



DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO EXCESSO  
DE PESO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

Verônica Ghisolfi

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.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2018

DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO EXCESSO  
DE PESO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

Verônica Ghisolfi

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.

Examinada por:

---

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

---

Profa. Gisele de Lorena Diniz Chaves, D.Sc.

---

Prof. Rômulo Dante Orrico Filho, Dr. Ing.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2018

Ghisolfi, Verônica

Dinâmica de Sistemas para avaliação de impactos do excesso de peso no transporte rodoviário de cargas/  
Verônica Ghisolfi. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XVIII, 161 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 148-161.

1. Transporte de cargas. 2. Excesso de peso. 3. Dinâmica de sistemas. I. Ribeiro, Glaydston Mattos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

## **DEDICATÓRIA**

*Aos meus pais, Dalsileia e Francisco.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por sempre abençoar e iluminar o meu caminho, pela vida e pela saúde com as quais acordo a cada novo dia. A Ele que é meu refúgio, fortaleza e proteção, sem os quais eu nada seria.

Aos meus pais, Francisco e Dalsileia e às minhas irmãs Angélica e Jovana, obrigada por sempre acreditarem nos meus sonhos, pelas palavras de carinho e conforto nos momentos difíceis, por todo incentivo, confiança e esforço para que eu pudesse chegar até aqui.

À Fernanda pela amizade e convivência diária, obrigada pela paciência nos momentos de estresse, pelos sorrisos sinceros e por estar sempre pronta e alegre quando precisei. À Gigliara, amiga querida que me acompanhou nos últimos anos e, mesmo à distância, sempre me oferece palavras de encorajamento e perseverança.

Aos professores Glaydston Mattos Ribeiro e Gisele de Lorena Diniz Chaves, pela orientação na realização deste trabalho. Obrigada pela dedicação, paciência, confiança, incentivo à pesquisa, pelo conhecimento transmitido e pela amizade construída nesses últimos anos. A vocês, minha grande admiração pela competência com que exercem a profissão.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) pelo apoio e disposição em ajudar sempre que necessário.

Aos meus amigos e colegas de mestrado Túlio Silveira Santos e Bruno Salezze Vieira, pelo apoio e contribuição dados a esse trabalho. Também pela convivência e amizade construídas ao longo desse tempo.

À equipe do Projeto do Plano Nacional de Contagem de Tráfego – PNCT, professor Rômulo Dante Orrico Filho e ao engenheiro Saul Germano Rabello Quadros, pela confiança e pelo conhecimento transmitido. Agradeço também à Cristiane da Penha Bernardo, Gerusa Ravache, Marcus Vinicius Oliveira Camara, Fabiana Takebayashi, Mariam Tchepurnaya Daychoum, Heider Augusto Gomes e Eliezer Vieira da Silva pela contribuição de cada um à realização da pesquisa.

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, especialmente ao André Nunes, Ivone Hoffmann, Julio Cesar Donelli Pellizzon e Josenilson Gobira dos Santos, pela gentileza em prover informações para a aplicação do estudo de caso desta pesquisa.

Aos professores Gisele de Lorena Diniz Chaves e Rômulo Dante Orrico Filho por aceitarem participar da banca, pelo tempo dispendido na avaliação e contribuição para aprimoramento do trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo auxílio concedido.

## EPÍGRAFE

*“O futuro é construído pelas nossas decisões diárias,  
inconstantes e mutáveis, e cada evento influencia todos os outros”.*

*Alvin Toffler*

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

DINÂMICA DE SISTEMAS PARA AVALIAÇÃO DE IMPACTOS DO EXCESSO  
DE PESO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

Verônica Ghisolfi

Fevereiro/2018

Orientador: Glaydston Mattos Ribeiro

Programa: Engenharia de Transportes

O excesso de peso dos veículos no transporte rodoviário de cargas é um dos causadores das más condições das rodovias brasileiras, diminuindo a vida útil do pavimento, além de aumentar o risco de acidentes. Este é o caso do transporte de rochas ornamentais da cidade de Nova Venécia, estado do Espírito Santo, realizado por duas rotas alternativas, com destino ao Porto de Vitória, cuja atividade é protagonista de vários acidentes provocados pelo excesso de peso. Diante de tal problema, que também afeta a infraestrutura rodoviária, o objetivo geral desse trabalho é apresentar um modelo de simulação para avaliar a relação entre as políticas sobre o excesso de peso no transporte rodoviário e os custos associados às suas externalidades negativas. O modelo proposto avalia o impacto sobre os custos generalizados de transporte, manutenção do pavimento e acidentes rodoviários, sob diferentes políticas de carregamento dos veículos de rochas ornamentais por meio do método Dinâmica de Sistemas. Os resultados confirmam a economia de escala pela redução dos custos operacionais de transporte com a prática do excesso de peso por parte dos transportadores. No entanto, à medida que o excesso de peso aumenta, os custos sociais com manutenção do pavimento e acidentes rodoviários são elevados. Dessa forma, a melhor política de carregamento dos veículos depende da importância relativa entre os custos econômicos e sociais envolvidos.



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

SYSTEM DYNAMICS FOR EVALUATING IMPACTS OF OVERWEIGHT IN  
ROAD FREIGHT TRANSPORT

Verônica Ghisolfi

February/2018

Advisor: Glaydston Mattos Ribeiro

Department: Transportation Engineering

The overweight of vehicles in the road freight transportation is one of the causes of bad conditions of the Brazilian highways, reducing the useful life of the pavement, as well as an increase of the accidents. This is the case of the transportation of ornamental stones from the city of Nova Venécia, in the state of Espírito Santo, carried out by two alternative routes, destined to the Port of Vitória, whose activity is the protagonist of several accidents caused by excess weight. Faced with such a problem, which also affects road infrastructure, the overall objective of this work is to present a simulation model to assess the relationship between policies on overweight in road transport and the costs associated with its negative externalities. The proposed model assesses the impact on the general costs of transportation, pavement maintenance and road accidents, under different policies for the loading of ornamental stone vehicles using the Dynamic Systems method. The results confirm the economy of scale by reducing transport operating costs with the practice of overweight by hauliers. However, as the excess weight increases, the social costs with pavement maintenance and road accidents also increase. Therefore, the best vehicle loading policy depends on the relative importance of the economic and social costs involved.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivo Geral e Específicos .....	4
1.2	Justificativa .....	4
1.3	Estrutura da Dissertação .....	7
2	TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS .....	9
2.1	Impacto do Excesso de Peso sobre a Pavimentação .....	13
2.1.1	Solicitação e Desempenho do Pavimento.....	16
2.1.2	Operações de Manutenção.....	23
2.2	Impacto do Excesso de Peso sobre Acidentes Rodoviários.....	26
2.3	Regulamentação Brasileira sobre Peso de Veículos de Carga.....	30
3	DINÂMICA DE SISTEMAS.....	37
3.1	Estrutura do Diagrama de Causa e Efeito .....	38
3.2	Estrutura do Diagrama de Estoque e Fluxo .....	43
3.3	Testes de Modelos em Dinâmica de Sistemas .....	48
3.4	Aplicação da Dinâmica de Sistemas ao Setor de Transportes .....	53
4	ESTUDO DE CASO .....	57
4.1	O Setor de Rochas Ornamentais .....	57
4.2	O Transporte de Rochas Ornamentais no Espírito Santo .....	60
4.3	Caracterização das Rotas Analisadas.....	61
5	FORMULAÇÃO DO MODELO PROPOSTO .....	65
5.1	Previsão do Volume de Carga .....	67
5.2	Tempo de Viagem.....	70
5.3	Divisão Modal.....	80
5.4	Manutenção do Pavimento.....	84
5.5	Custo Social do Transporte de Carga.....	91
5.6	Avaliação de Políticas.....	96
6	PARÂMETROS PARA A SIMULAÇÃO DO MODELO.....	99
6.1	Parâmetros para o módulo Previsão do Volume de Carga .....	99
6.2	Parâmetros para o módulo Tempo de Viagem.....	101
6.3	Parâmetros para o módulo Divisão Modal .....	104
6.4	Parâmetros para o módulo Manutenção do Pavimento .....	107
6.5	Parâmetros para o módulo Custo Social do Transporte de Carga .....	111

7	TESTES DO MODELO PROPOSTO .....	114
7.1	Avaliação da Estrutura (Conservação Física) .....	114
7.2	Consistência Dimensional.....	116
7.3	Erro de Integração.....	117
7.4	Teste de Condições Extremas .....	118
7.5	Avaliação de Parâmetros .....	121
7.6	Reprodução de Comportamentos.....	121
7.7	Teste Endógeno de Reprodução de Comportamentos .....	122
7.8	Teste de Adequação de Limites .....	123
8	CENÁRIOS E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DINÂMICA .....	124
8.1	Cenário de Referência.....	126
8.2	Política Rígida.....	136
8.3	Política Moderada e Tolerante .....	138
8.4	Avaliação da Melhor Política .....	139
8.5	Excesso de Peso em todas as Rotas .....	140
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	144
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	148

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição modal da matriz brasileira de transportes regionais de cargas.	9
Figura 2.2 – Extensão da malha rodoviária brasileira. ....	11
Figura 2.3 – Redução da vida útil de um pavimento em função da sobrecarga. ....	14
Figura 2.4 – Tipos de eixos de veículos rodoviários de carga brasileiros. ....	18
Figura 2.5 – População, mortes por lesões e veículos motorizados por renda dos países. .....	27
Figura 2.6 – Configuração do veículo para transporte de rochas ornamentais.....	35
Figura 3.1 – Procedimento metodológico da Dinâmica de Sistemas. ....	39
Figura 3.2 – Diagrama de causa e efeito para a dinâmica da demanda e oferta de transporte e congestionamento. ....	40
Figura 3.3 – Crescimento exponencial a partir de um laço de realimentação positivo. .	41
Figura 3.4 – Busca por objetivo ( <i>goal seeking</i> ).....	41
Figura 3.5 – Comportamento oscilatório do sistema. ....	42
Figura 3.6 – Componentes utilizados no diagrama de estoque e fluxo. ....	44
Figura 3.7 – Diagrama de estoque e fluxo da demanda e oferta de transporte e congestionamento. ....	45
Figura 4.1 – Produção brasileira de rochas ornamentais por região.....	57
Figura 4.2 – Mapa do Brasil e do Espírito Santo com destaque aos principais núcleos da indústria de rochas ornamentais capixaba e o porto de Vitória. ....	58
Figura 4.3 – Cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais.....	60
Figura 4.4 – Divisão das rotas em trechos com base no VMDA. ....	63
Figura 5.1 – Diagrama de causa e efeito do modelo sobre o excesso de peso no transporte rodoviário de cargas.....	65
Figura 5.2 – Módulo Previsão do Volume de Carga. ....	68
Figura 5.3 – Módulo Tempo de Viagem. ....	72
Figura 5.4 – Tempo total de transporte das rotas. ....	79
Figura 5.5 – Distância total das rotas. ....	80
Figura 5.6 – Módulo Divisão Modal. ....	81
Figura 5.7 – Módulo Manutenção do Pavimento. ....	85
Figura 5.8 – Módulo Custo Social do Transporte de Carga – Manutenção do pavimento. .....	92
Figura 5.9 – Módulo Custo Social do Transporte de Carga – Acidentes. ....	95

Figura 5.10 – Módulo Avaliação de Políticas para o Transporte de Carga.....	97
Figura 6.1 – Estimativa da produção de rochas ornamentais de Nova Venécia – ES..	100
Figura 6.2 – Localização dos Postos PNT 2016.....	108
Figura 6.3 – Percentual das categorias veiculares na CVC de Colatina (a) e Linhares (b). .....	109
Figura 6.4 – Configurações mais relevantes das categorias de veículos pesados. ....	110
Figura 7.1 – Estoque do índice de condição do pavimento.....	115
Figura 7.2 – Mensagem do comando “ <i>Check Units</i> ” do Vensim.....	116
Figura 7.3 – Proporção do volume de carga nas Rotas #1 (a) e #2 (b) sob o pedágio da Rota #1 alterado.....	119
Figura 7.4 – Vida útil do pavimento sob percentual de 1.000% de excesso de peso por eixo. ....	119
Figura 7.5 – Valor do ICP sob vida útil de projeto igual a zero.....	120
Figura 7.6 – Manutenção sob vida útil e ICP igual a zero com intervalo de avaliação do pavimento igual a 3 anos. ....	120
Figura 8.1 – Veículos de rochas por ano na Rota #1 com 8% de crescimento na produção de rochas ornamentais.....	126
Figura 8.2 – Veículos de rochas por ano na Rota #2 com 8% de crescimento na produção de rochas ornamentais.....	126
Figura 8.3 – Veículos de rochas por ano na Rota #1 com 11% de crescimento na produção de rochas ornamentais.....	127
Figura 8.4 – Veículos de rochas por ano na Rota #2 com 11% de crescimento na produção de rochas ornamentais.....	127
Figura 8.5 – Veículos de rochas na Rota #1 em função da taxa de crescimento no volume de carga a ser transportada.....	128
Figura 8.6 – Custo por distância na Rota #2. ....	129
Figura 8.7 – Custo acumulado de transporte para (a) 8% e (b) 11% de crescimento no volume de carga.....	129
Figura 8.8 – Solicitações de manutenção nas Rotas #1 e #3 sob a condição inicial do ICP igual a 0, 25, 50 e 75 pontos.....	130
Figura 8.9 – Solicitações de manutenção na Rota #2 sob a condição inicial do ICP igual a 0, 25, 50 e 75 pontos. ....	130
Figura 8.10 - Solicitações de manutenção na Rota #2 sob a condição inicial do ICP igual a 100 pontos.....	131

Figura 8.11 – Valor do ICP da Rota #1 para um intervalo de dois anos na avaliação do pavimento e dois anos nas obras de manutenção. ....	134
Figura 8.12 – Valor do ICP da Rota #1 para um intervalo de cinco anos na avaliação do pavimento e cinco anos nas obras de manutenção. ....	135
Figura 8.13 – Custos econômicos, sociais e total acumulados no cenário-base.....	136
Figura 8.14 – Custos econômicos, sociais e total acumulados no cenário Política Rígida. ....	137
Figura 8.15 – Comparação dos custos no cenário-base e política rígida.....	137
Figura 8.16 – Comparação dos custos no cenário Política Moderada e Tolerante.....	139
Figura 8.17 – Diferença de custos nos cenários com excesso de peso apenas na Rota #1 e nas Rotas #1 e #2. ....	142

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Condições de superfície do pavimento. ....	26
Tabela 2.2 – Custo total e médio por gravidade de acidente. ....	28
Tabela 2.3 – <i>Ranking</i> dos trechos mais críticos de acordo com o número de acidentes graves (2014). ....	29
Tabela 5.1 – Fator de ajuste de greide e Equivalente de veículos pesados. ....	77
Tabela 6.1 – Exportação de rochas ornamentais de Nova Venécia – ES (Kg). ....	100
Tabela 6.2 – Estimativa do VMDA para os trechos em análise. ....	102
Tabela 6.3 – Estimativa do VMDA médio de cada trecho. ....	103
Tabela 6.4 – Custos operacionais por distância e tempo em relação ao tipo de pista, condição do pavimento e relevo para o caminhão biarticulado de 7 eixos. ....	106
Tabela 6.5 – VMDA de cada rota. ....	107
Tabela 6.6 – Relação entre índice de condição do pavimento e índices de irregularidade. ....	111
Tabela 6.7 – Custos para manutenção do pavimento. ....	111
Tabela 6.8 – Custo total e médio por gravidade de acidente. ....	112
Tabela 6.9 – Número e percentual de acidentes por gravidade. ....	112
Tabela 7.1 – Resultados do Tráfego total #1 para diferentes valores de Time Step. ...	117
Tabela 8.1 – Custo manutenção do pavimento para ICP inicial igual a 50 e 100 pontos. ....	132
Tabela 8.2 – Manutenção e Custo total por rota para cada combinação de intervalos de tempo da manutenção e avaliação do pavimento. ....	133
Tabela 8.3 – Custos econômicos e sociais no cenário Política Moderada e Tolerante. ....	138
Tabela 8.4 – Custo acumulado total sob variação do percentual de sobrecarga e importância do custo social em relação ao custo econômico (R\$ milhões). ....	140
Tabela 8.5 – Custos no cenário com todas as rotas em excesso de carga (R\$). ....	141
Tabela 8.6 – Custo acumulado total sob variação do percentual de sobrecarga e importância do custo social em relação ao custo econômico (R\$ milhões). ....	142

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1– Fatores de equivalência de carga da AASHTO.....	19
Quadro 2.2 – Fatores de equivalência de carga da USACE.....	19
Quadro 2.3 – Limite de carga e tolerância por tipo de eixo.....	33
Quadro 3.1 – Testes de validação do modelo de simulação em Dinâmica de Sistemas.....	49
Quadro 3.2 – 24 testes agrupados em 5 categorias de modelagem.....	52
Quadro 5.1 – Parâmetros para decisão do tipo de manutenção a ser realizada.....	89
Quadro 5.2 – Variável Operações de manutenção em função do tipo de manutenção.....	91
Quadro 5.3 – Variável Operações de manutenção em função do tipo de manutenção.....	93
Quadro 6.1 – Valores de pedágios nas rotas em análise para o caminhão de 7 eixos.....	107
Quadro 6.2 – Configurações das categorias representativas para o cálculo do Número N.....	109
Quadro 6.3 – Limites de peso, admitindo-se a tolerância de 10% por eixo.....	110
Quadro 7.1 – Variáveis para o teste de condições extremas.....	118
Quadro 8.1 – Descrição dos cenários.....	124



