intermediário de fluência ocorre quando essa diferença entre as deformações passa a ficar entre estes dois valores de referência apresentados.

No geral, se verificou a predominância do estado de fluência para as misturas CA embora tenha ocorrido o estado de Shakedown em tensões absolutas mais reduzidas a partir de uma adição de 5% de rejeito. Já o colapso incremental se concentrou mais durante o estágio 4, que era justamente o qual considerava um excesso de tensões que não era previsto na metodologia tradicional de ensaios de deformações permanentes do DNIT. Embora nas tensões mais elevadas possíveis ($\sigma_1 = 0,60$ MPa) durante o estágio 3 também tenha ocorrido uma leve ultrapassagem do limite estabelecido para colapso incremental para as misturas 0% CA e 10% CA.

De qualquer forma, esta análise também mostrou que a adição do rejeito contribui para evitar a ocorrência do estado de colapso incremental, que não foi verificado durante absolutamente nenhum estágio para as misturas 24% CA mesmo que a adição do rejeito nestes níveis elevados contribua para grande perda de capacidade de suporte como já havia sido demonstrado. Nem sequer durante o estágio 4 com um excesso de tensões não previsto em normativas brasileiras, se nota a ocorrência do estágio de colapso incremental. O que comprova que sob o aspecto das deformações permanentes, a adição de rejeito em maiores quantidades realmente passa a ser mais justificável de um ponto de vista técnico ainda que a contribuição trazida seja relativamente leve e o estado de fluência seja bem mais dominante em relação ao estado de *shakedown*.

Tabela 38 – Análise de ocorrência de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 0% CA

σ_3 (MPa)	Estágio	$\delta_{5000} - \delta_{3000}$ (mm)	L0 (mm)	$\varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000}$ (%)	Estado
0,04	Estágio 1	0,01320	200,00	0,00660%	F
	Estágio 2	0,03770	199,73	0,01888%	F
	Estágio 3	0,04778	199,30	0,02397%	F
	Estágio 4	0,08109	198,83	0,04078%	CI
0,08	Estágio 1	0,06312	200,00	0,03156%	F
	Estágio 2	0,05482	199,26	0,02751%	F
	Estágio 3	0,07553	198,43	0,03806%	F
	Estágio 4	0,12604	197,57	0,06379%	CI
0,12	Estágio 1	0,03452	200,00	0,01726%	F
	Estágio 2	0,05468	199,05	0,02747%	F
	Estágio 3	0,09242	198,38	0,04659%	CI
	Estágio 4	0,11263	197,14	0,05713%	CI

Tabela 39 – Análise de ocorrência de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 5% CA

σ_3 (MPa)	Estágio	$\delta_{5000} - \delta_{3000}$ (mm)	L0 (mm)	$\varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000}$ (%)	Estado
0,04	Estágio 1	0,00504	200,00	0,00252%	S
	Estágio 2	0,03140	199,80	0,01572%	F
	Estágio 3	0,04714	199,34	0,02365%	F
	Estágio 4	0,08930	198,87	0,04490%	CI
0,08	Estágio 1	0,02641	200,00	0,01321%	F
	Estágio 2	0,05906	199,48	0,02961%	F
	Estágio 3	0,06975	198,80	0,03508%	F
	Estágio 4	0,09173	198,04	0,04632%	CI
0,12	Estágio 1	0,02945	200,00	0,01473%	F
	Estágio 2	0,04897	199,14	0,02459%	F
	Estágio 3	0,06287	198,44	0,03168%	F
	Estágio 4	0,09051	197,75	0,04577%	CI

Tabela 40 – Análise de ocorrência de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 10% CA

σ_3 (MPa)	Estágio	$\delta_{5000} - \delta_{3000}$ (mm)	L0 (mm)	$\varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000}$ (%)	Estado
0,04	Estágio 1	0,00880	200,00	0,00440%	S
	Estágio 2	0,03216	199,71	0,01610%	F
	Estágio 3	0,04215	199,36	0,02115%	F
	Estágio 4	0,05606	198,99	0,02817%	F
0,08	Estágio 1	0,01506	200,00	0,00753%	F
	Estágio 2	0,04407	199,42	0,02210%	F
	Estágio 3	0,05032	198,84	0,02531%	F
	Estágio 4	0,06912	198,33	0,03485%	F
0,12	Estágio 1	0,01637	200,00	0,00818%	F
	Estágio 2	0,05284	199,34	0,02651%	F
	Estágio 3	0,09354	198,72	0,04707%	CI
	Estágio 4	0,13744	197,85	0,06947%	CI

Tabela 41 – Análise de ocorrência de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 24% CA

σ_3 (MPa)	Estágio	$\delta_{5000} - \delta_{3000}$ (mm)	L0 (mm)	$\varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000}$ (%)	Estado
0,04	Estágio 1	0,00883	200,00	0,00441%	S
	Estágio 2	0,01951	199,80	0,00976%	F
	Estágio 3	0,03146	199,36	0,01578%	F
	Estágio 4	0,03962	198,94	0,01992%	F
0,08	Estágio 1	0,01887	200,00	0,00943%	F
	Estágio 2	0,02890	199,09	0,01452%	F
	Estágio 3	0,03391	198,35	0,01710%	F
	Estágio 4	0,04146	197,96	0,02094%	F
0,12	Estágio 1	0,02695	200,00	0,01348%	F
	Estágio 2	0,04012	199,20	0,02014%	F
	Estágio 3	0,06206	198,39	0,03128%	F
	Estágio 4	0,07090	197,75	0,03585%	F

As Tabelas 38, 39, 40, 41 apresentam os resultados da análise de *Shakedown* para cada estágio de todas as misturas CA. O valor do comprimento de cada corpo de prova no início de cada estágio de tensões é apresentado por L0, enquanto $\delta_{5000} - \delta_{3000}$ é a variação bruta da deformação entre os ciclos 3.000 e 5.000 de cada estágio individual em milímetros.

A variação da deformação como percentual deformado do comprimento L0 original é descrita por $\epsilon_{5000} - \epsilon_{3000}$. É especialmente interessante que o número de pares de tensões que resultam em colapso incremental diminui de forma gradual com a adição do rejeito. Na Tabela 38 se observa que 4 dos 12 pares de tensão resultam nesta condição mais desfavorável. Pela Tabela 39 esse valor passa a ser de 3 e na Tabela 40 são apenas dois pares de tensões que atingem o colapso incremental. Já na Tabela 41, referente a quantidade máxima de rejeito, não há nenhuma ocorrência de colapso incremental.

Assim, a análise por *shakedown* se mostrou de uma forma geral ainda mais favorável para a adição de rejeito do que a mera avaliação e comparação das deformações permanentes acumuladas, nas quais para as misturas CA as amostras de 10% CA apresentavam desempenhos levemente mais favoráveis em relação à mistura de 24% CA, com a quantidade ótima de rejeito estimada sendo próxima de 14% a 15% de rejeito. Já nesta análise as amostras de 24% CA se mostraram preferíveis aos resultados de 10% CA.

No entanto, estes resultados não se contradizem por se avaliarem características bem distintas entre si. Enquanto a deformação permanente acumulada permitiu ter uma noção das deformações iniciais que são estimuladas e que são justamente as mais intensas, a análise por *shakedown* representa uma avaliação da tendência de longo prazo destas deformações.

Ou seja, uma mistura com mais rejeito como a de 24% CA pode ter deformado inicialmente um pouco a mais que a mistura 10% CA, mas a longo prazo ela apresenta uma tendência de se deformar mais lentamente, o que é mais positivo para materiais usados em pavimentação. De forma que uma única resposta relativa à quantidade exata de rejeito a potencializar menores resultados de deformação não pode ser oferecida.

Ainda assim, tendo em vista que os valores estimados com base na análise das deformações permanentes acumuladas já era alto e causava reduções significativas nos resultados de ISC e especialmente de MR, considera-se as estimativas mais conservadoras como adequadas por já oferecerem melhorias significativas para a DP.

Tabela 42 – Análise de ocorrência de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 0% FA

σ_3 (MPa)	Estágio	$\delta_{5000} - \delta_{3000}$ (mm)	L0 (mm)	$\varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000}$ (%)	Estado
0,04	Estágio 1	0,01383	200,00	0,00691%	F
	Estágio 2	0,04082	199,72	0,02044%	F
	Estágio 3	0,08918	199,07	0,04480%	CI
	Estágio 4	0,28152	198,10	0,14211%	CI
0,08	Estágio 1	0,03898	200,00	0,01949%	F
	Estágio 2	0,08864	199,35	0,04447%	CI
	Estágio 3	0,15024	198,25	0,07579%	CI
	Estágio 4	0,82212	196,67	0,41802%	CI
0,12	Estágio 1	0,05136	200,00	0,02568%	F
	Estágio 2	0,11614	199,37	0,05825%	CI
	Estágio 3	0,20817	198,11	0,10508%	CI
	Estágio 4	-	195,24	-	Colapsou

Tabela 43 – Análise de ocorrência de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 5% FA

σ_3 (MPa)	Estágio	$\delta_{5000} - \delta_{3000}$ (mm)	L0 (mm)	$\varepsilon_{5000} - \varepsilon_{3000}$ (%)	Estado
0,04	Estágio 1	0,00690	200,00	0,00345%	S
	Estágio 2	0,02889	199,84	0,01446%	F
	Estágio 3	0,05409	199,48	0,02712%	F
	Estágio 4	0,11068	198,98	0,05562%	CI
0,08	Estágio 1	0,05047	200,00	0,02523%	F
	Estágio 2	0,10848	199,11	0,05448%	CI
	Estágio 3	0,11042	198,07	0,05575%	CI
	Estágio 4	0,20150	197,03	0,10226%	CI
0,12	Estágio 1	0,04443	200,00	0,02222%	F
	Estágio 2	0,09290	199,35	0,04660%	CI
	Estágio 3	0,09838	198,39	0,04959%	CI
	Estágio 4	0,23313	197,08	0,11829%	CI

Tabela 44 – Análise de ocorrência de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 9% FA

σ_3 (MPa)	Estágio	$\delta_{5000} - \delta_{3000}$ (mm)	L0 (mm)	$\epsilon_{5000} - \epsilon_{3000}$ (%)	Estado
0,04	Estágio 1	0,01078	200,00	0,00539%	F
	Estágio 2	0,04845	199,80	0,02425%	F
	Estágio 3	0,07548	199,30	0,03787%	F
	Estágio 4	0,11695	198,65	0,05887%	CI
0,08	Estágio 1	0,03967	200,00	0,01983%	F
	Estágio 2	0,06539	199,10	0,03284%	F
	Estágio 3	0,06774	198,28	0,03417%	F
	Estágio 4	0,10075	197,47	0,05102%	CI
0,12	Estágio 1	0,01883	200,00	0,00941%	F
	Estágio 2	0,06095	199,18	0,03060%	F
	Estágio 3	0,08046	198,38	0,04056%	CI
	Estágio 4	0,12258	197,22	0,06216%	CI

Tabela 45 – Análise de ocorrência de Shakedown, Fluência ou Colapso em misturas 24% FA

σ_3 (MPa)	Estágio	$\delta_{5000} - \delta_{3000}$ (mm)	L0 (mm)	$\epsilon_{5000} - \epsilon_{3000}$ (%)	Estado
0,04	Estágio 1	0,01504	200,00	0,00752%	F
	Estágio 2	0,03325	199,77	0,01664%	F
	Estágio 3	0,04204	199,18	0,02111%	F
	Estágio 4	0,06840	198,69	0,03442%	F
0,08	Estágio 1	0,01193	200,00	0,00597%	F
	Estágio 2	0,03705	199,48	0,01857%	F
	Estágio 3	0,09750	198,72	0,04907%	CI
	Estágio 4	0,09603	197,98	0,04850%	CI
0,12	Estágio 1	0,01890	200,00	0,00945%	F
	Estágio 2	0,05282	199,37	0,02649%	F
	Estágio 3	0,10180	198,48	0,05129%	CI
	Estágio 4	0,20422	197,40	0,10345%	CI