## LISTA DE SIGLAS

AASHTO – *American Association of State Highway and Transportation Officials*  
ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais  
AET – Autorização Especial de Trânsito  
AMB – Anuário Mineral Brasileiro  
ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres  
ASTM – *American Society for Testing and Materials*  
APCD – Anhui Provincial Communications Department  
BPR – *Bureau of Public Roads*  
CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior  
CGPERT – Coordenação Geral de Operações Rodoviárias  
CGPLAN – Coordenação Geral de Planejamento e Programação de Investimentos  
CNT – Confederação Nacional do Transporte  
CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito  
COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia  
CTB – Código de Trânsito Brasileiro  
DNER – Departamento Nacional de Estradas e Rodagem  
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes  
DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral  
DS – Dinâmica de Sistemas  
ESRS – Eixo simples de rodagem simples  
ESRD – Eixo simples de rodagem dupla  
FC – Fator de Carga  
FHP – Fator de Hora-Pico  
FR – Fator Climático Regional  
FV – Fator de Veículo  
HCM – *Highway Capacity Manual*  
HDM – *Highway Development and Management*  
HSM – *Highway Safety Manual*  
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
ICP – Índice de Condição do Pavimento  
IDEIES – Instituto de Desenvolvimento Industrial do Espírito Santo  
IPCA – Índice de Preços ao Consumidor Amplo

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias  
IRI – *International Roughness Index*  
MTI – *Massachusetts Institute of Technology*  
MTPA – Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil  
NCM – Nomenclatura Comum do Mercosul  
OMS – Organização Mundial da Saúde  
PIB – Produto Interno Bruto  
PNCT – Plano Nacional de Contagem de Tráfego  
PNLT – Plano Nacional de Logística e Transportes  
PWC – PricewaterhouseCoopers  
QI – Quociente de Irregularidade  
RNTRC – Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas  
SECEX – Secretaria de Comércio Exterior  
SNV – Sistema Nacional de Viação  
TDRD – Tandem duplo de rodagem dupla  
TKU – Tonelada-quilômetro-útil  
TRB – *Transportation Research Board*  
TTRD – Tandem triplo de rodagem dupla  
UCP – Unidade de carro de passeio  
USACE – *United States Army Corps of Engineers*  
UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro  
VMDA – Volume Médio Diário Anual

# 1 INTRODUÇÃO

O crescimento sustentável de uma nação depende de sistemas de transporte eficientes e eficazes. Vários autores evidenciaram a relação positiva entre o desenvolvimento econômico de um país e sua infraestrutura de transportes (Ozbay *et al.*, 2007; Weisbrod, 2008; Fiorello *et al.*, 2010; Hong *et al.*, 2011; Diaz *et al.*, 2016). Os objetivos do sistema de transportes envolvem viabilizar os insumos ao setor produtivo, assim como disponibilizar os produtos finais aos consumidores. Além disso, tal sistema deve integrar a população entre as regiões do país, enquanto minimizam o desperdício de recursos ao otimizar sua utilização.

Bertussi e Ellery Junior (2012) mostraram que o investimento público em infraestrutura de transportes provoca um efeito positivo sobre o desempenho econômico de longo prazo dos estados brasileiros e contribui para a redução da desigualdade de renda entre eles. No entanto, o país enfrenta dificuldades de infraestrutura viária para sua integração e desenvolvimento sustentável. No Brasil, a inadequada e insuficiente infraestrutura colabora para uma baixa participação nas exportações, tornando o país limitado para o crescimento e expansão de sua economia, conforme Erhart e Palmeira (2006).

Os custos logísticos brasileiros representaram 12,3% do valor do Produto Interno Bruto (PIB) no ano de 2016. Entre os custos logísticos, os custos de transporte representam aproximadamente 62%, o que demonstra o grau de importância de sistemas de transporte eficientes para o desenvolvimento econômico nacional (ILOS, 2017). Em contrapartida, o investimento em infraestrutura de transporte foi de apenas 0,14% do PIB em 2016, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2017).

Esse desequilíbrio entre utilização versus investimentos ocorre há algum tempo. Como consequência, a carência na infraestrutura de transportes afeta significativamente o Brasil em *rankings* como o de desempenho logístico, divulgado pelo Banco Mundial. Na edição de 2016, o Brasil ficou na 55ª posição. Na construção do *ranking*, o Banco Mundial analisa seis itens (Consistência/Confiabilidade, Rastreamento de Carga, Competência dos Serviços, Disponibilidade de Transporte, Procedimento de Alfândega e Infraestrutura), com o Brasil tendo ficado na 49ª posição no item Infraestrutura (The World Bank, 2016). Ainda neste quesito, o país ocupou a 72ª posição entre 138 países

avaliados pelo Fórum Econômico Mundial, que considera a infraestrutura como um dos pilares para a competitividade global (World Economic Forum, 2016).

Macêdo *et al.* (2010) argumentaram que a tomada de decisão para a realização de investimentos em infraestrutura de transportes é feita de forma superficial pelo governo, que não dispõe de informações e métodos adequados para alocar seus recursos de forma plenamente eficaz. Isso dificulta a alocação dos investimentos em torno de um planejamento, com uma visão integrada no sentido de incentivar o investimento privado e promover o bem-estar social (Bertussi e Ellery Junior, 2012).

Se, por um lado, a ampla oferta de transportes é benéfica para o desenvolvimento econômico, por outro, o aumento da demanda por viagens de passageiros e cargas produziu os congestionamentos, poluição e acidentes, cujos custos sociais são distribuídos de forma desigual sobre a sociedade (Santos, 2010).

O transporte de carga, especificamente, impacta as esferas econômica, social e ambiental de um país (Schade e Schade, 2005). O crescimento econômico nacional depende da atividade de transporte de carga e sua infraestrutura permite e dá apoio ao crescimento econômico (Diaz *et al.*, 2016). Em relação às esferas social e ambiental, porém, vários impactos podem ocorrer devido ao desenvolvimento da infraestrutura e de operações de transporte de mercadorias, devendo ser considerados no planejamento estratégico desse setor (PwC, 2009).

Entre os impactos sociais e ambientais, Castro (2013) destaca a poluição do ar e sonora, congestionamentos, acidentes, poluição das águas pelos resíduos deixados nas estradas e vazamentos em postos de abastecimento, disposição de resíduos sólidos, como óleos lubrificantes e pneus, destruição e perda de áreas naturais pela construção de vias, e efeito estufa causado pelos gases emitidos pelos veículos.

Um dos principais problemas do transporte rodoviário de cargas é o sobrepeso dos veículos, um dos causadores das más condições das estradas brasileiras; do desgaste desnecessário de peças dos caminhões, diminuindo a vida útil dos veículos; do aumento do consumo de combustível; além do maior risco de acidentes (Silva *et al.*, 2016). As consequências de tais problemas são percebidas pela degradação da infraestrutura

rodoviária em termos de pavimentação, pelo elevado custo operacional do transporte e a diminuição da qualidade do serviço prestado.

Ressalta-se que o excesso de peso traz consequências danosas ao patrimônio público e aos próprios condutores, transportadores ou proprietários dos veículos, que sofrem prejuízos naturais de tal prática: multas, despesas com o transbordo da carga, atraso na entrega de mercadorias, aumento dos custos de manutenção e diminuição da vida útil do veículo (Silva *et al.*, 2016).

A Agência Nacional de Transportes Terrestres – ANTT afirma que o sobrepeso dos veículos de carga também tem reflexos na segurança viária, devido aos maiores riscos de acidentes e aos perigos existentes em uma via danificada (ANTT, 2017b). A sobrecarga foi identificada como uma das principais causas de acidentes envolvendo caminhões no Brasil, segundo estudo realizado por Blower e Woodrooffe (2012).

Um dos exemplos evidentes sobre o problema do excesso de peso em veículos de carga no Brasil, encontra-se no transporte de rochas ornamentais no estado do Espírito Santo, que foi alvo de uma ação civil pública em que Promotores da Justiça, que atuam nas comarcas municipais do território capixaba, foram aconselhados pelo Ministério Público a ingressarem com ações criminais contra proprietários de empresas exploradoras e transportadoras de rochas, caso fosse comprovado o excesso de peso durante o transporte ou ocorresse algum acidente (Gonçalves, 2010; Castro *et al.*, 2011).

Em 2010, o CONTRAN se manifestou por meio da Resolução nº 354/2010 devido à gravidade dos acidentes nas estradas do Espírito Santo, provocados pelo tombamento dos caminhões carregados com blocos de mármore e granito. Ainda assim, acidentes graves protagonizados por veículos que transportam rochas ornamentais continuam ocorrendo. Em 2017, dois acidentes envolvendo tais veículos provocou trinta e quatro mortes e vinte e nove feridos (Albuquerque, 2017).

Dessa forma, Castro (2013) afirma que o interesse em avaliar os custos sociais e as externalidades do transporte, em particular o rodoviário, vem crescendo de forma significativa, refletindo a necessidade de políticas mais eficazes de controle dos efeitos negativos associados ao setor de transportes.

## **1.1 Objetivo Geral e Específicos**

Face às informações apresentadas sobre o excesso de peso praticado no transporte de cargas e sabendo que este é um problema recorrente do transporte de rochas ornamentais na região noroeste do estado do Espírito Santo, com destino ao Porto de Vitória, depara-se com o seguinte problema de pesquisa: como mensurar o impacto do excesso de peso no transporte rodoviário de rochas ornamentais sobre os custos econômicos e sociais envolvidos?

Diante de tal problema, que afeta a infraestrutura rodoviária no que se refere à segurança e ao consumo adicional de recursos para manter a trafegabilidade na rede de transporte, o objetivo geral deste trabalho é apresentar um modelo de simulação, em Dinâmica de Sistemas, para avaliar a relação entre o excesso de peso no transporte rodoviário de rochas ornamentais e os custos associados às suas externalidades negativas, mais especificamente sobre os custos operacionais de transporte e custos sociais com acidentes rodoviários e manutenção do pavimento.

Como objetivos específicos determina-se:

1. Identificar na literatura, as variáveis relacionadas aos impactos negativos do excesso de carga no transporte rodoviário;
2. Relacionar as variáveis identificadas em um diagrama de causa e efeito, apontando as influências exercidas entre si e sobre os custos associados;
3. Elaborar e equacionar os diagramas de estoque e fluxo, baseando-se no método denominado Dinâmica de Sistemas;
4. Obter os parâmetros quantitativos necessários para a inserção no modelo matemático; e
5. Testar e simular o modelo proposto para obtenção e análise de cenários que evidenciem o impacto da variação do excesso de peso sobre os custos associados às externalidades negativas no transporte rodoviário de cargas.

## **1.2 Justificativa**

Esta pesquisa pode ser justificada pois o Brasil, apesar de toda regulamentação legal existente, ainda possui um número elevado de veículos que trafegam com excesso de carga. Em uma pesquisa do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes –

DNIT, verificou-se que 77% dos veículos transportadores trafegavam com sobrepeso e que 10% de excesso de carga por eixo podem reduzir a vida prevista de um pavimento em até 40% (DNIT, 2006b).

A falta de fiscalização por pesagem motiva tal prática por veículos que se deslocam na rede pavimentada, razão pela qual o Ministério dos Transportes Portos e Aviação Civil empreendeu um amplo programa de reequipamento e expansão dos postos de pesagem em todo o país, por meio do Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem em 2006 (DNIT, 2016), constituído de 148 postos fixos e 72 praças para operação com equipamentos móveis (cobertura de fugas aos postos fixos), cujo objetivo era estancar o processo de deterioração da malha rodoviária, coibindo o tráfego de veículos pesados em desacordo com a legislação (DNIT, 2006c). A localização dos postos foi determinada em função de critérios como:

- Avaliação dos principais corredores de transporte rodoviário;
- Avaliação dos principais centros (industriais e agrícolas);
- Localização dos principais pontos de distribuição de cargas (ferrovias e portos);
- Avaliação dos volumes de tráfego;
- Localização das balanças já implantadas (em funcionamento ou não) na malha rodoviária federal; e
- Verificação do grau de importância dos pontos escolhidos para as pesquisas, tomando-se por base a conjugação de rotas.

Os Postos de Pesagem Veicular – PPV classificam-se em móveis e fixos. Os PPV móveis utilizam equipamento portátil e são flexíveis com a mudança de localização na rodovia. Os PPV fixos possuem balança seletiva (que pesa os veículos a 60 km/h) e balança lenta de maior precisão, que confirma o excesso de peso preliminarmente indicado, por onde os veículos trafegam em baixa velocidade, sendo em seguida direcionados para um pátio de estacionamento para aplicação das medidas consequentes (Borges, 2012).

No estado do Espírito Santo, os postos de pesagem veicular da BR-101 são operados e as fiscalizações são realizadas apenas mediante programação, levando em conta os horários com maior volume de transporte de veículos pesados e disponibilidade de

recurso humano da ANTT no estado (Machado, 2017), ou seja, não operam de forma contínua.

Além disso, muitos veículos utilizam rotas de fuga, desviando dos postos de pesagem (Portal Tempo Novo, 2017). Para que irregularidades, tais como excesso de peso ou problemas na documentação, não sejam identificadas, os motoristas contornam o posto de fiscalização pelos desvios na rodovia (Junqueira, 2017).

Por outro lado, os instrumentos para a quantificação dos impactos de externalidades causadas pelo transporte não são satisfatórios, com controvérsias sobre a relação entre o transporte e seus impactos, bem como sobre o cálculo dos custos associados (Castro, 2013). Portanto, torna-se necessária a melhoria da qualidade e da eficiência do sistema de transportes para atender as expectativas do crescimento econômico, sendo fundamental desenvolver estudos que auxiliem a definição de prioridades de investimentos, visando o equilíbrio econômico e social do Brasil (Eller *et al.*, 2011).

Bazzan (2014) afirma que os sistemas de transporte são sistemas complexos e, por isso, o poder público e/ou privado tem necessidade de testar, em ambientes de simulação, as políticas e ações antes que elas sejam efetivamente implementadas no mundo real, aberto e dinâmico. Nesse sentido, a Dinâmica de Sistema (DS) pode ser usada para simular sistemas complexos que envolvam *feedbacks*, no qual o julgamento humano, a experiência e as lógicas são combinados (Manataki e Zografos, 2009). Lyneis (2000) também afirmou que os modelos em DS podem ser usados não apenas para a tomada de decisões, mas também para identificar variáveis que têm o maior impacto sobre o sistema e necessitam de maior atenção ao longo do tempo. A DS é uma ferramenta de simulação útil ao setor de transportes como um todo (Shepherd, 2014), bem como para os gestores que atuam na regulação do peso de veículos no transporte rodoviário de cargas (Saleh *et al.*, 2010).

Nesse sentido, acredita-se que um modelo de simulação dinâmica é capaz de fornecer uma visão global do sistema, incorporando questões relativas ao problema do sobrepeso de carga no transporte rodoviário e seus impactos provocados em outros setores, como os custos econômicos e sociais. Além disso, o dinamismo do método refere-se ao processo de evolução do comportamento de um sistema ao longo do tempo (Sterman, 2000).



Sendo assim, este estudo mostra-se relevante para o processo de planejamento estratégico e tomada de decisão no que se refere à formulação e implementação de políticas que regulamentam o peso de cargas no sistema de transporte rodoviário brasileiro.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

Este trabalho está dividido em nove capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se esta introdução que discorre sobre o panorama geral do estudo, problema de pesquisa, os objetivos, geral e específicos, bem como a justificativa do trabalho.

No Capítulo 2 são feitas considerações sobre o transporte rodoviário de cargas brasileiro, os impactos do excesso de peso sobre a pavimentação, como a influência sobre o número de solicitações do eixo padrão equivalente, redução da vida útil do pavimento e sua relação com o decréscimo da condição do pavimento, além de operações de manutenção rodoviária realizadas no Brasil.

Ainda no Capítulo 2 trata-se sobre os acidentes rodoviários no país, modelo de previsão de acidentes e estimativas de custos envolvidos por gravidade de acidente. Por fim, o Capítulo 2 ainda discorre sobre os principais dispositivos legais atualmente em vigor, como leis e resoluções específicas para a regulação de peso e dimensões de veículos transportadores de cargas, destacando-se aqueles voltados para o transporte de rochas ornamentais, objeto do estudo de caso deste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta o método utilizado, denominado Dinâmica de Sistemas, seus fundamentos teóricos, conceitos, tipos de diagramas e suas estruturas, além de testes de confiabilidade dos modelos de simulação. Apresenta-se também, exemplos da literatura em que a Dinâmica de Sistemas foi utilizada em modelos do transporte rodoviário de cargas, especialmente envolvendo o problema do excesso de peso, destacando-se suas limitações para aplicação à realidade brasileira.

O Capítulo 4 apresenta o estudo de caso, contextualizando-se o setor de rochas ornamentais no Brasil e no Espírito Santo, bem como os problemas advindos do transporte rodoviário desse tipo de carga no estado capixaba. Também no Capítulo 4 é apresentada a caracterização das rotas de escoamento selecionadas para a análise do problema.

O Capítulo 5 apresenta a formulação do modelo de simulação utilizado no problema em estudo, com a identificação e classificação das variáveis, construção do diagrama de causa e efeito, no qual as variáveis são agrupadas em módulos, e formulação dos diagramas de estoque e fluxo para cada módulo do diagrama de causa e efeito, bem como todo o equacionamento matemático do modelo proposto.