As Tabelas 42, 43, 44 e 45 apresentam os resultados da análise de *Shakedown* para as misturas FA. A quantidade de estágios que apresentaram estar em um estado de colapso incremental foi maior que nas misturas CA como esperado, embora a adição de rejeito de uma forma geral tenha novamente tenha trazido uma contribuição neste sentido. Embora a mistura 24% FA pela análise de *shakedown* tenha se mantido relativamente estável e apresente uma leve perspectiva de maior deformação no longo prazo em comparação com a mistura de 9% FA, de forma que a adição máxima de rejeito neste caso não foi necessariamente o mais favorável para as misturas FA

Aliás, a mistura 9% FA apresentou resultados de deformações próximos aos resultados de 0% CA ao se avaliar todas as tabelas em conjunto, de forma que os resultados de deformações mais baixos das misturas FA foram comparáveis com os resultados mais altos verificados para as misturas CA. O que é bastante significativo tendo em vista a vasta diferença do indicador ISC que existe entre as misturas CA e FA. Neste contexto, o uso do rejeito até certas proporções em misturas FA é especialmente justificado como uma forma de pelo menos neutralizar a alta desvantagem que as misturas FA possuem com as elevadas deformações.

As misturas 0% FA e 5% FA apresentaram resultados bastante indesejáveis de colapso incremental já a partir do Estágio 2 e com mais da metade dos estágios avaliados em todos os pares de tensão dentro desta categoria. Já a mistura 24% FA tem seu uso inviável em pavimentação por conta do resultado de índice de ISC. De forma que a mistura 9% FA é a única que poderia em tese ser ao menos testada em uma situação real para efeitos de comparação com o desempenho das misturas CA. As misturas CA por sua vez poderiam, entretanto, ser testadas em sua totalidade. A mistura 24% CA não é recomendada por conta da perda elevada no MR, mas em teoria poderia ser pelo menos testada em sub-base de pavimentos. Já as outras três misturas CA poderiam ser testadas tanto como base e sub-base de pavimentos.

SOLIMAN *et. al* (2015) conclui em seu estudo que adicionar uma quantidade intermediária de finos – 9% em sua pesquisa - em um material granular como a brita é necessário para fornecer uma resistência ao deslizamento entre as partículas, reduzindo as deformações. O rejeito de ferro nesta análise possuiu semelhante função, embora a sua densidade mais elevada tenha contribuído para se obter percentuais iguais ou mais altos de aproveitamento do ponto de vista de DP tanto para as misturas CA quanto FA.

6. Considerações Finais

Este estudo focou na realização de ensaios triaxiais mecânicos como o de módulo de resiliência e o de deformação permanente - adaptado para o método do multiestágio – para comparar diferentes misturas contendo variadas quantidades de rejeito de minério de ferro visando determinar se a reutilização deste material na pavimentação poderia ter alguma justificativa do ponto de vista técnico além da ambiental. Ensaio de Índice de Suporte Califórnia foram utilizados por estabelecerem uma base de comparação com índices de ISC que são exigidos para base e sub-base de pavimentos, permitindo imaginar em que contexto estes materiais poderiam ser utilizados de uma forma mais prática.

No geral, foi demonstrada a viabilidade técnica da aplicação do rejeito fino estudado, mas os resultados divergiram bastante entre si dependendo da análise específica executada. Não foi verificada uma mesma tendência para todos os ensaios, o que era visto como possível pois elementos distintos se relacionam com cada um dos procedimentos, mas não se havia a certeza de que as misturas com os melhores resultados variariam tanto entre ensaios. O objetivo de se realizar uma análise integrada se mostrou acertado ao proporcionar uma compreensão ampla sobre as propriedades que são mais beneficiadas com a adição de rejeito e dentre as analisadas, as deformações permanentes foram o parâmetro em que se verificou as alterações positivas mais significativas.

O ensaio de MR no geral foi o mais hostil para a adição de rejeito, com as misturas 0% CA e 0% FA apresentando a maior resiliência elástica, mas com proporções baixas de rejeito como 5% apresentando resultados praticamente semelhantes em ambos os tipos de mistura. Em contrapartida, os resultados de deformação permanente acumulada favoreceram proporções mais altas de rejeito dentre as avaliadas, com as misturas de 10% CA e 24% FA apresentando deformações permanentes menores. Já o ISC representou um resultado que apontou um meio termo entre estes resultados, com as misturas de 5% CA e 9% FA resultando em índice de capacidade de suporte mais altos.

Isso indica que a quantidade ideal de rejeito dependerá das prioridades específicas a serem tomadas em cada situação específica, devendo-se ter em mente que priorizar uma menor deformação não-reversível pode trazer prejuízos para a rigidez elástica e vice-versa. Por essa razão, talvez se basear pelo ensaio de ISC seja a melhor forma de se equilibrar tal oposição, permitindo a adição de rejeito de ferro, mas não de uma forma exagerada que traga consequências significativas para a resiliência.

Esperava-se que talvez o material fino como o rejeito poderia trazer alguma mudança na coesão entre as partículas que contribuiria para um melhor desempenho geral das misturas em todos os procedimentos ou então que o material fino retiraria o protagonismo dos agregados graúdos e o atrito existente entre eles, prejudicando as misturas. No entanto, o rejeito ser siltoso trouxe limitações em respeito a coesão – evidenciado pela estabilidade dos resultados das misturas FA em grande parte dos ensaios de ISC e MR.