No Capítulo 6 são detalhados todos os parâmetros de entrada necessários ao modelo de simulação, forma de obtenção dos dados e considerações úteis à formulação da estrutura do modelo. Já os testes de confiabilidade realizados no modelo proposto são descritos no Capítulo 7.

A descrição dos cenários simulados é realizada no Capítulo 8, que também apresenta os resultados, análises comparativas e discussões a respeito dos mesmos.

Por fim, o Capítulo 9 apresenta as considerações finais do trabalho, com a avaliação de cumprimento dos objetivos propostos e resultados obtidos, além de recomendações para trabalhos futuros.

## 2 TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS

A matriz de transportes brasileira é caracterizada pela dependência do sistema rodoviário para o transporte de cargas. Segundo o Ministério dos Transportes Portos e Aviação Civil (MTPA, 2012), em seu Relatório sobre o Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do Plano Nacional de Logística e Transportes (PNLT), o modo rodoviário é responsável pela movimentação de 52% dos fluxos de carga, o que corresponde a mais de 600 bilhões de TKU (tonelada-quilômetro-útil), como mostra a Figura 2.1.

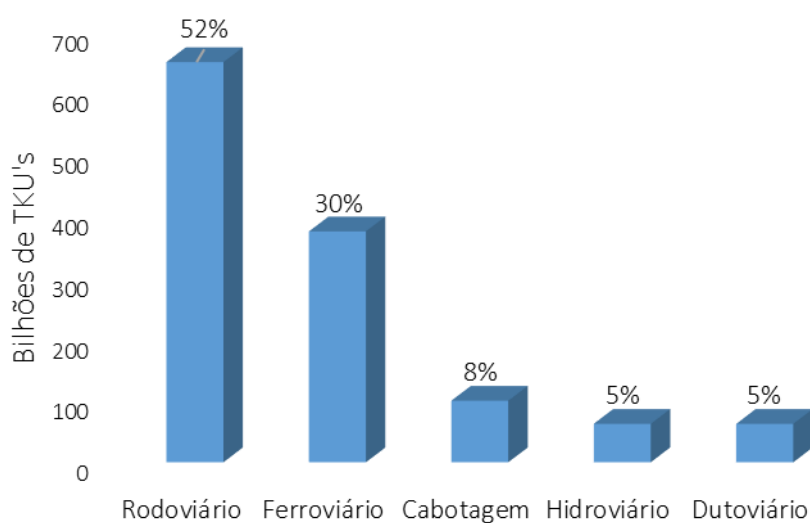


Figura 2.1 - Distribuição modal da matriz brasileira de transportes regionais de cargas.  
Fonte: Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil (2012).

A dependência excessiva do transporte brasileiro de cargas pelo modo rodoviário é evidente quando se compara o uso desse modo de transporte em outros países de dimensões continentais. Nos Estados Unidos, a participação das rodovias no transporte de cargas é de 26%, na Austrália é de 24% e na China de apenas 8% (Bartholomeu, 2006).

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA afirma que, desde o advento da rodoviarização, na década de 1950, a matriz de transporte brasileira tem se mantido desequilibrada, com alta dependência do transporte rodoviário, cujos custos, muitas vezes superam aqueles apresentados por outros, como o ferroviário e aquaviário, por exemplo (IPEA, 2010).

A permanência do uso do transporte rodoviário nacional pode ser explicada pelos custos relativos de construção das vias e pelo foco de curto prazo dos planejamentos de transporte no país. Além disso, o transporte rodoviário de cargas apresenta vantagens como flexibilidade nas rotas e movimentação de pequenos volumes (IPEA, 2010).

Por outro lado, os custos variáveis são elevados, como aponta o estudo de Eller *et al.* (2011), cujos autores afirmam que o modo ferroviário se mostra mais eficiente em relação ao modo rodoviário, quando se consideram os custos de médio e longo prazos, principalmente os custos externos, uma vez que os custos ambientais são expressivamente maiores no segundo modo.

A malha rodoviária brasileira é constituída por 1.720.756 quilômetros de extensão, dos quais apenas 12,3% são de rodovias pavimentadas, 78,6% são de rodovias não pavimentadas e 9,1% são de rodovias planejadas (CNT, 2016), conforme ilustrado na Figura 2.2.

Com relação ao estado da malha rodoviária brasileira, segundo a CNT (2016), por meio da Pesquisa CNT de Rodovias, os resultados obtidos em uma amostra de 103.259 km pavimentados demonstraram que, considerando o estado do pavimento, 48,3% foram classificados como “péssimo”, “ruim” ou “regular”, e em relação ao estado geral das rodovias, 58,2% foram consideradas como “péssimas”, “ruins” ou “regulares”.

A frota nacional de veículos de cargas é retratada pela ANTT, que fornece os dados por meio do Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Cargas – RNTRC com 483.345 transportadores registrados como de carga para terceiros, e 1.519.542 veículos de carga, em todo Brasil. Do total de registros emitidos, 76,1% são de transportadores autônomos, 23,85% de empresas de transporte de cargas e 0,05% pertencentes às cooperativas, cuja idade média da frota total é de 12,9 anos (ANTT, 2017a).

Tais agentes do sistema de transporte rodoviário de cargas têm enfrentado a grande competitividade decorrente de uma economia globalizada, em que a necessidade de redução de custos comprime o valor dos fretes. Além disso, a demanda por transporte rodoviário está focada em transportadores organizados que sejam capazes de oferecer um preço conveniente, estocar, transportar rapidamente e fornecer no tempo solicitado (Albano, 2005).

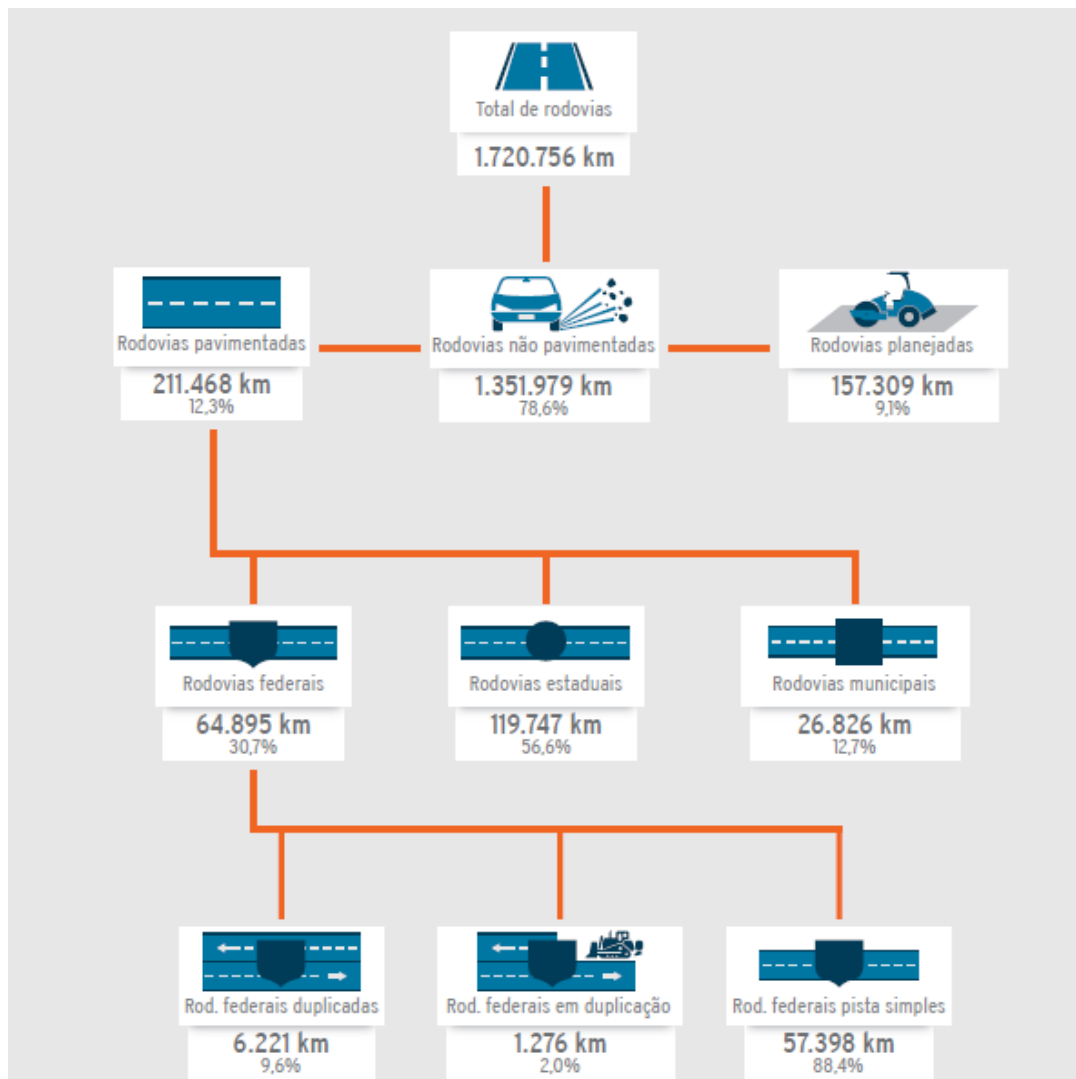


Figura 2.2 – Extensão da malha rodoviária brasileira.

Fonte: CNT (2016, p. 10).

No entanto, a produtividade do transporte de cargas brasileiro é deficiente, atingindo apenas 22% daquela registrada no sistema de transporte dos Estados Unidos, o consumo energético é 29% maior e a emissão de poluentes é 2,6 vezes superior à norte-americana (CNT e CEL, 2002). Desta maneira, apesar das vantagens do modo rodoviário, como a flexibilidade, disponibilidade e velocidade, há uma série de limitações quando comparado com outros modos de transporte, como baixa produtividade e eficiência energética, elevados níveis de emissão de poluentes atmosféricos e menores índices de segurança (Bartholomeu, 2006).

A situação precária das vias, apontada pela Pesquisa CNT de Rodovias (CNT, 2016), gera maiores custos para todo sistema produtivo. Trafegar nestas estradas danificadas acarreta um aumento de 45% no custo operacional dos veículos, exige o dobro do tempo

de viagem e resulta em um acréscimo substancial no custo final dos produtos transportados (Tizzot, 2004). Este autor ainda afirma que não conservar, deixar deteriorar e reconstruir leva a um gasto de três a seis vezes maior do que se gastaria com a conservação adequada do pavimento no momento oportuno.

O sobrepeso de cargas nas rodovias é o principal causador das más condições das estradas brasileiras (Silva *et al.*, 2016). Sobre esse problema, o Banco Mundial apresentou um estudo com base no gerenciamento de rodovias na província de Anhui, na China, cujo objetivo era explorar o efeito sobre a economia pelos veículos com excesso de peso (APCD, 2006).

O estudo concluiu que o transporte com sobrepeso era a escolha necessária no ambiente de indústrias de recursos intensivos e, proibir estritamente o excesso de peso, faria aumentar os preços de muitos produtos. Por esta razão, o público e os governos em diferentes áreas apresentaram grande tolerância aos veículos com sobrepeso. No entanto, a falta de informações sobre os custos e benefícios exatos e os impactos das regulamentações sobre as esferas social e ambiental, impediram seus esforços para fornecer aconselhamento político útil (APCD, 2006).

De acordo com a *Commission of the European Communities* (1998), os componentes do custo marginal social do transporte rodoviário, são os custos operacionais das rodovias (gastos com energia, mão-de-obra), os custos dos danos à infraestrutura (custos de manutenção rodoviária), os custos de congestionamentos e de escassez (custos de atrasos impostos aos usuários resultantes do congestionamento do tráfego), os custos ambientais (poluição sonora, da água, do solo e do ar) e os custos de acidentes (em termos de danos materiais e perdas de produto).

A precificação de rodovias pelo seu custo marginal social é a metodologia que tem como objetivo imputar aos usuários do transporte rodoviário os custos que eles causam à sociedade, o que inclui desde o desgaste provocado pelos veículos aos pavimentos das rodovias até os custos ambientais e os custos de acidentes relacionados ao transporte rodoviário (Lacerda, 2005).

Dessa forma, dada a relevância do transporte rodoviário de cargas para o Brasil, pretende-se então avaliar a relação entre o excesso de peso dos veículos de cargas e seus

impactos sobre o custo operacional de transporte e sobre os custos sociais de manutenção da pavimentação e acidentes rodoviários, tendo-se como foco o transporte de rochas ornamentais no estado do Espírito Santo, que apresenta tal prática de excesso de carga.

## **2.1 Impacto do Excesso de Peso sobre a Pavimentação**

O excesso de carga por eixo é uma das maiores causas da deterioração prematura das rodovias. Albano (2005) relaciona o transporte rodoviário de cargas com o desempenho e a durabilidade prevista para pavimentos. Segundo o autor, o excesso de carga praticado por parte dos transportadores é uma das maiores causas da deterioração dos pavimentos, ressaltando a importância da fiscalização por pesagem em rodovias pavimentadas.

Em sua pesquisa experimental utilizando um simulador de tráfego, concluiu que para 20% de excesso de carga por eixo, há uma redução da vida útil prevista em cerca de 48% no pavimento espesso estudado. Já na pesquisa de campo em quatro rodovias federais o autor concluiu que, quando não há pesagem e o excesso de carga por eixo é de 20%, a redução da vida prevista para os pavimentos das rodovias estudadas é em média 23% (Albano, 2005).

Testes desenvolvidos na Via Dutra comprovam que o excesso de carga da frota provoca uma redução na vida útil das rodovias em torno de 25% devido às deformações prematuras, principalmente, trincas e fissuras. Com isso, a recuperação das pistas tem de ser antecipada, o que gera um aumento de até 40% nos custos de manutenção (Giro das Estradas, 2003).

A degradação do pavimento aumenta exponencialmente com a carga por eixo, cujo expoente varia entre 3 e 6, de acordo com o tipo e estrutura do pavimento (Chou, 1996). Para efeitos práticos e didáticos, aceita-se, internacionalmente, como um valor médio aplicável à relação entre excesso de peso e degradação do pavimento, um expoente igual a 4, o que determina o que é conhecido como a Lei da Quarta Potência (Bock, 2016).

Assim, um eixo de carga duas vezes mais carregado que outro causará 16 vezes mais danos ao mesmo pavimento. Widmer (2002) afirma que o aumento de carga de 20% acima dos limites atuais implicará na redução da vida útil da estrutura em 50% e Albano

(2004) ressaltou que os 2,5% a mais na tolerância sobre a carga por eixo estabelecida desde a Resolução nº 104/99 (CONTRAN, 2000), é responsável por uma redução de 10 a 15% na vida prevista do pavimento.

Neste contexto de tráfego com excesso de cargas, o aumento da tolerância por eixo afeta de forma significativa a vida útil dos pavimentos (Bock, 2016). Tomando-se como exemplo um pavimento projetado para uma vida útil de 15 anos, com sobrecargas de 5%, 7,5% e 10%, terá sua vida útil reduzida consideravelmente conforme a análise apresentada na Figura 2.3.

Como pode-se observar na Figura 2.3, um aumento de 5% na carga por eixo provoca um dano relativo de 20% à estrutura, reduzindo a vida útil em até 3 anos. Com aumentos nas sobrecargas da ordem de 7,5% e 10%, o nível de dano relativo provocado foi de 26,7% e 35,0%, respectivamente, o que leva a uma estimativa de redução na vida útil da estrutura de 4 e 5,3 anos, em um período de projeto de 15 anos (Bock, 2016).

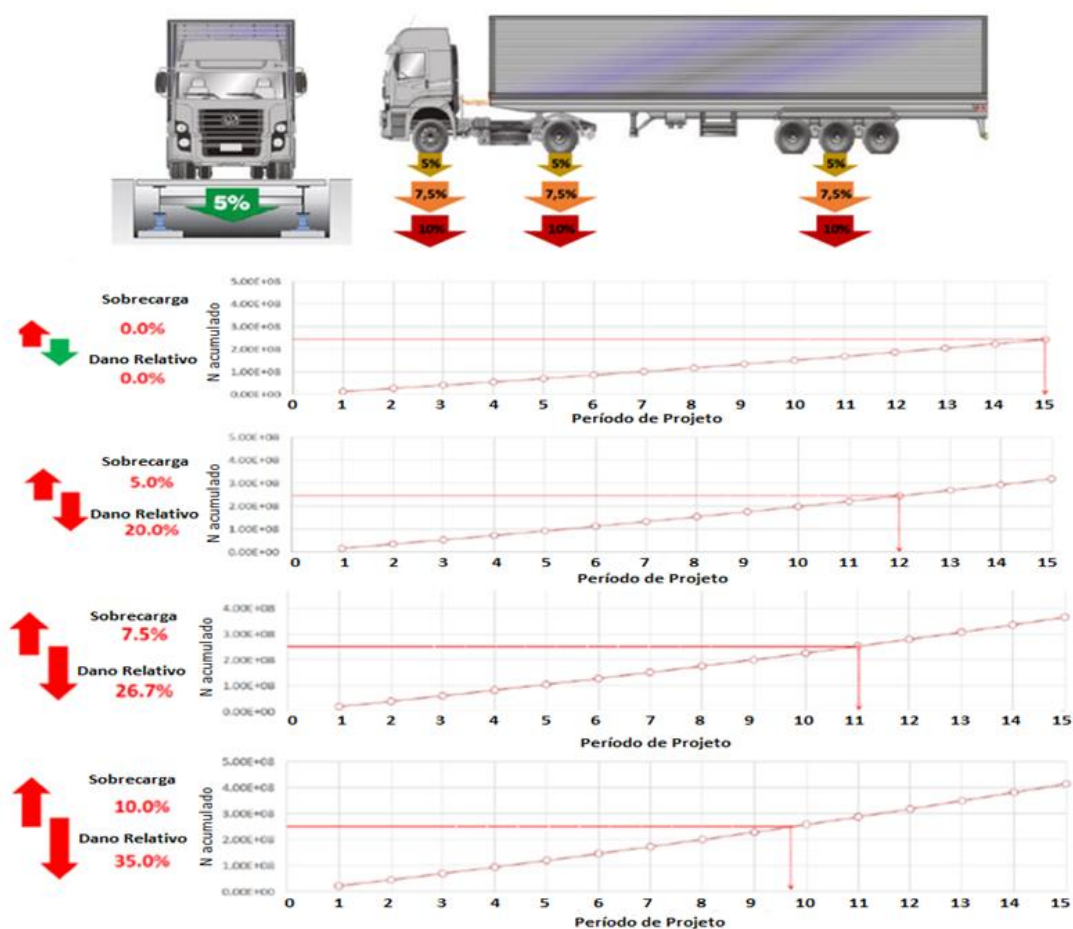


Figura 2.3 – Redução da vida útil de um pavimento em função da sobrecarga.

Fonte: Brito *et al.* (2013).



Por meio de uma avaliação funcional e econômica com a utilização do programa HDM-4 (*Highway Development and Management*), desenvolvido pelo Banco Mundial para avaliar projetos de rodovias, como manutenção e reabilitação dos pavimentos, Albano (2005) concluiu que para a estratégia de conservação, a inexistência de fiscalização de pesagem aumenta em 33,0% os gastos de manutenção rodoviária. Por fim, o autor desenvolveu uma pesquisa de opinião para detectar a percepção dos grupos de motoristas, empresários e técnicos sobre questões ligadas com a pesagem de caminhões, cujo consenso (65% em média) apontou a inexistência ou as poucas vantagens em trafegar sobrecarregado.

Nesse contexto, a Associação Nacional do Transporte de Cargas e Logística (NTC & LOGÍSTICA, 2011) afirma que a deficiência da infraestrutura rodoviária pode comprometer a viabilidade da atividade transportadora, pois a inadequação do pavimento gera custos adicionais para o transportador de cargas brasileiro, de 91,5%, 65,6% e 41% quando o estado do pavimento é classificado como “péssimo”, “ruim” ou “regular”, respectivamente, já incluído o consumo excedente de combustível. Dessa forma, a qualidade da rodovia pode ser um obstáculo à operação do transporte rodoviário em algumas regiões do país.

Segundo dados da mesma pesquisa realizada pela NTC & LOGÍSTICA (2011), estima-se em 24,9% o aumento médio do custo operacional devido às condições do pavimento das rodovias brasileiras, podendo variar dependendo da região ou do tipo de administração da rodovia: gestão pública ou concedida.

A região que impõe o menor custo adicional aos transportadores é a Sudeste (21,2%), enquanto a Norte é a que oferta as piores condições de pavimento e, conseqüentemente, o maior acréscimo ao transportador (34,3%). O custo adicional médio nas rodovias concedidas é de 9,6%, e de 28,7% naquelas geridas pelo setor público, o que evidencia as dificuldades do Estado em prover a adequada infraestrutura rodoviária (CNT, 2016).

Ressalta-se ainda que o custo adicional proveniente dos defeitos no pavimento é arcado pela sociedade, pois o custo de transporte das cadeias produtivas impacta o preço final dos bens e serviços consumidos. Dessa forma, as deficiências das rodovias comprometem a competitividade dos produtos nacionais e a participação do país no comércio internacional (CNT, 2016).

Por esta razão, diante da importância do transporte rodoviário no complexo das atividades socioeconômicas, o pavimento asfáltico deve apresentar desempenho satisfatório dentro de uma perspectiva de longo prazo. Este desempenho satisfatório se traduz na oferta de condições de tráfego seguras, confortáveis e econômicas atendendo aos preceitos de otimização do custo total de transporte (DNIT, 2006b).

### *2.1.1 Solicitação e Desempenho do Pavimento*

Na engenharia rodoviária, a vida útil do pavimento é determinada pelo número equivalente de solicitações do eixo padrão, sendo que, para uma mesma carga, quanto menor o número de eixos do veículo, maior o valor equivalente em número de solicitações do eixo padrão, devido à maior concentração da carga (Bock, 2016). Por essa razão, embora existam limites de peso bruto total – PBT e peso bruto total combinado – PBTC, além dos limites relacionados à capacidade máxima de tração do veículo, o que efetivamente contribui para a degradação acelerada do pavimento é o excesso de peso por eixo (Borges, 2012).

Segundo o Manual de Estudos de Tráfego do Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR (DNIT, 2006a), a avaliação da solicitação do tráfego é importante para o processo de dimensionamento do pavimento. A avaliação da solicitação que o pavimento em análise já sofreu pelo tráfego é fundamental para o diagnóstico do pavimento existente, o dimensionamento do reforço ou a definição de outras intervenções de manutenção necessárias à pavimentação. Para tanto, é necessário definir os seguintes elementos relativos ao tráfego:

- Volume Médio Diário Anual – VMDA;
- Classificação da frota;
- Carregamento da frota;
- Fator de equivalência de carga por eixo; e
- Número equivalente N.

O cálculo do Número N é a conversão de todos os tipos de eixos e cargas dos veículos comerciais que trafegarão sobre o pavimento, em um eixo simples padrão de rodas duplas equivalente de 80 kN (*kilonewtons*). Para esse cálculo, consideram-se apenas os veículos comerciais, visto que os automóveis possuem carga de magnitude desprezível

em relação aos veículos comerciais (Departamento Nacional de Estradas e Rodagem – DNER, 2006).

Portanto, o primeiro fator refere-se ao VMDA, cuja determinação deve ser baseada em contagens volumétricas e classificatórias no trecho em análise. Desvios de tráfego significativos devem ser considerados para a definição de sub-trechos homogêneos em termos de tráfego (DNIT, 2006a), ou seja, deve-se considerar as diferenças no volume de tráfego em diferentes trechos de um segmento rodoviário.

A estimativa do tráfego futuro deve ter como ponto de partida a avaliação do tráfego atual, obtido por meio de pesquisas de campo. A sua projeção ao longo do período de projeto deverá se basear em taxas de crescimento do tráfego e no conhecimento de eventuais alterações previstas para o sistema de transporte regional. As taxas de crescimento do tráfego poderão tanto considerar as eventuais séries históricas existentes como a associação a dados socioeconômicos regionais (DNIT, 2006a).

O segundo fator a considerar é a classificação da frota. A classificação da frota é importante porque diferentes configurações de eixos e cargas produzem deflexões diferenciadas, que reduzem a vida remanescente do pavimento de diversas maneiras. A grande diversidade de efeitos gerados sobre o pavimento pelos diversos tipos de veículos rodoviários leva à necessidade de dispor de uma classificação detalhada, principalmente no que se refere aos veículos de carga. A classificação mínima útil à avaliação do tráfego compreende as seguintes subclasses: caminhão leve, caminhão médio, caminhão pesado, reboque, semirreboque e semirreboque especial (DNIT, 2006a). Os fatores de equivalência de carga por eixo são utilizados para fazer conversões das várias possibilidades de carga por eixo em números de eixo-padrão (DNER, 2006).

Os tipos de eixos, de veículos rodoviários de cargas, podem ser de dois tipos: isolado, chamado de eixo simples; e em conjunto, denominado de eixos em tandem. Tais eixos podem ser dotados de apenas uma roda na extremidade (rodagem simples) ou duas rodas (rodagem dupla). Os tipos de eixos que circulam nas rodovias brasileiras são apresentados na Figura 2.4.

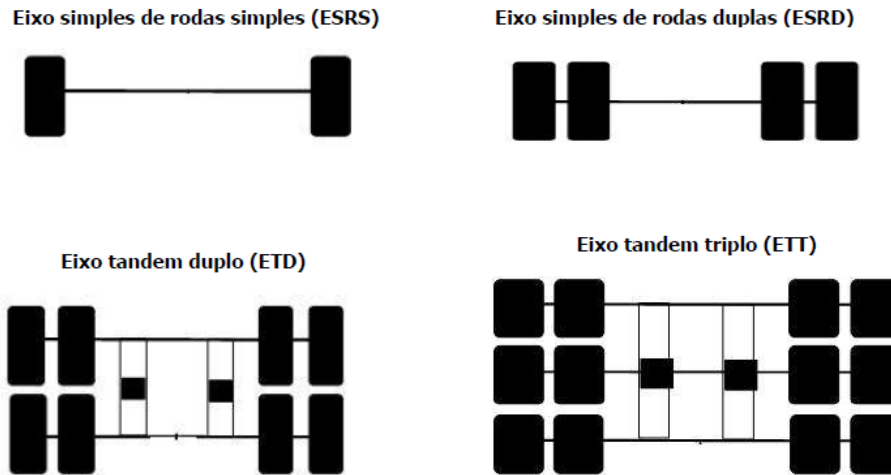


Figura 2.4 – Tipos de eixos de veículos rodoviários de carga brasileiros.  
Fonte: DNIT (2012).

Assim como a classificação, o carregamento da frota, ou pesos por eixo de cada um dos tipos de veículos de carga, é igualmente importante. Portanto, para a avaliação do efeito do tráfego sobre o pavimento é preciso conhecer as cargas por eixo com as quais os veículos de carga solicitam a estrutura. Isto deve ser feito preferencialmente por meio de pesagens no próprio trecho, ou em trecho com comportamento de tráfego similar, por meio de balanças fixas, balanças portáteis e sistemas automáticos de pesagem, que permitem pesagem contínua por longos períodos (DNIT, 2006a).

A conversão do tráfego misto em um número equivalente de operações de um eixo considerado padrão é efetuada aplicando-se o chamado Fator de Carga (FC). Este fator permite converter uma aplicação de um eixo solicitado por uma determinada carga em um número de aplicações do eixo-padrão de 8,2 toneladas que deverá produzir um efeito equivalente (DNIT, 2006a).

A determinação do FC possui duas metodologias: a da *United States Army Corps of Engineers – USACE*, e a da *American Association of State Highway and Transportation Officials – AASHTO*, nas quais é necessário conhecer as várias cargas por tipo de eixo que atuarão sobre o pavimento por meio da realização de pesquisas de pesagem na área de influência do projeto (DNER, 2006).

Os trechos experimentais da AASHTO e do USACE forneceram subsídios para o desenvolvimento de fatores de equivalência de carga por eixo. Várias seções de pavimento foram submetidas ao carregamento de veículos com diferentes tipos de eixos

e cargas e avaliados os efeitos do carregamento na perda de serventia para diversas concepções de pavimento (DNIT, 2006a).

De acordo com Pinto e Preussler (2001), os fatores de equivalência da AASHTO baseiam-se na perda de serventia e variam com o tipo do pavimento (flexível e rígido), índice de serventia terminal e resistência do pavimento. Eles são diferentes dos obtidos pelo USACE, que avaliaram os efeitos do carregamento na deformação permanente (afundamento nas trilhas de roda). As expressões para cálculo dos fatores de equivalência de carga são apresentadas no Quadro 2.1 (AASHTO) e Quadro 2.2 (USACE).

Os valores “*P*” nos Quadros 2.1 e 2.2, referem-se ao peso bruto total sobre o eixo e são determinados por pesagens de eixos em balanças fixas ou móveis, em campanhas específicas ou de forma rotineira pelos órgãos rodoviários. A partir do conhecimento dos volumes de tráfego, da classificação da frota e das cargas atuantes por eixo, deve-se definir o parâmetro de tráfego correspondente ao período de análise considerado. O Número *N*, necessário ao dimensionamento do pavimento de uma rodovia, é definido pelo número de repetições de um eixo-padrão de 8,2 t (80 kN), durante o período de vida útil do projeto, que teria o mesmo efeito que o tráfego previsto sobre a estrutura do pavimento (DNIT, 2006a).

Quadro 2.1– Fatores de equivalência de carga da AASHTO.

Tipos de eixo	Equações (P em tf)
Eixo simples de rodagem simples (ESRS)	$FC = \left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32}$
Eixo simples de rodagem dupla (ESRD)	$FC = \left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32}$
Tandem duplo de rodagem dupla (TDRD)	$FC = \left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14}$
Tandem triplo de rodagem dupla (TTRD)	$FC = \left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22}$

Fonte: DNIT (2006a).

Quadro 2.2 – Fatores de equivalência de carga da USACE.

Tipos de eixo	Faixas de cargas (t)	Equações (P em tf)
Dianteiro simples e traseiro simples	0 – 8	$FC = 2,0782 \times 10^{-4} \times P^{4,0175}$
	≥ 8	$FC = 1,8320 \times 10^{-6} \times P^{6,2542}$
Tandem duplo	0 – 11	$FC = 1,5920 \times 10^{-4} \times P^{3,472}$
	≥ 11	$FC = 1,5280 \times 10^{-6} \times P^{5,484}$
Tandem triplo	0 – 18	$FC = 8,0359 \times 10^{-5} \times P^{3,3549}$
	≥ 18	$FC = 1,3229 \times 10^{-7} \times P^{5,5789}$

Fonte: DNIT (2006a).

Na determinação do Número N são considerados fatores relacionados à composição do tráfego referentes a cada categoria de veículo, aos pesos das cargas transportadas e sua distribuição nos diversos tipos de eixos dos veículos. Seus valores anuais e acumulados durante o período de projeto são calculados com base nas projeções do tráfego. Esse conhecimento é obtido por meio das pesagens, pesquisas de origem e destino, contagens volumétricas e classificatórias, além de pesquisas de tendências da frota regional ou nacional (DNIT, 2006a).

Considerando o conceito do fator de equivalência, o número de operações do eixo-padrão, ou Número N, é calculado pela Equação 2.1 (DNER, 2006):

$$N = V_t \times FV \times FR \quad (2.1)$$

Em que:

- $V_t$ : volume total de veículos num determinado sentido para determinado período P de projeto;
- $FV$ : fator de veículo, número que converte todos os tipos de veículos em eixos padrões; e
- $FR$ : fator climático regional, relacionado ao regime de chuvas de determinado local.

O período P de projeto é o período para o qual se dimensiona o pavimento. Usualmente é adotado como 15 anos, mas pode assumir valores entre 5 e 20 anos. Conhecendo-se o volume médio diário inicial de veículos em um sentido da rodovia, e sabendo-se que este número não é constante ao longo dos anos, admitindo-se uma taxa  $t$  de crescimento anual para o fluxo de veículos, calcula-se o volume médio diário ao final do período de projeto (DNER, 2006).

Para o caso de uma estimativa de crescimento linear do tráfego anual, admite-se uma evolução em progressão aritmética, sendo o volume para o ano P,  $V_p$ , calculado de acordo com a Equação 2.2 (Marques, 2006).

$$V_p = V_0 \times (1 + P \times t) \quad (2.2)$$

Em que:

- $V_p$ : volume médio diário anual de veículos para o ano P;
- $V_0$ : volume inicial de veículos (ano-base);
- $P$ : período de projeto; e
- $t$ : taxa de crescimento do volume médio diário anual de veículos.

Então o volume médio diário  $V_m$  será calculado pela Equação 2.3 (Marques, 2006).

$$V_m = \frac{V_0 + V_p}{2} \quad (2.3)$$

Substituindo 2.2 em 2.3 tem-se a Equação 2.4 (Marques, 2006).

$$V_m = \frac{V_0 \times (2 + P \times t)}{2} \quad (2.4)$$

Por fim, o volume total ao final do período de projeto P é calculado pela Equação 2.5 (Marques, 2006).

$$V_t = 365 \times P \times V_m \quad (2.5)$$

O fator de veículo  $FV$ , produto do fator de eixo ( $FE$ ) pelo fator de carga ( $FC$ ), atua na compensação da grande diversidade de veículos e cargas que transitam pela via, transformando estas cargas e veículos diversos em uma quantidade de operações do eixo padrão que seja equivalente em termos de efeito destrutivo do pavimento. Ou seja, o fator de veículo transforma um veículo qualquer, com um carregamento qualquer, em uma quantidade de solicitações equivalente do eixo padrão de 8,2 toneladas que causaria o mesmo efeito destrutivo no pavimento, sendo calculado pela Equação 2.6 (Bettega, 2013).

$$FV = FE \times FC \quad (2.6)$$

Uma vez que o número de eixos por veículo é bastante variado, utiliza-se o fator de eixo para determinar o número médio de eixos por veículo que circula em uma determinada rodovia, pela Equação 2.7 (Bettega, 2013).

$$FE = \sum_{i=1}^n NE_i \times \%NE_i \quad (2.7)$$

Em que:

- $NE$ : número de eixos do veículo do tipo  $i$ ;
- $\%NE$ : porcentagem de veículos do tipo  $i$  em relação ao total de veículos; e
- $i$ : categoria de veículos.