Os ensaios da fase de caracterização, em especial o de granulometria e de MCT foram importantes ao estabelecer o material como siltoso, permitindo entender o porquê os resultados de ISC e MR para as misturas FA terem sido extremamente estáveis em comparação com as misturas CA, tendo em vista que há mais vazios entre os grãos nas misturas CA, compostas predominantemente de britas. Como não foi adicionada coesão significativa com a adição do rejeito, as alterações positivas estão associadas à forma que rejeito ocupou o espaço entre as partículas, sendo mais relacionadas ao preenchimento de vazios e formação de uma mistura mais densa e compacta. O ensaio de DP ser o mais suscetível a captar esta característica é natural pois com a redução de vazios, se limita também o espaço para que as deformações plásticas ocorram.

No geral, é possível utilizar a faixa entre 0% e 10% de rejeito para as misturas CA como parâmetro de uma variação que não traz prejuízos mecânicos significativos para o uso do material em base de pavimentos, ainda que com 10% de rejeito já tenha se observado uma maior redução do MR. Recomenda-se que possíveis estudos futuros, caso feitos com o mesmo material, foquem em proporções de rejeito de até 10% ou no máximo 15%, que foi a proporção ótima máxima indicada pelos ensaios de deformação permanente. Valores acima de 15% de rejeito já não possuiriam nenhuma justificativa técnica de melhoria de alguma característica da mistura e seriam cada vez mais significativamente sensíveis em relação aos seus valores de módulo de resiliência e índice suporte Califórnia.

Já em relação às misturas FA, não se julga interessante testar esse material como material de pavimentação, embora o seu uso nessa pesquisa tenha contribuído para entender o impacto que é efetivamente trazido pela adição do rejeito fino. Se utilizadas, devem no máximo ser testadas como material de sub-base pois o ISC de todas as misturas foi proibitivo para bases ao nenhuma alcançar 60%, valor estabelecido de referência para pavimentos com tráfego leve. Além disso, as deformações permanentes nas misturas 0% FA e 5% FA foram elevadas demais enquanto o ISC de 24% FA não esteve alinhado com as exigências do DNIT. A mistura-base de 9% FA por essa razão é a única que poderia

ser talvez testada como um possível material de sub-base, um resultado que se encontra alinhado com a dosagem feita pelo Método Bailey que já indicava essa proporção de 9% de rejeito como a que respeitava os limites granulométricos estabelecidos pelo método.

De qualquer forma, em ambas as misturas a adição de rejeito encontrou uma justificativa do ponto de vista técnico, além do ambiental, ainda que em teores limitados. No geral, o rejeito deve ser tratado como um *filler* que contribui para elevar a densidade das misturas ao preencher mais os vazios existentes, evitando que ocorra um alto deslizamento entre partículas que contribuiria para as deformações permanentes. No entanto, além do volume de vazios, uma boa interação entre os grãos também se mostrou importante, com as misturas FA no geral permitindo a adição de uma quantidade maior de rejeito em comparação com as misturas CA pois em excesso, o rejeito traz o risco de descaracterizar a estrutura, trazendo reduções significativas para o MR e para o ISC. Foi o que ocorreu para a mistura 24% CA. Nestes casos, o rejeito não apenas preenche os espaços vazios, mas passa a interferir no contato entre as britas, prejudicando a resistência que seria trazida pelo atrito entre partículas.

Na avaliação das deformações permanentes, os valores acumulados para as misturas 0% CA e 9% FA não foram tão distintos entre si embora ainda assim as misturas 0% CA tiveram uma leve vantagem mesmo sendo as misturas de resultado de DP mais desfavorável, evidenciando os benefícios das misturas CA mesmo que a variação de DP nas misturas FA tenha sido maior. Além disso, a análise por *shakedown* permite reconhecer um impacto positivo na adição de rejeito, embora limitado. Por um lado, se observa que ao menos um estágio de tensão passa a apresentar a estabilização necessária para o *shakedown* e o número de estágios que apresentavam um cenário de colapso passa a diminuir ou desaparecer. No entanto, a fluência plástica continua a ser a classificação no geral para a maioria dos estágios de tensão, o que basicamente que o risco de patologias associadas à fluência é reduzido, mas continua a existir.

Nesse sentido, é possível que a adição de cimento para formação de misturas de solo-cimento poderia ajudar a atingir valores de estabilização mais altos pois o material sem rejeito, mesmo apresentando resultados de ISC elevados, ainda deforma de forma significativa a ponto de apresentar fluência na maioria dos estágios analisados. Assim, ainda que se possa recomendar a adição do rejeito sem a adição de outros elementos estabilizantes, é bom que estes sejam considerados como uma alternativa a depender das condições de tráfego e exigências específicas a serem atendidas.

Ressalvas devem ser feitas sobre uma eventual aplicação prática destes resultados. A primeira delas é que o rejeito utilizado apresentou maior sensibilidade à umidade, de forma que caso se utilize o rejeito, é importante que técnicas de controle de umidade devem ser utilizadas para evitar a saturação das camadas inferiores do pavimento. Caso contrário, em períodos de chuva pode haver quedas mais significativas no desempenho, o que não seria desejável. A instalação de sistemas de drenagem seria necessária para evitar o acúmulo de água, direcionando a água para fora das camadas estruturais. Podem também ser consideradas camadas impermeabilizantes para prevenir a passagem de água, como geotêxteis ou membranas impermeabilizantes. De qualquer forma, o uso de quantidades conservadoras de rejeito também contribui para uma maior previsibilidade do comportamento do material.

Caso estudos futuros sejam feitos com os materiais utilizados, recomenda-se que um teor limite de 10% seja estabelecido para as misturas CA, com menores graduações para a variável de rejeito do que as utilizadas nesta pesquisa, onde a consideração de teores mais elevados teve a função de estabelecer o teor ótimo sob o ponto de vista de distintos parâmetros. A mistura 10% CA em tese ainda é adequada para uso pois atinge um índice ISC acima de 80%, mas já verifica reduções na resiliência, algo que indica que a mistura já começa a ter perdas na sua qualidade estrutural.