Para a consideração do efeito causado pelas variações de umidade dos materiais constituintes do pavimento durante as diversas estações do ano, o que se traduz em variações da capacidade de suporte dos materiais, considera-se um coeficiente denominado fator climático regional ( $FR$ ). Na pista experimental da AASHTO,  $FR$  variou de 0,2, representando ocasiões em que prevaleceram baixos teores de umidade, a 5,0, caracterizando ocasiões em que os materiais estavam praticamente saturados. No Brasil, costuma-se adotar  $FR$  igual a 1,0, considerando os resultados de pesquisas desenvolvidas pelo DNER (DNER, 2006).

Considerando o efeito combinado dos fatores de carga e ambientais, o desempenho da superfície do pavimento é reduzido com o tempo. A equação de desempenho (decadência) do pavimento é uma descrição quantitativa desse processo, que indica a vida útil atual ou remanescente do pavimento (Sun e Liu, 1995).

Dessa forma, Sun e Liu (1995) propuseram uma equação para refletir a deterioração, ou redução do desempenho do pavimento, com base no aumento do tempo de uso ou número de solicitações do eixo padrão acumulado, como mostra a Equação 2.8.

$$ICP = ICP_0 \times (1 - e^{(-\alpha)^\beta}) \quad (2.8)$$

Em que:

- $ICP$ : índice de condição do pavimento;
- $ICP_0$ : índice de condição inicial do pavimento; e
- $\alpha$  e  $\beta$ : são coeficientes de regressão.

O significado matemático do parâmetro  $\alpha$  pode ser determinado como o número de anos de pavimento quando o ICP decai para 63,2% do valor inicial. O parâmetro  $\beta$  pode ser chamado de parâmetro de forma. Quando  $\beta$  é muito pequeno ( $<0,2$ ), significa que os danos iniciais na rodovia ocorrem de forma acelerada e, quando o valor é muito grande, o decréscimo do desempenho da rodovia é lento. Com base na experiência de análise e



engenharia dos dados medidos em 5 províncias chinesas, o valor de  $\alpha$  geralmente está entre 3 e 15, e  $\beta$  geralmente está entre 0,2 e 1,8 (Sun e Liu, 1995).

### 2.1.2 Operações de Manutenção

Segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do IPR (DNIT, 2006b), o desempenho do pavimento pode ser do tipo estrutural ou funcional. O desempenho estrutural refere-se à capacidade de um pavimento em manter sua integridade estrutural, sem apresentar falhas significativas. Já o desempenho funcional refere-se à capacidade do pavimento de satisfazer sua função principal, que é a de fornecer uma superfície com serventia adequada em termos de qualidade de rolamento.

A capacidade que um pavimento tem de proporcionar um determinado nível de desempenho é intitulada de “Serventia do Pavimento” que pode ser avaliada de forma subjetiva ou objetiva. A avaliação subjetiva da Serventia envolve a participação de um grupo de indivíduos identificados com a rodovia e que são previamente orientados de acordo com a Norma DNIT 009/2003-PRO (DNIT, 2003).

A avaliação objetiva da Serventia é calculada analiticamente, com base em vários parâmetros representativos das condições de superfície do pavimento, existindo, em correspondência com tais parâmetros, uma grande variedade de índices (DNIT, 2006b). Entre os vários índices existentes, o mais frequentemente utilizado pelo DNIT no âmbito de avaliação das rodovias brasileiras é o Índice de Irregularidade de Superfície (IRI, do inglês *International Roughness Index*).

No entanto, a característica do pavimento que mais afeta a avaliação dos usuários é a irregularidade longitudinal, diretamente relacionada ao conforto, segurança dos usuários da rodovia e aos custos operacionais dos veículos (Soncim *et al.*, 2013).

A irregularidade longitudinal de um pavimento é definida pela Norma DNER - PRO 164/94 como “o desvio da superfície da rodovia em relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade ao rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via” (DNER, 1994). Ela é a grandeza física mensurável, direta ou indiretamente, na superfície do pavimento, que melhor se correlaciona com o custo operacional dos veículos, o conforto, a segurança, a velocidade e a economia das viagens. A escala-

padrão de irregularidade adotada pela referida norma é o “quociente de irregularidade”, QI, expresso em contagens/Km (DNER, 1986).

A Irregularidade do Perfil Longitudinal de um Pavimento apresenta as seguintes principais particularidades:

- A partir de um valor inicial, a Irregularidade passa a assumir valores crescentes, como decorrência da ação do tráfego, do clima e de outros fatores;
- A Irregularidade influencia na interação da superfície da via com os veículos, gerando efeitos sobre os próprios veículos, sobre os passageiros e motoristas, e sobre as cargas transportadas. Tais efeitos dependem também, além da Irregularidade, de fatores vinculados à suspensão dos veículos e à sensibilidade dos passageiros e das cargas;
- A Irregularidade aumenta a ação das cargas dinâmicas dos veículos sobre a superfície do pavimento e, em decorrência, acelera a deterioração de sua estrutura. Ela provoca ainda efeitos adversos sobre a drenagem da superfície do pavimento, na medida em que contribui para a formação de poças d'água que vão afetar negativamente a segurança e o desempenho da rodovia; e
- A Irregularidade afeta a dinâmica dos veículos em movimento, aumentando o seu desgaste e acarreta, também, prejuízos à condução dos veículos. Em consequência, a Irregularidade tem grande influência sobre o custo operacional dos veículos.

Esses aspectos são determinantes para a escolha da Irregularidade como parâmetro básico e referencial para atividades de planejamento, programação e elaboração de projetos referentes à manutenção dos pavimentos (DNIT, 2006b).

O pavimento, por questões de ordem técnico-econômica, é dimensionado para atender a ciclos de vida de média duração. No entanto, durante o período de uso das vias, a degradação dos pavimentos ocorre devido ao volume de tráfego e ao número de veículos que operam com cargas acima dos limites estabelecidos legalmente, o que resulta na necessidade de submeter o pavimento a um contínuo e adequado processo de manutenção (Pires *et al.*, 2016).

A manutenção rodoviária envolve a execução de conjuntos de intervenções diversas de acordo com a Norma TER-02/79 (DNER, 1979), a saber:

- A Conservação Rodoviária (em suas três modalidades: Corretiva Rotineira, Preventiva Periódica e de Emergência);
- O Melhoramento (desdobrado em dois grupos: Complementação e Modificação) dos sistemas de proteção da infraestrutura e/ou drenagem e/ou dispositivos de segurança e obras complementares;
- Recuperação do Pavimento por meio de sua restauração; e
- Recuperação do Pavimento por meio de sua reabilitação.

Para que o pavimento apresente o desempenho previsível é necessário que seja continuamente contemplado com adequadas intervenções de caráter corretivo e preventivo. Ao final do ciclo de vida (IRI aproximadamente entre 3,5 e 4,0) o pavimento passa a apresentar um desempenho próximo de sua condição limite permissível, devendo-se projetar e executar o novo dimensionamento do pavimento para se atender a um novo ciclo de vida (DNIT, 2006b).

O procedimento, nesse caso, é intitulado de Restauração do Pavimento e, ao longo do trecho correspondente e em função do grau de deterioração apresentado, se distribuirá em duas modalidades de intervenções básicas, a saber: o Recapeamento do Pavimento ou a Reconstrução (Total ou Parcial) do Pavimento (DNIT, 2006b).

A velocidade da deterioração pode variar enormemente, em função de diversos fatores, tais como: as condições ambientais, a capacidade de suporte do pavimento e do subleito, a qualidade dos materiais utilizados e do processo construtivo, o volume de tráfego e a carga por eixo (DNIT, 2006b).

A Tabela 2.1 apresenta os níveis de conceitos atribuíveis e relativos às condições de superfície do pavimento em função da Avaliação Subjetiva e as correspondentes faixas de valores pertinentes aos principais Índices/Parâmetros utilizados na Avaliação Objetiva.

No Brasil, as Normas pertinentes recomendam que seja ordinariamente adotado, em especial para rodovias com acentuado volume de tráfego, o valor  $IRI \geq 3,5$ , como

“gatilho” para a deflagração da Restauração do pavimento (DNIT, 2006b), cujo valor corresponde ao conceito “Ruim” da Avaliação Subjetiva.

Tabela 2.1 – Condições de superfície do pavimento.

Conceito	Irregularidade	
	QI (cont./Km)	IRI (m/Km)
Excelente	13-25	1-1,9
Bom	25-35	1,9-2,7
Regular	35-45	2,7-3,5
Ruim	45-60	3,5-4,6
Péssimo	> 60	> 4,6

Fonte: DNIT (2006b).

No entanto, com a implementação dos Sistemas de Gerência de Pavimento e dos modelos de análise técnico-econômica, como o HDM-4 do Banco Mundial, pode-se abordar o problema da definição de gatilhos para intervenções de restauração por meio da minimização do custo total de transporte ou dos custos de conservação (DNIT, 2006b).

A abordagem do custo total leva em consideração também o custo dos usuários e pode ser considerada a mais interessante do ponto de vista da sociedade como um todo. A minimização dos custos de conservação é o tipo de abordagem relacionada com a ótica dos órgãos rodoviários. Em ambos os casos, os gatilhos obtidos são extremamente dependentes do volume de tráfego, do nível de restauração do pavimento existente e dos recursos disponíveis (DNIT, 2006b).

## 2.2 Impacto do Excesso de Peso sobre Acidentes Rodoviários

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2015), o trânsito representa uma das principais causas de morte em todo o mundo, vitimando cerca de 1,25 milhão de pessoas por ano. Os países de baixa renda apresentam taxas de vítimas fatais duas vezes superiores às dos países de alta renda, havendo um número de mortes desproporcional, relativamente ao nível de motorização desses países: 90% das mortes por lesões ocorrem nos países de baixa e média renda, que detém apenas 54% dos veículos de todo o mundo, como mostra a Figura 2.5.

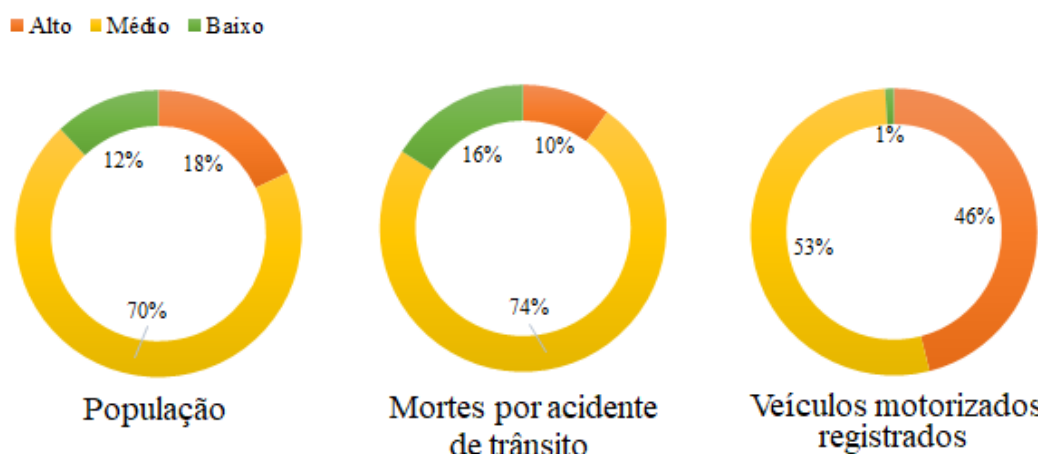


Figura 2.5 – População, mortes por lesões e veículos motorizados por renda dos países.  
Fonte: OMS (2015).

O relatório da OMS (2015) ainda aponta que a mudança na legislação sobre segurança viária melhora o comportamento dos usuários e reduz as colisões, lesões e mortes no trânsito, especialmente as leis relacionadas com os principais fatores de risco, como excesso de velocidade, por exemplo.

No Brasil, a baixa qualidade das rodovias também tem reflexos na segurança viária, pois as imperfeições no pavimento, os problemas de sinalização, a existência de curvas perigosas sem dispositivos de segurança necessários, entre outros, são fatores que dificultam a condução de veículos e elevam os riscos de acidentes. Em 2015 foram registrados 121.438 acidentes em rodovias federais policiadas, que geraram prejuízos para a sociedade, mas que muitas vezes não são percebidos ou considerados quando são definidas as ações prioritárias de intervenções em rodovias (CNT, 2016).

A malha de rodovias federais do Brasil sob a fiscalização da Polícia Rodoviária Federal – PRF é de aproximadamente 71 mil quilômetros. Além da fiscalização, também é responsável pelo registro de todos os acidentes que ocorrem na malha federal, classificados da seguinte maneira (IPEA, 2015):

- acidentes com vítimas fatais: acidentes em que há pelo menos uma morte;
- acidentes com vítimas feridas: acidentes em que há pelo menos um ferido, mas sem mortes; e
- acidentes sem vítimas: acidentes em que todos os envolvidos saíram ilesos.

Para mensurar o custo desses acidentes para a sociedade, o IPEA em conjunto com a Associação Nacional de Transportes Públicos – ANTP e o Departamento Nacional de

Trânsito – Denatran, desenvolveu uma metodologia que estimou os custos da perda de vidas, dos danos materiais dos veículos e da perda de cargas. A CNT (2016) atualizou o estudo, com base no número de acidentes registrados em 2015 e na inflação do período, e o resultado foi um prejuízo de R\$ 11,15 bilhões, como mostra a Tabela 2.2. Desse total, quando se consideram somente os acidentes com vítimas fatais, evidencia-se uma perda de R\$ 4,03 bilhões.

Tabela 2.2 – Custo total e médio por gravidade de acidente.

<b>Gravidade do Acidente</b>	<b>Quantidade de Acidentes</b>	<b>Custo médio (R\$/ocorrência)</b>	<b>Custo total (R\$ bilhão)</b>
Com fatalidade	5.622	715.772,55	4,03
Com vítimas	56.154	99.805,21	5,60
Sem vítimas	59.662	25.523,79	1,52

Fonte: CNT (2016).

Comparando o percentual das rodovias fiscalizadas pela PRF por estado em relação ao total de rodovias federais do país e os percentuais de acidentes e mortes em relação ao total brasileiro, observa-se que os estados do Espírito Santo, de Minas Gerais, do Paraná, do Rio de Janeiro, de Santa Catarina e de São Paulo apresentam os maiores problemas em relação à ocorrência de acidentes de trânsito (IPEA, 2015). A proporção de acidentes e mortes nesses estados é muito maior do que a proporção de rodovias que possuem, indicando uma concentração desses eventos nesses estados.

De acordo com análise do IPEA (2015), dos vinte trechos de 10 km mais críticos em acidentes graves, em apenas 0,27% da malha fiscalizada ocorreram 6,74% dos acidentes, 1,85% das mortes e 5,45% dos acidentes graves. Destaca-se, negativamente, a BR-101 nos trechos localizados principalmente no estado do Espírito Santo, que ocupou quatro posições (1<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 19<sup>a</sup>) no *ranking* em 2014, conforme Tabela 2.3.

Em 2014 foram registrados 56.408 acidentes envolvendo veículos do tipo caminhão, caminhão-tanque e caminhão-tractor nas rodovias federais brasileiras, o que corresponde a aproximadamente 30% dos acidentes, ocasionando 43% das mortes. O tipo de acidente envolvendo caminhões que causa mais mortes é a colisão frontal, representando 43,7% do total de vítimas fatais (IPEA, 2015).

Esse aspecto pode ser explicado por uma combinação de fatores. As características físicas e geométricas das rodovias federais, das quais 88,4% são de pista simples, conforme apontado pela CNT (2016), fazem com que os veículos de carga, com

velocidades reduzidas, afetem o nível de serviço e o desempenho das rodovias, influenciando o comportamento de motoristas que tentam realizar ultrapassagens de alto risco, em locais não permitidos, ocasionando os acidentes por colisão frontal.

Tabela 2.3 – *Ranking* dos trechos mais críticos de acordo com o número de acidentes graves (2014).

Posição	UF	Município	BR	Trecho	Acidentes	Mortos	Acidentes graves <sup>1</sup>
1 <sup>a</sup>	ES	Serra	101	260-270	877	11	126
2 <sup>a</sup>	SC	São José	101	200-210	1.502	6	125
3 <sup>a</sup>	CE	Caucaia	222	0-10	333	11	102
4 <sup>a</sup>	ES	Linhares	101	140-150	581	10	87
5 <sup>a</sup>	ES	Cariacica	262	0-10	883	4	82
6 <sup>a</sup>	PA	Ananindeua	316	0-10	922	7	74
7 <sup>a</sup>	PR	Maringá	376	170-180	488	8	72
8 <sup>a</sup>	SC	Palhoça	101	210-220	822	9	71
9 <sup>a</sup>	PI	Teresina	316	0-10	473	7	66
10 <sup>a</sup>	PB	João Pessoa	230	20-30	552	9	63
11 <sup>a</sup>	MG	Betim	381	490-500	515	5	62
12 <sup>a</sup>	MA	São Luís	135	0-10	313	8	55
13 <sup>a</sup>	MA	Imperatriz	10	250-260	240	8	52
14 <sup>a</sup>	PE	Recife	101	60-70	681	13	51
15 <sup>a</sup>	PI	Teresina	343	340-350	511	5	51
16 <sup>a</sup>	CE	Fortaleza	116	0-10	599	15	48
17 <sup>a</sup>	MG	Contagem	40	520-530	367	6	47
18 <sup>a</sup>	CE	Fortaleza	222	0-10	220	0	46
19 <sup>a</sup>	ES	São Mateus	101	60-70	198	5	46
20 <sup>a</sup>	SC	Biguaçu	101	190-200	311	5	46
Total dos vinte trechos mais críticos (0,27% do total)				200 Km	11.388	152	1.372

Nota: <sup>1</sup>Acidentes com ao menos um ferido grave ou uma morte.