As misturas FA são pouco interessantes de serem utilizadas em outros estudos, pois além de serem menos resistentes e não frequentemente utilizadas na pavimentação, a adição do rejeito não trouxe melhorias significativas para o indicador ISC. No entanto, caso se deseje avaliar mais a fundo as misturas FA, considera-se um limite maior de 15% de rejeito como o máximo para ser avaliado pois quantidades mais elevadas resultaram na perda da capacidade de suporte do material, como indicado pelo resultado de ISC da mistura 24% FA.

Uma outra ressalva importante é que estes resultados apresentados foram obtidos especificamente para a energia modificada de compactação, que tende a ser mais elevada e que contribui para resultados mecânicos mais elevados. Um complemento que este estudo poderia eventualmente ter por meio de estudos futuros seria a avaliação do comportamento das misturas também sob o efeito da energia normal ou da intermediária, ainda que se julgue a energia modificada como a mais indicada de ser utilizada em camadas que exigem maiores níveis de resistências como é o caso para as bases de pavimento.

Uma das limitações deste estudo é que naturalmente, os resultados refletem especificamente o rejeito utilizado, que possui características específicas e que não podem ser generalizadas para uma conclusão sobre rejeitos de uma forma geral. De forma que uma possível sugestão de pesquisa seja realizar a mesma pesquisa para um rejeito distinto. Poderia ser avaliado um rejeito de minério de ferro argiloso por exemplo, com o intuito de avaliar se o rejeito traria de fato melhor coesão para as misturas a ponto de oferecer melhorias mais significativas. Ou um rejeito de minério de ferro arenoso que poderia talvez substituir a maior parte do agregado que neste estudo foi o pó de pedra e a areia média, possibilitando maior aproveitamento do material. Ou mesmo utilizar um rejeito de origem mineral distinta, como o cobre, que naturalmente vai possuir uma densidade diferente do rejeito de minério de ferro.

Por fim, se recomenda realizar o ensaio de deformação permanente pelo método tradicional de estágio único para as misturas que apresentaram algum potencial para uso na pavimentação. Ou seja, especificamente as misturas CA, com os percentuais de 0%, 5% e 10% de rejeito. O método do multiestágio utilizado cumpriu melhor do que o esperado a sua proposta de comparar o desempenho de diferentes misturas, com valores elevados de correlação para deformação acumulada encontrados ao menos para as misturas CA, algo que não era possível prever por conta de não existirem muitos estudos sobre o método a este ponto. Ainda assim, o método possui a limitação de não permitir a definição de coeficientes de regressão tradicionais para a realização do dimensionamento e análise do pavimento por métodos existentes no Brasil, como por exemplo pelo software MeDiNa, razão pela qual se recomenda fazer o ensaio tradicional para as misturas CA para simular e comparar o funcionamento destas em um possível cenário prático.

Referências Bibliográficas

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Relatório final: execução de trecho experimental com o uso de rejeitos e resíduos de mineração**. Brasília, DF, 2020.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO M 145-91 (2004): Standard specification for classification of soils and soil-aggregate mixtures for highway construction purposes**. AASHTO, Washington, D.C., 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D2487-17: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.
- ARAÚJO, M. H. P. **Modificação de rejeito de mineração de ferro através da reação superficial com cálcio e magnésio para produção de adsorventes de fosfato**. Dissertação de Mestrado, Curso de Química. Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação Multicêntrico em Química de Minas Gerais, Viçosa, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116:2004 – Agregados reciclados para uso em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6458: Solos - Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm**. Rio de Janeiro, 2016b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 2016c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 2016d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. Rio de Janeiro, 2024.
- BAUER, L. A. F.; NORONHA, M. A. A.; FALCÃO BAUER, R. J. Uso de aditivos no concreto. FALCÃO BAUER, L. A. **Materiais de construção**. 5. ed. v. 1, p. 35-63, 2012.
- BASTOS, L. A. C.; SILVA, G. C.; MENDES, J. C.; PEIXOTO, R. A. F. “Using Iron Ore Tailings from Tailing Dams as Road Material”. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.28, n.10, p. 04016102, 2016.
- BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1a Edição, Rio de Janeiro: Petrobras; ABEDA, 2007.
- BILODEAU, J. P.; DORÉ, G. “Relating resilient behaviour of compacted unbound base granular materials to matrix and interlock characteristics”. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 220–228, 2012.

BONZANINI, J. A. F. **Estudo dos efeitos do tamanho de corpos-de-prova no módulo de resiliência de quatro solos**. Dissertação de Mestrado, Curso em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BOSCOV, M. E. G. “Mariana e Brumadinho confirmam a falência das barragens de montante”. **Jornal da USP**. Universidade de São Paulo, 28 de janeiro de 2019. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/artigos/mariana-e-brumadinho-confirmam-a-falencia-das-barreiras-de-montante/>>. Acesso em: 23 jun. 2024.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. “Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos”. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). Resolução nº 85, de 2 de dezembro de 2021. “Dispõe sobre procedimentos para o aproveitamento de rejeitos e estéréis”. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2 dez. 2021. Edição 229, Seção 1, p. 71. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-anm-n-85-de-2-de-dezembro-de-2021-365053336>>. Acesso em: 21 jan. 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília, ANM, 2024. p. 27. Versão 1 – outubro 2024.

CABRAL, W. S. **Exploração, análise comparativa e modelagem da deformação permanente de materiais granulares da microregião de Mossoró/RN**. Dissertação de Mestrado, Curso em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

CARMIGNANO, O. R.; VIEIRA, S. S.; TEIXEIRA, A. P. C.; LAMEIRAS, F. S.; BRANDÃO, P. R. G.; LAGO, R. M. “Iron ore tailings: characterization and applications”. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 32, n. 10, p. 1895-1911, 2021.

CHOWDHURY, S. M. R. M. “Evaluation of resilient modulus constitutive equations for unbound coarse materials”. **Construction and Building Materials**, v. 296, p. 123688, 2021.

CNT. **Conheça os 13 principais defeitos do pavimento das rodovias**. Agência CNT, 2018. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/conheca-principais-defeitos-pavimento>>. Acesso em: 13 jan. 2025.