Fonte: IPEA (2015).

Em especial, uma série de questões de segurança específicas para caminhões foram identificadas no Brasil como: fadiga do motorista por excesso de horas de serviço; consumo de álcool e uso de drogas; falta de treinamento do motorista, principalmente para o transporte de cargas específicas; rolamento de caminhão pesado; condições mecânicas do veículo; e problemas relacionados ao excesso de peso (Blower e Woodrooffe, 2012).

A sobrecarga foi identificada como a principal causa de acidentes envolvendo caminhões no Brasil. O peso excessivo do veículo está associado a falhas mecânicas dos caminhões e perda de controle da direção, mas, apesar das legislações sobre tamanho e peso dos veículos, cerca de 60% dos caminhões em acidentes estão sobrecarregados e 20% dos veículos de carga que passam por postos de pesagem estão com excesso de carga (Blower e Woodrooffe, 2012).

### 2.3 Regulamentação Brasileira sobre Peso de Veículos de Carga

As operações de transporte por veículos pesados no Brasil experimentam um nível relativamente alto de tolerância em comparação com outros países como Austrália e Estados Unidos. Enquanto algumas categorias veiculares podem trafegar com até 163.000 lbs (74 toneladas) no Brasil, o limite de peso em rodovias interestaduais americanas é de 80.000 lbs (Blower e Woodrooffe, 2012), ou seja, menos da metade permitido pela legislação brasileira.

Na China, as regulamentações que regem o peso dos caminhões, ônibus e reboques nas rodovias têm importantes consequências econômicas, tendo em vista que o peso dos caminhões influencia diretamente os custos de transporte, os custos de construção e manutenção das rodovias, além da conveniência e a segurança das viagens rodoviárias (Hang e Li, 2010).

Na verdade, Tengbe (2001) afirma que a regulamentação responsável deve ser um processo dinâmico: a autoridade reguladora deve fazer a melhor análise prévia possível, mas uma vez que os regulamentos foram alterados, as consequências devem ser sistematicamente observadas e ajustes feitos sempre que necessário.

No Brasil, a legislação sobre o assunto consiste em um conjunto de artigos extraídos da Lei nº 9.503/1997, que institui o Código de Trânsito Brasileiro – CTB (Brasil, 1997) e de Resoluções do Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN que influem diretamente nas limitações das dimensões e pesos dos veículos nas estradas brasileiras. Do CTB merecem destaque os seguintes artigos:

**Art. 99.** Somente poderá transitar pelas vias terrestres o veículo cujo peso e dimensões atenderem aos limites estabelecidos pelo CONTRAN.

§ 1º O excesso de peso será aferido por equipamento de pesagem ou pela verificação de documento fiscal, na forma estabelecida pelo CONTRAN.

§ 2º Será tolerado um percentual sobre os limites de peso bruto total e peso bruto transmitido por eixo de veículos à superfície das vias, quando aferido por equipamento, na forma estabelecida pelo CONTRAN.



**Art. 101.** Ao veículo ou combinação de veículos utilizado no transporte de carga indivisível, que não se enquadre nos limites de peso e dimensões estabelecidos pelo CONTRAN, poderá ser concedida, pela autoridade com circunscrição sobre a via, autorização especial de trânsito, com prazo certo, válida para cada viagem, atendidas as medidas de segurança consideradas necessárias.

**Art. 231.** Transitar com o veículo:

[...] V - com excesso de peso, admitido percentual de tolerância quando aferido por equipamento, na forma a ser estabelecida pelo CONTRAN:

- a) Infração - média;
- b) Penalidade - multa acrescida a cada duzentos quilogramas ou fração de excesso de peso apurado;
- c) Medida administrativa - retenção do veículo e transbordo da carga excedente.

[...] X - excedendo a capacidade máxima de tração:

- a) Infração - de média a gravíssima, a depender da relação entre o excesso de peso apurado e a capacidade máxima de tração, a ser regulamentada pelo CONTRAN;
- b) Penalidade - multa;
- c) Medida Administrativa - retenção do veículo e transbordo de carga excedente.

**Art. 257.** As penalidades serão impostas ao condutor, ao proprietário do veículo, ao embarcador e ao transportador, salvo os casos de descumprimento de obrigações e deveres impostos a pessoas físicas ou jurídicas expressamente mencionados neste Código.

[...] § 4º O embarcador é responsável pela infração relativa ao transporte de carga com excesso de peso nos eixos ou no peso bruto total, quando simultaneamente for o único remetente da carga e o peso declarado na nota fiscal, fatura ou manifesto for inferior àquele aferido.

§ 5º O transportador é o responsável pela infração relativa ao transporte de carga com excesso de peso nos eixos ou quando a carga proveniente de mais de um embarcador ultrapassar o peso bruto total.

§ 6º O transportador e o embarcador são solidariamente responsáveis pela infração relativa ao excesso de peso bruto total, se o peso declarado na nota fiscal, fatura ou manifesto for superior ao limite legal.

Ainda no âmbito da legislação federal sobre o tema, a Lei nº 10.233/01 (Brasil, 2001) atribui à ANTT, por meio do inciso XVII do art. 24, e ao DNIT, no § 3º do art. 82 – ambos acrescidos pela Lei nº 10.561/02 (Brasil, 2002) – a competência para exercer, diretamente ou mediante convênio, as competências expressas no inciso VIII do art. 21 do CTB, nas rodovias federais por eles administrados.

Verifica-se, portanto, que a competência para a fiscalização do excesso de peso em rodovias federais cabe ao DNIT, com exceção daquelas rodovias objeto de concessão administradas pela ANTT, onde tal competência é da citada Agência.

Conforme definido no CTB, todos os veículos devem atender às normas estabelecidas pelo CONTRAN referentes a peso e dimensões máximas para poderem circular pelas vias terrestres. As principais resoluções atualmente em vigor sobre a matéria são as Resoluções nº 210/06 e nº 211/06 (CONTRAN, 2006a; CONTRAN, 2006b), e a Resolução nº 258/07 (CONTRAN, 2007).

A Resolução CONTRAN 210/06 (CONTRAN, 2006a) e a Portaria nº 63/09 do Denatran (Denatran, 2009), conhecidas como “Lei da Balança”, estabelecem os limites de peso e dimensões para veículos e, a partir disso, têm homologado os diferentes veículos e combinações de veículos utilizados no transporte de cargas no Brasil.

A Resolução CONTRAN 210/06 trata especificamente no Artigo 2º sobre os limites de peso bruto total e peso por eixo, considerando as diferentes configurações de eixos dos veículos de cargas. Os pesos máximos por eixo, conforme a citada Resolução, são apresentados no Quadro 2.3.

A Resolução nº 211/06 (CONTRAN, 2006b) trata especificamente dos requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC, com mais de duas unidades, incluída a unidade tratora, com peso bruto total acima de 57 toneladas ou

com comprimento total acima de 19,80m. Tais veículos só poderão circular portando Autorização Especial de Trânsito – AET, mediante atendimento dos requisitos estabelecidos por esta Resolução.

Quadro 2.3 – Limite de carga e tolerância por tipo de eixo.

Eixo	Rodagem	Suspensão	Entre-eixos (m)	Carga (Kg)	Tolerância (10%)
Isolado	Simple	Direcional	-	6.000	6.600
Isolado	Dupla	-	-	10.000	11.000
Duplo	Simple	Direcional	-	12.000	13.200
Duplo	Dupla	Tandem	> 1,20 ou ≤ 2,4	17.000	18.700
Duplo	Dupla	Não em tandem	> 1,20 ou ≤ 2,4	15.000	16.500
Duplo	Simple + dupla	Especial	< 1,2	9.000	9.900
Duplo	Simple + dupla	Especial	> 1,20 ou ≤ 2,4	13.500	14.850
Duplo	Extralarga	Pneumática	> 1,20 ou ≤ 2,4	17.000	18.700
Tripo	Dupla	Tandem	> 1,20 ou ≤ 2,4	25.500	28.050
Tripo	Extralarga	Pneumática	> 1,20 ou ≤ 2,4	25.500	28.050

Fonte: CONTRAN (2006a) e CONTRAN (2007).

Por fim, a Resolução nº 258/07 (CONTRAN, 2007) fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. Destacam-se os seguintes Artigos:

**Art. 4.** A fiscalização de peso dos veículos deve ser feita por equipamento de pesagem (balança rodoviária) ou, na impossibilidade, pela verificação de documento fiscal.

**Art. 5.** Na fiscalização de peso dos veículos por balança rodoviária serão admitidas as seguintes tolerâncias – alterado pelo Art. 4º da Resolução nº 526/15 (CONTRAN, 2015):

I – 5% (cinco por cento) sobre os limites de pesos regulamentares para o peso bruto total (PBT) e peso bruto total combinado (PBTC);

II – 10% (dez por cento) sobre os limites de peso regulamentares por eixo de veículos transmitidos à superfície das vias públicas.

Parágrafo único. No carregamento dos veículos, a tolerância máxima prevista neste artigo não deve ser incorporada aos limites de peso previstos em regulamentação fixada pelo CONTRAN.

**Art. 11.** A fiscalização dos limites de peso dos veículos, por meio do peso declarado na Nota Fiscal, Conhecimento ou Manifesto de carga poderá ser

feita em qualquer tempo ou local, não sendo admitido qualquer tolerância sobre o peso declarado.

Para o transporte de blocos e chapas serradas de rochas ornamentais, existe regulamentação específica, por meio da Resolução nº 354/10 (CONTRAN, 2010), que estabelece requisitos de segurança, destacando-se os seguintes artigos:

**Art. 3º** As combinações de veículos de carga com mais de 54,5 t (PBTC máximo para composição de veículo de carga dotado de articulação única) utilizadas no transporte de um único bloco de rocha ornamental, devem ser obrigatoriamente do tipo caminhão trator 6x2 ou 6x4, um semirreboque dianteiro para distribuição do peso (*dolly*) e um semirreboque traseiro destinado ao carregamento de cargas indivisíveis de até 6 m, (conforme apresentado na Figura 2.6).

**Art. 8º** Não é permitido o uso de veículos de carga combinados com PBT superior a 57 toneladas no transporte de blocos ou chapas serradas de rochas ornamentais, salvo o estabelecido no § 2º do art. 10, a saber:

**Art. 10.** [...] § 2º O transporte de chapas serradas em contêineres poderá ser realizado em combinações de veículos de carga de 9 eixos e 74 toneladas, atendidos os requisitos da Resolução nº 211/06, do CONTRAN.

**Art. 12.** O condutor de veículo ou combinação de veículos que transporta blocos de rochas ornamentais ou chapas serradas deve ser aprovado e certificado em curso específico na forma que dispõe a Resolução nº 168/2004 do CONTRAN.

Pode-se notar que a legislação brasileira sobre o tema é abrangente, principalmente sobre a imposição dos limites de peso e dimensões dos veículos para o transporte de cargas. No entanto, verificou-se que a regulamentação tem sido cada vez mais tolerante em relação ao peso transmitido por eixo. A Resolução CONTRAN nº 104/99 (CONTRAN, 1999), estabelecia a tolerância de 7,5% no peso transmitido por eixo. Já a Resolução nº 526/15 (CONTRAN, 2015), atualmente em vigor, admite a tolerância de 10%. Albano (2004) ressaltou que esses 2,5% a mais na tolerância sobre a carga por eixo é responsável por uma redução de 10 a 15% na vida prevista do pavimento.

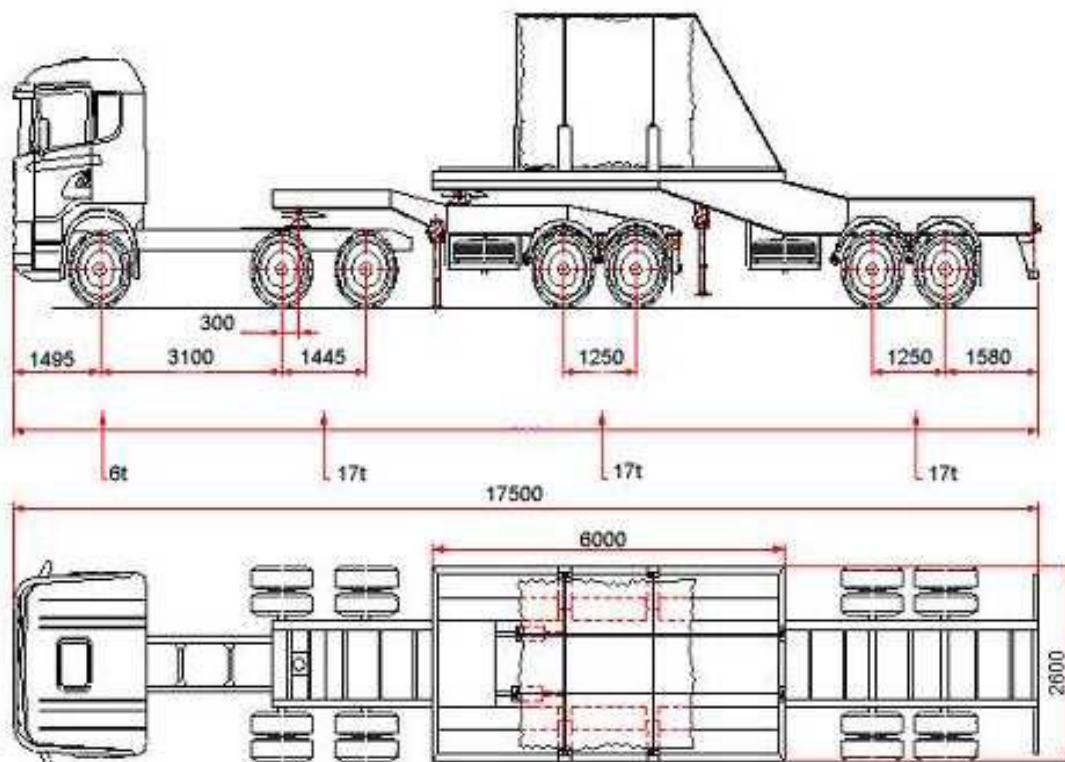


Figura 2.6 – Configuração do veículo para transporte de rochas ornamentais  
 Fonte: Resolução n° 354/2010 (CONTRAN, 2010).

Apesar da maior tolerância atualmente em vigor, as infrações por excesso de peso ainda são frequentes e a fiscalização possui um importante papel nesse cenário. Entretanto, não se pode afirmar que existam, em todas as esferas governamentais, equipamentos, infraestrutura e pessoal qualificado suficientes, ou mesmo vontade política bastante, para a consecução das medidas cabíveis (Borges, 2012). Este é o caso, por exemplo, das balanças fixas de pesagem presentes na BR-101 do estado do Espírito Santo, que operam apenas mediante programação e disponibilidade de fiscais do órgão responsável no estado.

Contudo, acredita-se que a ação fiscalizadora não é suficiente para sanar a prática do excesso de peso pelas empresas transportadoras. A não obrigação por parte dos embarcadores em declarar o peso na nota fiscal ao embarcar a mercadoria, por exemplo, direciona a penalidade para o transportador. Outro problema é a vantagem econômica em relação aos valores das multas aplicadas sobre o percentual do excesso de peso, pois a depender do valor da mercadoria em trânsito, torna-se economicamente vantajoso, para as empresas envolvidas, o transporte do excesso de peso frente ao risco de uma possível ação fiscalizadora.

Segundo Derani (2008), cada vez mais as empresas produzem externalidades negativas recebidas pela sociedade, enquanto o lucro fica retido na organização, havendo assim uma privatização de lucros e socialização de perdas. A prática do excesso de peso por eixo pode aumentar a produtividade e os lucros da indústria de transporte, mas por outro lado gera ônus para a sociedade, como a rápida deterioração dos pavimentos, aumento de gastos na manutenção viária (arcado pelo aumento de impostos ou tarifas de pedágio), além da insegurança nas viagens, causada pelo aumento no índice de acidentes e pelos perigos de uma via danificada pelo excesso de peso.

Na verdade, os próprios infratores, visando ganhos imediatos no frete, ignoram os prejuízos ocasionados pelo maior risco de acidentes, depreciação acelerada do veículo, eventuais multas aplicadas pelos agentes de fiscalização, transbordo ou remanejamento da carga em excesso, o que ocasiona perda de tempo, atraso na entrega da mercadoria e despesas adicionais para a atividade transportadora.

### 3 DINÂMICA DE SISTEMAS

Fundada em 1957 por Jay Wright Forrester, no *Massachusetts Institute of Technology* – MIT, Cambridge, EUA, como uma extensão da teoria de controle e cibernética para as áreas de gestão (Forrester, 1961), a Dinâmica de Sistemas (DS) é dedicada ao estudo de sistemas complexos, caracterizados por uma dinâmica não linear, *loops* de causalidade e atrasos de tempo (Sterman, 2000).

A DS estuda a mudança no comportamento do sistema ao longo do tempo, baseando-se em conceitos fundamentais, como sistema, dinâmica, estruturas e comportamento, de forma a permitir a avaliação das consequências das decisões tomadas (Li e Taylor, 2014; Yuliawati *et al.*, 2015; Alasad e Motawa, 2016). Um sistema é um conjunto de elementos que interagem continuamente ao longo do tempo. O termo dinâmico se refere a sistemas cujas variáveis estão em constante mudança. As relações e conexões entre os componentes são chamadas de estruturas do sistema e as formas como esses componentes variam, denominam o comportamento do sistema. Por definição, a estrutura de um sistema determina o seu comportamento (Martin, 1997).