COSTA, F. R. T. **Microscopia Eletrônica de Varredura: potencialidades e aplicações. 2016**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Química Industrial. Universidade Federal do Maranhão, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, São Luís, Maranhão, 2016.

CUNTO, F. J. C. **Determinação do módulo de resiliência através de ensaios triaxiais dinâmicos e a sua estimativa a partir de ensaios de compressão simples: Estudo de três solos do nordeste brasileiro**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 1998.

DANTAS, A. A. N. **Avaliação do comportamento mecânico, geoquímico, mineralógico e geoambiental de um rejeito de minério de ferro incorporado a um solo laterítico para fins rodoviários**. Tese de Doutorado, Curso de Geotecnia. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço.** DNIT 139/2010-ES. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Solos – Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio.** DNIT 172/2016-ME. Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Solos – Determinação do módulo de resiliência – Método de ensaio.** DNIT 134/2018-ME. Rio de Janeiro, 2018a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Solos – Determinação da deformação permanente – Instrução de Ensaio.** DNIT 179/2018-IE. Rio de Janeiro, 2018b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação de Serviço.** DNIT 141/2022-ES. Rio de Janeiro, 2022a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios de agregados em estado solto e compactado – Método de ensaio.** DNIT 437/2022-ME. Rio de Janeiro, 2022b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Misturas asfálticas – Seleção granulométrica de agregados para concreto asfáltico pelo Método Bailey – Procedimento.** DNIT 438/2022-PRO. Rio de Janeiro, 2022c.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Solos – Compactação em equipamento miniatura – Ensaio Mini-MCV e perda de massa por imersão – Método de ensaio.** DNIT 258/2023-ME. Rio de Janeiro, 2023a.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Solos – Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura – Classificação.** DNIT 259/2023-CLA. Rio de Janeiro, 2023b.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Pavimentação – Solos – Ensaio de compactação utilizando moldes tripartidos – Método de ensaio.** DNIT 443/2023-ME. Rio de Janeiro, 2023c.

ÉPOCA. **Modelo de barragem usado em Brumadinho e Mariana é o mais barato e menos seguro.** Época Negócios, 30 jan. 2019. Disponível em: <<https://epocanegocios.globo.com/Brasil/noticia/2019/01/modelo-de-barragem-usado-em-brumadinho-e-mariana-e-o-mais-barato-e-menos-seguro.html>>. Acesso em: 20 jan. 2025.

EUGENIO, T. M. C.; HENRIQUES, A. B.; MENDES, R. F. Use of iron ore tailings as partial replacement for cement on cementitious composites production with vegetable fibers. **Construction and Building Materials**, v. 411, p.134667, 2024.

FOUAD, A.; HASSAN, R.; MAHMOOD, A. “Evaluation of permanent deformation and resilient modulus of pavement base with different gradations and percentages of clay plasticizer”. **Transportation Geotechnics**, v. 31, p. 100679, 2021.

GALHARDO, D. C. **Estudo sobre a viabilidade técnica da utilização de rejeitos de mineração de ferro em camadas de pavimentos rodoviários**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2015.

GARCÍA, L. C. H.; SALAMANCA, N. F. L. “Resilient Module Soil-Cement Prediction based on Setting Temperature”. **Ingeniería e Investigación**, v. 40, n. 2, p. 7-13, 2020.

GHUZLAN, K. A.; AL-MISTAREHI, B. W.; AL-MOMANI, A. S. “Rutting performance of asphalt mixtures with gradations designed using Bailey and conventional Superpave methods”. **Construction and Building Materials**, v. 261, p. 119941, 2020.

GOMES, A. C. F. **Estudo de Aproveitamento de Rejeito de Mineração**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

GONÇALVES, L. D. P.; BEZERRA, J. F. R. “Uso do mercúrio e reflexos socioambientais no Garimpo de Caxias, município de Luís Domingues–MA”. **Simpósio Brasileiro De Geografia Física Aplicada**, Campinas, 2017. Anais de Congresso. UNICAMP. Disponível em: <<https://ocs.ige.unicamp.br/ojs/sbgfa/article/view/1878/2225>>. Acesso em: 17 jan. 2025.

GOOGLE EARTH. **Imagens de Satélite da Mina no Córrego do Feijão, em Brumadinho**. Disponível em: <<https://www.google.com/earth/>>. Acesso em: 4 jan. 2025.

GUIMARÃES, A. C. R. **Um Método Mecânico Empírico para a Previsão da Deformação Permanente em Solos Tropicais Constituintes de Pavimentos**. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Civil da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2009.

GUIMARÃES, J. I. **Impacto do Rompimento de uma Barragem de Rejeitos de Minério de Ferro sobre a Qualidade das Águas Superficiais. Estudo de Caso: Bacia do Rio Doce**. Dissertação de Mestrado, Curso de Saneamento, Meio-Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2018.

HU, L.; WU, H.; ZHANG, L.; ZHANG, P.; WEN, Q. “Geotechnical Properties of Mine Tailings”. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v.29, n.2, p. 04016220, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2016. 128 p. ISBN 978-85-61993-10-8.

JAHANSHAH, F. S.; GHANIZADEH, A. R. “Compressive strength, durability, and resilient modulus of cement-treated magnetite and hematite iron ore tailings as pavement material”. **Construction and Building Materials**, v. 447, p. 138076, 2024.

KAPOOR, A.; JOHNSON, K. L. “Effect of changes in contact geometry on shakedown of surfaces in rolling/sliding contact”. **International Journal of Mechanical Sciences**, v. 34, n. 3, p. 223-239, 1992.

KURANCHIE, F. A.; SHUKLA, S. K.; HABIBI, D.; MOHYEDDIN, A. “Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete”. **Cogent Engineering**, v.2, n.1, p. 1083137, 2015.

LELIS, M. F. F.; BRESSIANI, T. S. C.; LORENZINI, L.; NEVES, T. R.; ALVARENGA, M. B.; FERREIRA, S. A. D.; MOURA, P. R. G. Produção de madeira plástica a partir do rejeito de mineração e resíduo plástico: uma atividade experimental. **Revista Virtual de Química**, v. 14, n. 3, p. 613-628, 2022.

- MELKI, T. R. **Segurança e potencial de liquefação das barragens de rejeito de mineração no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Civil. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Varginha, MG, 2021.
- MENDES, L. O.; MARQUES, G. L. O. “Avaliação da influência do Método Bailey no processo de dosagem e desempenho de misturas asfálticas”. **Transportes**, v. 20, n. 4, p. 35–43, 2012.
- MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Saúde. **Boletim Informativo: Qualidade da água para consumo humano em soluções alternativas de abastecimento nos municípios atingidos pelo desastre decorrente do rompimento das barragens da mineradora Vale S.A., em Brumadinho, Minas Gerais (2019-2023)**. Belo Horizonte, 2024.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. Editora Villibor, São Paulo, SP, 1995.
- OJURI, O. O.; ADAVI, A. A. “Geotechnical and environmental evaluation of lime–cement stabilized soil–mine tailing mixtures for highway construction”. **Transportation Geotechnics**, v. 10, p. 1-12, 2017.
- OLIVEIRA, J. A. **Impactos socioambientais provocados pelo rompimento de barragens de contenção de rejeitos de mineração no Estado de Minas Gerais**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Gestão Ambiental. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Três Rios, RJ, 2019.
- OLIVEIRA, T. M de; GENEROSO, F. J.; SILVA, T. O.; SANT'ANNA, G. L.; SILVA, C. H. C.; PITANGA, H. N. “Propriedades geomecânicas de misturas de rejeitos de minério de ferro melhoradas com cimento Portland”. **Acta Scientiarum**. Tecnologia, v.41, n.1, ISSN 1807-8664, 2019.
- OSINUBI, K. J.; YOHANN, P.; EBEREMU, A. O. “Cement Modification of Tropical Black Clay Using Iron Ore Tailings as Admixtures”. **Journal of Transportation Geotechnics**, v. 5, p. 35-49, 2015.
- OTHMAN, K. “Evaluation of the Hot Asphalt Mix Aggregate Gradation Using Bailey Method: State-of-the-art”. **Journal of Engineering Sciences**, Assiut University Faculty of Engineering, v. 49, n. 4, p. 446–475, 2021.
- PÉREZ-GONZÁLEZ, E.; BILODEAU, J. P. “An optimized approach to multistage permanent deformation testing of granular materials”. **Materials**, v. 17, n. 3384, 2024.
- PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 aulas**. Oficina de Textos. 3ª Ed., 247 p., São Paulo, SP, 2006.
- POLIGNANO, M. V., LEMOS, R. S. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na Bacia do Rio Paraopeba. **Ciência & Cultura**, São Paulo, v. 72, n. 2, p. 37-43, abr./jun. 2020.
- 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.
- RASHIDI, M.; ASHTIANI, R. S.; SI, J.; IZZO, R. P.; McDANIEL, M. “A practical approach for the estimation of strength and resilient properties of cementitious materials”. **Transportation Research Record**, v. 2672, p. 52, 2018.

REN, Q.; BU, F.; HUANG, Q.; YIN, H.; ZHU, Y.; MA, R.; DING, Y.; ZHANG, L.; LI, J.; JU, L.; WANG, Y.; XU, W.; JI, H.; OH, W. “Effect of Iron Ore Tailings Replacing Porous Basalt on Properties of Cement Stabilized Macadam”. **Korean Journal of Materials Research**, v. 34, n. 6, p. 291-302, 2024.

REZENDE, V. L. “A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração”. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 28, n. 3, p. 375-384, 2016.

ROTTA, L. H. S.; ALCÂNTARA, E.; PARK, E.; NEGRI, R. G.; LIN, Y. N.; BERNARDO, N.; MENDES, T. S. G.; & SOUZA FILHO, C. R. “The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil”. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 90, p. 102119, 2020.

RUDNICK, R. C.; ILDEFONSO, J. S.; LUKIANTCHUKI, J. A. “Avaliação do módulo de resiliência em misturas alternativas estabilizadas quimicamente com cimento Portland”. 29º Encontro Anual De Iniciação Científica; 9º Encontro Anual De Iniciação Científica Júnior, **Anais Eletrônicos de Congresso**. Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2020.

SÁ, T. S. W.; ODA, S.; TOLEDO FILHO, R. D.; BALTHAR, V. K. C. B. L. M. “Uso de rejeitos de mineração em pavimentos rodoviários: um referencial teórico”. SALES, R. E. S.; SALES, R. S.; SOUSA, B. A. A. **Qualidade e Sustentabilidade na Construção Civil**. Editora Científica Digital, p. 152-172, Guarujá, SP, 2021.

SÁ, T. S. W.; ODA, S.; BALTHAR, V. K. C. B. L. M.; TOLEDO FILHO, R. D. “Use of iron ore tailings and sediments on pavement structure”. **Construction and Building Materials**, v. 342 part B, p. 128072, 2022.

SALOUR, F.; ERLINGSSON, S. “Characterisation of permanent deformation of silty sand subgrades from multistage RLT tests”. **Procedia Engineering**, v. 143, p. 300–307, 2016.

SAMARCO. **Pavimentação de estradas com rejeitos de mineração melhora vias em Mariana**. Samarco Mineração S.A. Mariana – MG, Brasil, 2020. Disponível em: <<https://www.samarco.com/2020/12/22/pavimentacao-de-estradas-com-rejeitos-de-mineracao-melhora-vias-em-mariana/>>. Acesso em 26 de setembro de 2022.

SERRA, G. A. **Análise da influência da umidade na deformabilidade de solos da Ilha de São Luís para emprego em camadas de pavimento**. Dissertação de Mestrado, Curso de Engenharia de Transportes. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, 2020.

SEVERO, C. B. **Aproveitamento de Rejeito de Minério de Ferro para Fabricação de Tijolos Cerâmicos**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia de Minas. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG, Araxá, MG, 2019.