A partir do conceito de sistemas, pode-se afirmar que sistema é um conjunto de componentes inter-relacionados e organizados que trabalham para atingir determinado objetivo. A representação dos sistemas pode ser na forma de um modelo visual (diagrama), verbal (narrativas orais ou escritas), matemático (fórmulas) e computacional (modelo criado em computadores). Modelos para simulação combinam essas formas de representação, de modo que possam ser simuladas no sentido de compreender seu comportamento e várias outras necessidades (Chaim, 2011).

Segundo Fernandes (2003), em DS é possível representar um sistema por meio de duas abordagens: a *soft* – ou qualitativa – e a *hard* – ou quantitativa. A modelagem *soft* permite um maior entendimento a respeito das inter-relações do sistema, enquanto a *hard* se presta a simulações. As duas abordagens são realizadas em conjunto para a representação de um modelo que seja próximo à realidade da dinâmica do sistema.

Desta forma, o processo de modelagem consiste em uma série de etapas por meio das quais, após adequada análise e estudo, constrói-se o modelo que representa a realidade

do problema. De maneira geral, Forrester (1961) distingue as seguintes fases do processo de modelagem:

- Definição do problema: o problema deve ser claramente definido e a viabilidade em descrevê-lo em linguagem sistêmica deve ser identificada;
- Conceitualização: definem-se os diferentes elementos que fazem parte do sistema, bem como as influências exercidas entre si, resultando no diagrama de causa e efeito;
- Formalização: O diagrama Forrester (diagrama de estoque e fluxo) é criado, juntamente com as equações do modelo, com as quais é obtido um sistema a ser simulado por computador;
- Desempenho: O modelo é simulado para determinar se seu comportamento é adequado;
- Avaliação: As simulações de cenários e análises são realizadas para avaliar a confiabilidade e a qualidade do modelo; e
- Exploração: Analisam-se políticas alternativas que possam ser aplicadas ao sistema em estudo.

A Figura 3.1 mostra o procedimento metodológico composto pelas análises qualitativa e quantitativa. A fase qualitativa inicia-se pela identificação do sistema, suas fronteiras e interfaces, limita-se o sistema e o objetivo do estudo, bem como as variáveis de entrada e saída do modelo. A partir de então, o modelo conceitual é construído por meio do diagrama de causa e efeito, que representa a relação causal entre as variáveis identificadas (Naim e Towill, 1994; Georgiadis e Vlachos, 2004; Maani e Cavana, 2004).

### **3.1 Estrutura do Diagrama de Causa e Efeito**

Os elementos básicos do diagrama de causa e efeito são variáveis relacionadas por meio de setas de sinal negativo ou positivo. Considerando as variáveis X e Y,

Se a relação é proporcional, “quando X aumenta, Y aumenta” ou “quando X diminui, Y diminui”, a flecha tem sinal positivo [...]. Se a relação é inversamente proporcional, “quando X aumenta, Y diminui” ou “quando X diminui, Y aumenta”, a flecha tem sinal negativo (Alvez, 2008, p. 24).



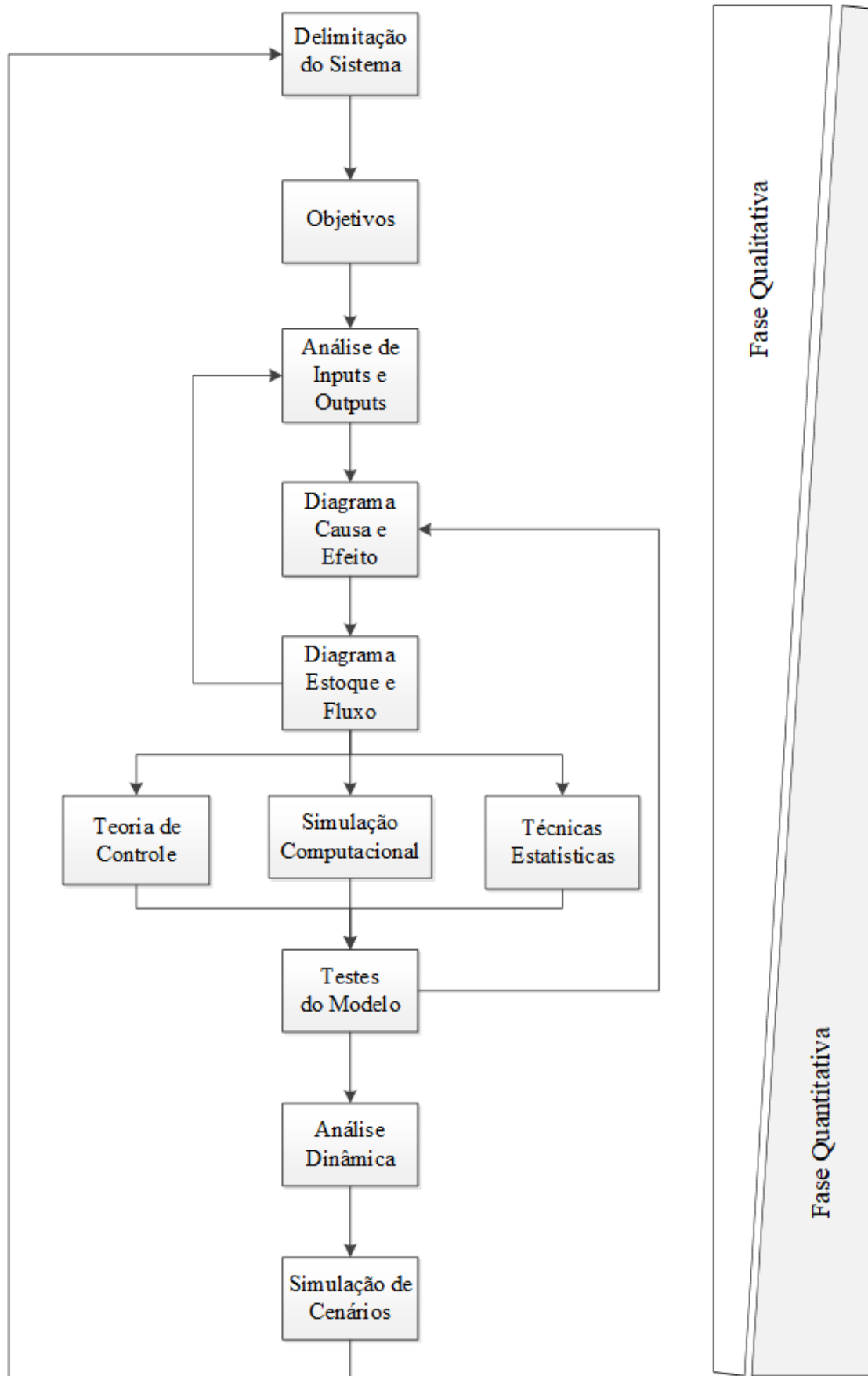


Figura 3.1 – Procedimento metodológico da Dinâmica de Sistemas.

Fonte: Adaptado de Naim e Towill (1994).

Além das variáveis relacionadas por meio de setas, esses diagramas são caracterizados por laços de realimentação de polaridade positiva ou negativa, representada por ciclos no sentido horário ou anti-horário com sinais (+) ou (-) (Forrester, 1993). “Um laço de realimentação é uma sucessão de causas e efeitos tais que, uma mudança em uma dada variável viaja pelo laço e retorna a afetar a mesma variável” (Georgiadis e Vlachos, 2004, p. 454). Para exemplificar, consideram-se as variáveis: demanda de transporte, oferta de transporte e congestionamento, demonstradas na Figura 3.2.

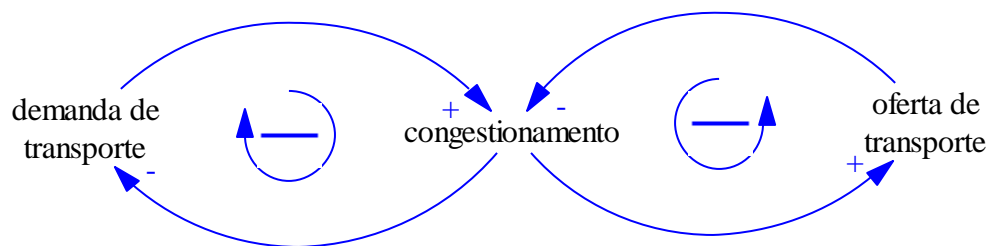


Figura 3.2 – Diagrama de causa e efeito para a dinâmica da demanda e oferta de transporte e congestionamento.

Fonte: Elaboração própria

A relação causal entre a demanda por transporte e o congestionamento é positiva, ou seja, quanto maior a demanda, maior será o congestionamento que, por sua vez, diminui a atratividade e a demanda pelo transporte. Essa relação é representada por um laço de realimentação negativo, indicando o equilíbrio do sistema. Por outro lado, quanto maior o congestionamento, maior será a oferta de transporte que, por sua vez, diminui o congestionamento. Sendo essa uma relação inversamente proporcional entre as variáveis, é representada por um laço de realimentação negativo, mantendo o equilíbrio do sistema.

Segundo Georgiadis e Vlachos (2004), se um aumento na variável inicial provoca um aumento final na mesma variável, então o laço de realimentação é considerado positivo, levando a um crescimento exponencial instável e a um colapso no comportamento do sistema. Ao contrário, se um aumento em uma dada variável inicial afeta o laço de modo a diminuir o valor dessa mesma variável, então o laço de realimentação é identificado como negativo, o qual estabiliza o comportamento do sistema, mantendo-o em equilíbrio (Georgiadis e Vlachos, 2004). De acordo com Sterman (2000), esse método de determinação da polaridade do laço funciona independentemente do número de variáveis existentes no laço e de qual seja a variável inicial do efeito, levando ao mesmo resultado.

Segundo Senge (1990), as estruturas influenciam o comportamento do sistema e são chamadas de inter-relações. As inter-relações descritas nas estruturas de retroalimentação podem gerar três tipos de comportamento para o sistema: crescimento exponencial; auto regulação e oscilação (Alvez, 2008).

O primeiro comportamento é o crescimento exponencial, que de acordo com Sterman (2000), é gerado a partir de um ciclo de retroalimentação positivo, ou seja, o sistema tende a realimentar o seu comportamento, como por exemplo, o crescimento de um montante aplicado na poupança a juros compostos. Conforme a Figura 3.3, o ciclo causal descreve um comportamento positivo entre ambas as variáveis, em que uma alimenta a outra, gerando um crescimento exponencial ao longo do tempo.

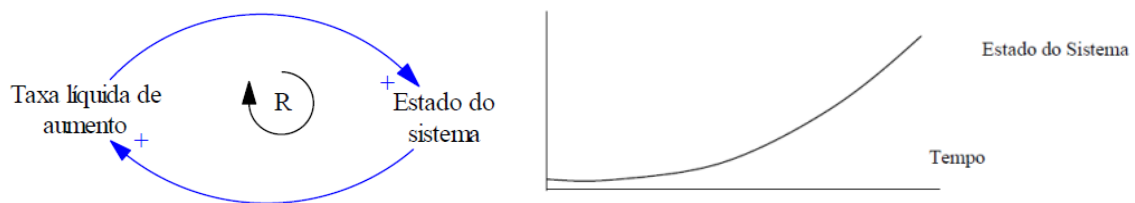


Figura 3.3 – Crescimento exponencial a partir de um laço de realimentação positivo.  
Fonte: Antonino (2007).

O segundo tipo de comportamento é a auto regulação ou busca pelo objetivo (*goal seeking*), característico do ciclo negativo. A Figura 3.4 descreve esse comportamento, iniciando o ciclo a partir da variável objetivo. Ao implicar um aumento na variável discrepância, o ciclo causal mostra uma relação positiva, exceto pela relação entre “estado do sistema” e “discrepância”, provocando assim um equilíbrio no sistema ao longo do tempo devido à relação causal negativa. Sterman (2000) afirma que, à medida que diminui a discrepância do sistema, a taxa ao qual o sistema atinge seu objetivo também é reduzida.

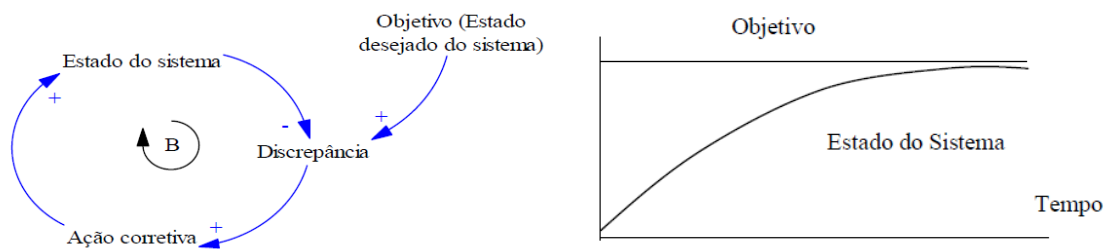


Figura 3.4 – Busca por objetivo (*goal seeking*).  
Fonte: Antonino (2007).

Por fim, o movimento oscilatório é um dos comportamentos mais comuns presentes nos sistemas dinâmicos, como mostra a Figura 3.5. A diferença entre o comportamento oscilatório para o *goal seeking* é que, neste caso, existem os atrasos envolvidos na inter-relação causal que, quando não considerados e entendidos corretamente, as ações corretivas são feitas em excesso (Antonino, 2007) e o estado do sistema oscila em torno do seu objetivo (Corbett, 2003).

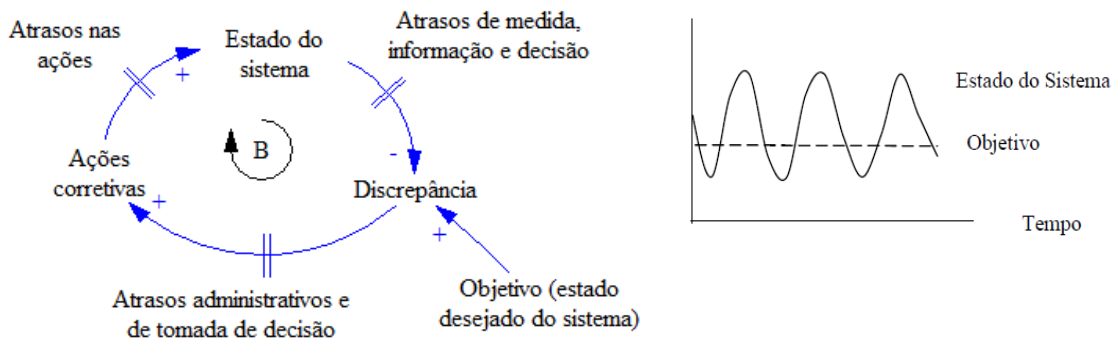


Figura 3.5 – Comportamento oscilatório do sistema.

Fonte: Antonino (2007).

Os atrasos ocorrem porque quando uma ação é tomada, seu efeito pode não ser imediato ou ocorrer um atraso em sua percepção. Segundo Sterman (2000), existem os atrasos físicos de materiais, quando estes passam por um processo de transformação, ou ainda os atrasos de informação, que representam o ajustamento gradual das percepções e crenças humanas sobre determinada mudança, já que os modelos mentais não são atualizados instantaneamente quando uma nova informação é recebida. Um exemplo desse comportamento pode ser percebido quando se altera uma tarifa de transporte urbano, cujo impacto sobre a demanda pode não ser instantâneo, havendo um atraso no efeito provocado.

A duração média dos atrasos depende do problema abordado e deve ser investigada por coleta de dados. Além disso, a distribuição da saída em torno do tempo médio de atraso também difere para cada situação, como afirma Sterman (2000). Ressalta-se que, para cada variável do tipo “estoque” existe um atraso associado, no entanto, em um modelo de simulação consideram-se apenas as variáveis de maior relevância para o objetivo do estudo.

Para Corbett (2003), as oscilações em um sistema complexo com uma grande quantidade de interações não são regulares, em que essa irregularidade é resultado de uma combinação da não linearidade da sua dinâmica endógena e de fatores exógenos. O

atraso descreve um comportamento oscilatório no sistema devido ao tempo de decisão, ação e percepção ser diferente entre as variáveis do sistema, conforme apresentado na Figura 3.5.

O processo de desenvolvimento de diagramas de causa e efeito varia muito, mas Radzicki e Taylor (1997) fornece o seguinte guia para a sua construção:

- Listar as variáveis do sistema que são diretamente relevantes à definição do problema.;
- Ligar as variáveis listadas na primeira etapa por meio de relações causais, explicitando se a relação é positiva ou negativa. Ao longo da construção desse diagrama, pode-se acrescentar ou excluir variáveis conforme o necessário. No entanto, a definição do problema deve ser mantida em mente durante todo o processo; e
- Conforme o diagrama evolui, devem ser estudados os laços de realimentação que estão sendo formados, devendo ser identificadas suas polaridades, negativa ou positiva.

Ainda segundo Radzicki e Taylor (1997), esta é uma etapa importante no que diz respeito à coleta de informação por meio de *brainstorming* com grupos de especialistas, dados reais do problema, estudo da bibliografia existente e experiência pessoal.