SHETTIMA, A. U.; HUSSIN, M. W.; AHMAD, Y.; MIRZA, J. “Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete”. **Construction and Building Materials**, v. 120, p. 72–79, 2016.

SILVA, A. P. M., VIANA, J. P., CAVALCANTE, A. L. B. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**. IPEA, Relatório de Pesquisa, Brasília, 2012.

- SILVA, D. C.; FONTOURA, E.; ENGELKE, D. C.; ZAPPE, A. P. S.; MENSCH, N. G.; BRITO, L. A. T. “Estudo da influência de incorporação de cimento em solo arenoso através de ensaios triaxiais de módulo de resiliência”. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino de Transporte da ANPET, **Anais Eletrônicos de Congresso**. Balneário Camboriú, SC, 2019.
- SOLIMAN, H.; SHALABY, A. “Permanent deformation behavior of unbound granular base materials with varying moisture and fines content”. **Transportation Geotechnics**, v. 4, p. 1-12, 2015.
- SOUZA, J. V. S.; GUEDES, J. S. e M. “O rejeito de minério de ferro e suas aplicações na construção civil”. Simpósio Brasileiro De Engenharia Ambiental (IX SBEA) e XV ENEAmb, 2017, Belo Horizonte. **Anais Eletrônicos de Congresso**. Universidade FUMEC, Belo Horizonte, MG, 2017.
- SOUZA, M. L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. 3a ed. Rio de Janeiro, IPR. (Publ. 667), 1981.
- SUNIL, B. M.; MANJUNATHA, L. S.; LOLITHA, R.; SUBHASH, C. Y. “Potential use of mine tailings and fly ash in concrete”. **Advances in Concrete Construction**, v.3, n.1, p. 55-69, 2015.
- SWATHI, M.; ANDIYAPPAN, T.; SINGH, D.; KUNA, S. “Design of asphalt mixes with steel slag aggregates using the Bailey method of gradation selection”. **Construction and Building Materials**, v. 279, p. 122426, 2021.
- TAKEDA, M. C. **A influência da variação da umidade pós-compactação no comportamento mecânico de solos de rodovias do interior paulista**. Tese de Doutorado, Curso em Engenharia Civil (Transportes). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- TARAZONA, C. F. **Estudo da Alteração em Laboratório de Rejeitos de Mineração de Ferro para Análise em Longo Prazo**. Tese de Doutorado, Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. “Bailey Method for Gradation Selection in Hot-Mix Asphalt Mixture Design”. **Transportation Research Circular**, n. E-C044, ISSN 0097-8515, 2002.
- TUNES, S.; VASCONCELOS, Y. “O que fazer com os rejeitos gerados pela exploração mineral”. **Revista Pesquisa FAPESP**, São Paulo, ed. 339, maio 2024. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/o-que-fazer-com-os-rejeitos-gerados-pela-exploracao-mineral/>>. Acesso em: 22 jan. 2025.
- 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, 2022.
- VALE. **Sobre barragens e rejeitos**. Vale S.A., 2024. Disponível em: <<https://vale.com/pt/sobre-barragens-e-rejeitos>>. Acesso em: 21 jan. 2025.
- VAVRIK, W. R.; PINE, W. J.; CARPENTER, S. H. “Aggregate Blending for Asphalt Mix Design: Bailey Method”. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1789, n. 1, p. 146–153, 2002.
- VENKATESH, N.; HEERALAL, M.; PILLAI, R. J. “Resilient and permanent deformation behaviour of clayey subgrade soil subjected to repeated load triaxial tests”. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, 2018.

VILELA, A. P.; EUGÊNIO, T. M. C.; OLIVEIRA, F. F. de; MENDES, J. F.; RIBEIRO, A. G. C.; VAZ, L. E. V. de S. B.; MENDES, R. F. “Technological properties of soilcement bricks produced with iron ore mining waste”. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120883, 2020.

VERGILIO, C. D. S.; LACERDA, D.; VAZ DE OLIVEIRA, B. C.; SARTORI, E.; MUNIS CAMPOS, G.; DE SOUZA PEREIRA, A. L.; DE AGUIAR, D. B.; DA SILVA SOUZA, T.; GOMES DE ALMEIDA, M.; THOMPSON, F.; & DE REZENDE, C. E. “Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil)”. **Scientific Reports**, v. 10, p. 5936, 2020.

WANG C., JING J., QI Y., ZHOU Y., ZHANG K., ZHENG Y., ZHAI Y., LIU F. “Basic characteristics and environmental impact of iron ore tailings”. **Frontiers in Earth Science**, v. 11, p. 1181984, 2023.

WERKMEISTER, S.; NUMRICH, R.; WELLNER, F. “The development of a permanent deformation design model for unbound granular materials with the shakedown-concept”. **International Conference On The Bearing Capacity Of Roads And Airfields**, Lisboa, Portugal, v. 2, p. 1081-1096, 2002.

WERKMEISTER, S.; DAWSON, A. R.; WELLNER, F. “Pavement design model for unbound granular materials”. **Journal of Transportation Engineering**, v. 130, n. 5, 2004.

XU, F.; WANG, S.; LI, T.; LIU, B.; LI, B.; ZHOU, Y. “Mechanical properties and pore structure of recycled aggregate concrete made with iron ore tailings and polypropylene fibers”. **Journal of Building Engineering**, v. 33, p. 101572, 2021.

ZHAO, S.; FAN, J.; SUN, W. “Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultrahigh performance concrete”. **Construction and Building Materials**, v.50, p. 540–548, 2014.

ZHAO, Y.; GU, X.; QIU, J.; ZHANG, W.; LI, X. “Study on the Utilization of Iron Tailings in Ultra-High-Performance Concrete: Fresh Properties and Compressive Behaviors”. **Materials**, v.14, n.17, p. 4807, 2021.

ZHU, F.; ZHANG, W.; PUZRIN, A. M. “The slip surface mechanism of delayed failure of the Brumadinho tailings dam in 2019”. **Communications Earth & Environment**, v.5, n.33, 2024.