No entanto, como destaca Sterman (2000), os diagramas de causa e efeito são representações dos modelos mentais e não distinguem estoques e fluxos, ou seja, as acumulações e as taxas de mudança dos recursos em um sistema. Por isso, utiliza-se uma forma mais completa de representação dos sistemas, os diagramas de estoque e fluxo, que permitem seu equacionamento e posterior simulação.

### **3.2 Estrutura do Diagrama de Estoque e Fluxo**

Os diagramas de estoque e fluxo são construídos com basicamente cinco componentes: estoques, fluxos, auxiliares, constantes e conectores, como representados na Figura 3.6.

Estoques (definidos com a primeira letra maiúscula), representam acumulações dentro do sistema e podem sofrer alterações devido à ação dos fluxos. São representados por

retângulos e seu valor inicial acumula o fluxo que entra e subtrai o fluxo que sai (Sterman, 2000).

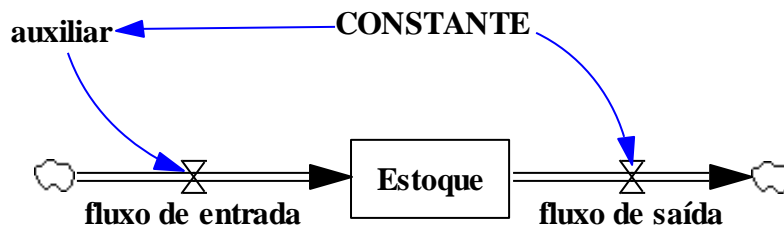


Figura 3.6 – Componentes utilizados no diagrama de estoque e fluxo.  
Fonte: Elaboração própria.

Os fluxos (em letras minúsculas) são variáveis de ação que alteram os estoques, aumentando ou diminuindo seus volumes. São representados por setas com válvulas, que controlam as taxas de entrada e saída dos estoques. As nuvens, que podem aparecer no início ou final de cada fluxo, representam a fonte ou destino final e não são considerados por estarem fora do sistema de estudo delimitado (Alvez, 2008). Assim, a estrutura do diagrama de estoque e fluxo corresponde à Equação (3.1) (Sterman, 2000).

$$Estoque = \int_{t_0}^t (\text{fluxo de entrada} - \text{fluxo de saída}) dt + Estoque(t_0) \quad (3.1)$$

As variáveis auxiliares (em letras minúsculas) têm a função de formular os dados, definir as equações e combinar, por meio de operações algébricas, os fluxos, estoques e outros auxiliares. As constantes (em letras maiúsculas) são parâmetros externos de entrada no modelo. Por fim, os conectores (setas) representam as inter-relações entre todos os componentes do sistema. São essas inter-relações que ligam os componentes que formarão uma expressão matemática (Morecroft, 2015; Karnopp *et al.*, 2012).

Dessa forma, o diagrama de estoque e fluxo com o exemplo da demanda de transporte, congestionamento e oferta de transporte é representado como na Figura 3.7. O congestionamento é representado pela diferença entre demanda e oferta de transporte, somado ao congestionamento inicial do período analisado. A demanda por transporte sofre influência de outros fatores, como por exemplo, a população e a renda per capita. A oferta de transporte, por outro lado, depende de investimento em infraestrutura.

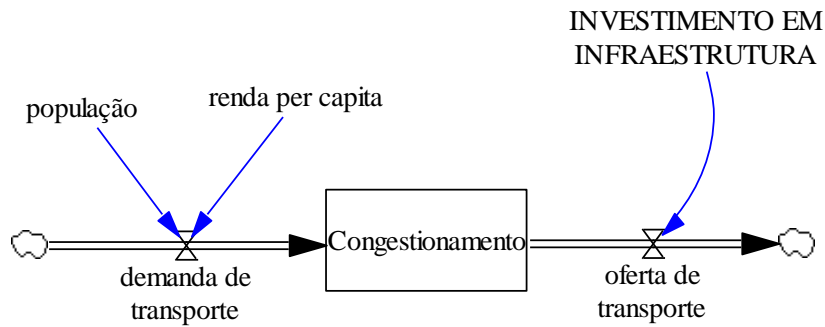


Figura 3.7 – Diagrama de estoque e fluxo da demanda e oferta de transporte e congestionamento.

Fonte: Elaboração própria.

Segundo Georgiadis e Vlachos (2004), o diagrama de estoque e fluxo é uma representação gráfica da formulação matemática do modelo. Sua construção permite a revisão e possível reformulação do modelo conceitual, representado pelo diagrama de causa e efeito, auxiliando a compreensão das inter-relações do sistema na fase qualitativa de formulação do modelo (Sterman, 2000).

Para a fase quantitativa do modelo, Naim e Towill (1994) afirmam que existem três possíveis técnicas de solução: a teoria de controle; a simulação computacional; e a análise estatística, cuja escolha depende do grau de complexidade do modelo matemático e da disponibilidade de dados para a análise proposta. Segundo Wikner *et al.* (1991), a simulação computacional por meio de integração numérica é indicada quando as relações entre as variáveis do modelo são complexas e não lineares.

A condição inicial de um estoque fornece a quantidade em estoque no período de tempo inicial da simulação. A quantidade no estoque em um intervalo de tempo seguinte será o valor no estoque atual, somado ao fluxo de entrada menos o fluxo de saída durante o intervalo de tempo, conforme Equação 3.2. No entanto, os valores dos fluxos geralmente não são constantes ao longo do tempo, devendo-se estimar o fluxo médio do intervalo de tempo, reconhecendo que a média no intervalo normalmente não será igual ao fluxo em um determinado momento. O pressuposto mais simples neste caso, é que as taxas permanecerão constantes entre o intervalo de tempo considerado, denotando o intervalo de tempo entre os períodos como  $d_t$  (Sterman, 2000; Choopojcharoen e Magzari, 2012).

$$S_{t+dt} = S_t + (FE_t - FS_t) \times dt \quad (3.2)$$

Em que, para um instante de tempo  $t$ ,  $S_t$  representa o estoque,  $FE_t$  representa o fluxo de entrada e  $FS_t$  representa o fluxo de saída. Esse pressuposto é a técnica mais básica, conhecida como integração de Euler, cuja suposição de que as taxas permanecem constantes ao longo do intervalo de tempo  $d_t$  é razoável se a dinâmica do sistema for lenta o suficiente e  $d_t$  for suficientemente pequeno. As definições de "razoável" e "pequeno o suficiente" dependem da precisão desejada, o que, por sua vez, depende da finalidade do modelo. À medida que o *time step* ou  $d_t$  diminui, a precisão da aproximação de Euler melhora. No limite, quando  $d_t$  se torna um momento de tempo infinitesimal, a Equação (3.2) reduz-se à equação diferencial exata de tempo contínuo, Equação (3.3), que rege a dinâmica do sistema (Sterman, 2000):

$$\lim_{dt \rightarrow 0} \frac{S_{t+dt} - S_t}{dt} = \frac{dS}{dt} \quad (3.3)$$

A integração de Euler é simples e adequada para muitas aplicações em que as imprecisões nas condições iniciais, nos parâmetros e especialmente a especificação do modelo, são grandes. Os pacotes de *software* para a DS, como Dynamo, iThink, Powersim e Vensim, usam a integração de Euler como seu método de simulação padrão (Sterman, 2000).

A diferença entre a solução numérica e analítica do sistema de equação diferencial é o tamanho de  $d_t$ . Enquanto a equação diferencial usa um instante de tempo infinitesimal, os computadores digitais devem proceder por etapas discretas e usar um *time step* finito, o que introduz um erro de integração. A magnitude do erro de integração depende da rapidez com que as taxas mudam em relação ao tempo. Quanto mais rápida a dinâmica do sistema, ou quanto mais longo for o intervalo de tempo  $d_t$ , maior será o erro de integração. Para pequenos intervalos de tempo, os erros são pequenos, ao passo que, aumentar o intervalo de tempo, aumenta-se a magnitude do erro (Sterman, 2000).

No entanto, quanto menor o valor de  $d_t$ , maiores serão os erros de arredondamento e truncamento, que surgem porque os computadores operam com aritmética de precisão finita, além do maior tempo computacional necessário (Choopojcharoen e Magzari, 2012). Dessa forma, selecionar o *time step* para as simulações é uma questão de *trade-off* entre o erro de integração e o erro de arredondamento. Uma regra geral amplamente utilizada para essa escolha é definir o *time step* entre um quarto e um décimo do



tamanho da menor constante de tempo presente no modelo. Além disso, uma vez que os computadores usam o sistema binário, pode-se minimizar o erro de truncamento e arredondamento no cálculo do tempo escolhendo-se um *time step* que possa ser representado na base 2, por exemplo,  $d_t = 4; 2; 1; 0,5; 0,25; 0,125; 0,0625$ , etc. (Serman, 2000).

Outras técnicas de integração foram apresentadas por Volino e Magnenat-Thalmann (2001). Segundo os autores, o método MidPoint é um método explícito que requer dois mecanismos de derivações por iteração e retorna uma solução de segunda ordem mais precisa em relação ao tempo. O método Runge-Kutta possui duas derivações mecânicas por iteração ou mais e, por isso, fornece alta precisão, o que aumenta significativamente à medida que o *time step* é reduzido.

Volino e Magnenat-Thalmann (2001) avaliaram os três métodos de integração em relação a parâmetros como tempo computacional, acurácia desejada e estabilidade numérica. O método de Euler apresentou o melhor tempo computacional e é uma boa opção para uma simulação robusta, onde a precisão não é essencial. Já o método de Runge-Kutta oferece boas possibilidades de garantir alta precisão aos resultados do modelo, mas requer um tempo computacional maior. Com relação à estabilidade numérica, os métodos implícitos, como o método de Euler, possuem vantagens, pois eles não sofrem de instabilidade numérica e permitem que grandes intervalos de tempo (*time step*) sejam usados, apesar da perda na precisão dinâmica.

Além disso, Volino e Magnenat-Thalmann (2001) enfatizaram a relevância de métodos implícitos como o método de Euler para a maioria das situações envolvendo simulação dinâmica, devido à robustez resultante de não estar sujeito à instabilidade numérica. Ademais, o erro percentual da solução numérica do método de Euler em relação ao método de Runge-Kutta é relativamente pequeno (Choopojcharoen e Magzari, 2012).

Dessa forma, modelos de simulação computacional são desenvolvidos diretamente do diagrama de estoque e fluxo, configurando equações diferenciais numericamente resolvidas por meio de simulação dinâmica. Tais modelos são desenvolvidos por meio de aplicativos computacionais especializados, como o Powersim (Powersim Software, 2017), Vensim (Ventana Systems, Inc., 2017), Stella e i-think (ISEE Systems, 2017) e outros (Knop, 2009).

Seppelt e Richter (2005) compararam uma série de pacotes computacionais com foco no rigor matemático e na precisão de modelos dinâmicos não-lineares. Rizzo *et al.* (2006) compararam as vantagens e desvantagens do uso de quatro pacotes computacionais diferentes aplicados ao mesmo modelo de simulação dinâmico. Segundo os autores, do ponto de vista da pesquisa ou da gestão, a compreensão das vantagens e limitações desses pacotes de *software* pode melhorar a precisão dos resultados da pesquisa e aumentar sua confiabilidade.

Para o modelo proposto nesse trabalho, utilizou-se o *software* Vensim<sup>®</sup> PLE, um programa com linguagem própria para simulação dinâmica que permite conceituar, documentar, simular e analisar modelos de sistemas dinâmicos. Além disso, a versão PLE (*Personal Learning Edition*) é uma versão gratuita da empresa Ventana Systems, destinado ao uso pessoal e educacional.

### **3.3 Testes de Modelos em Dinâmica de Sistemas**

O modelo de simulação em Dinâmica de Sistemas é uma representação abstrata do sistema real, sendo necessária a realização de testes, ou seja, é necessário saber se há correspondência entre o sistema real e o modelo proposto. Portanto, a verificação da utilidade do modelo é o processo que determina se o modelo é uma boa representação do sistema, se é confiável, robusto e aplicável à realidade (Mula *et al.*, 2013).

Em geral, os testes relacionam algumas diretrizes a serem seguidas, entre elas: o modelo não deve produzir valores não-realísticos e deve se comportar “adequadamente” quando sujeito a influências externas (Maani e Cavana, 2004). Nesse sentido, Forrester e Senge (1980) propuseram 17 testes organizados em três categorias: testes de estrutura do modelo; testes de comportamento do modelo; e implicações políticas. Com base nessa referência, Sterman (2000) agrupou alguns testes de modo a eliminar sobreposições e sugeriu outros novos, apresentando 12 testes para verificar a confiabilidade de um modelo de DS, conforme apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Testes de validação do modelo de simulação em Dinâmica de Sistemas.

<b>Tipo de Teste</b>	<b>Propósito do Teste</b>	<b>Ferramentas e Procedimentos</b>
1.Adequação da fronteira	Identificar a fronteira do sistema, assim como os conceitos corretos para o problema envolvido	Diagrama de causa e efeito, diagrama de estoque e fluxo, gráficos e inspeção das equações do modelo
2.Avaliação da estrutura	Verificar se a estrutura do modelo é compatível com os conhecimentos envolvidos e sua coerência com as leis da física e com as leis de conservação	Diagrama de causa e efeito, diagrama de estoque e fluxo, realizar testes parciais e análise de sensibilidade
3.Consistência dimensional	Verificar se todas as equações possuem significado real	Utilizar softwares para a análise dimensional, verificando a dimensão das variáveis
4.Avaliação dos parâmetros	Verificar se os valores dos parâmetros são consistentes com o conhecimento descritivo e numérico do sistema	Utilizar métodos estatísticos para estimar os parâmetros. Utilizar testes de modelo parciais
5.Condições extremas	Verificar a consistência do modelo ao ser submetido a valores extremos	Inspecionar cada equação, analisar o comportamento individual dos parâmetros ao ser submetido a valores extremos e implementar testes que regem as leis da física
6.Erro de integração	Verificar se o modelo é sensível às variações de tempo	Definir o método de integração numérica e o time step para a simulação, de modo que os resultados do modelo não sejam sensíveis ao tempo.
7.Reprodução do comportamento	Verificar se o modelo reproduz o comportamento de interesse no sistema, qualitativo e quantitativo	Calcular medidas estatísticas correspondentes entre os dados e modelo, autocorrelação, análise espectral e comparar as saídas de dados do modelo qualitativamente com a realidade
8.Anomalia do comportamento	Verificar se o modelo possui algum comportamento anômalo após alguma alteração	Zerar alguma variável chave. Substituir ciclos causais de equilíbrios por ciclos de desequilíbrios
9.Membro de Família	Verificar se o modelo pode gerar o comportamento observado em outra circunstância no mesmo sistema	Modificar o modelo para um número maior de possíveis cenários
10.Comportamento inesperado	Verificar se o modelo gera algum comportamento não observado ou não conhecido anteriormente	Usar o modelo para simular futuras condições do comportamento do sistema. Resolver todas as discrepâncias entre o comportamento do sistema e sua compreensão de sistema real
11.Análise de sensibilidade	Para sensibilidade numérica, comportamento do sistema e políticas envolvidas: verificar se os valores, possuem mudanças significativas	Linearização, métodos de otimização, análise de estabilidade global
12.Melhoria do sistema	Analisar se o processo de modelagem ajuda a melhorar o sistema.	Utilizar métodos avançados com antecedência para minimizar os impactos negativos ao modelar os modelos mentais, estrutura do sistema e resultados. Tais métodos avançados podem ser uma avaliação de horizonte, utilização de múltiplas fontes de dados e aderência com protocolos experimentais.

Fonte: Adaptado de Sterman (2000).

No entanto, há diversas abordagens de modelagem e nem todos os testes propostos na literatura são aplicáveis. Dessa forma, Zagonel e Corbet (2006) revisaram a literatura relativa à prática de modelagem em DS e o resultado foi um reagrupamento dos testes em cinco categorias: (1) mapeamento do sistema; (2) modelagem quantitativa; (3) teste de hipóteses; (4) análise de incertezas; e (5) previsão/otimização. Segundo os autores, essa proposta de reagrupamento possui como objetivo auxiliar na identificação do subconjunto de testes mais apropriado para cada objetivo da modelagem.

O mapeamento do sistema envolve o desenho de diagramas de causa e efeito, diagramas de estoque e fluxo ou qualquer forma de mapeamento ou organização dos elementos que formam um sistema, cujo objetivo é identificar as principais interações causais do sistema. Ao ser construído coletivamente, reflete uma perspectiva compartilhada sobre o assunto em questão, fornece informações dinâmicas preliminares e facilita o aparecimento e esclarecimento de suposições, auxiliando na comunicação (Zagonel e Corbet, 2006).

A modelagem quantitativa envolve a formulação e a simulação do modelo, em que a diferença dessa categoria para o teste de hipóteses é que a formulação ainda é indutiva, semelhante à categoria de mapeamento do sistema. A modelagem quantitativa é focada na compreensão das estruturas de estoque e fluxo e aplica-se na representação de sistemas quantificáveis (Zagonel e Corbet, 2006).

A modelagem de testes de hipóteses é focada no problema, em que a estrutura do sistema é agregada o máximo possível e a complexidade de detalhes é evitada (Zagonel e Corbet, 2006). O teste de hipóteses é um procedimento dedutivo que testa se uma estrutura específica de *feedback* é capaz de explicar ou produzir um comportamento particular (Forrester, 1961), ou seja, a modelagem quantitativa não começa até que tal hipótese seja declarada. As simulações de modelos são realizadas após as expectativas comportamentais serem explícitas e servirem como testes dessas hipóteses (Sternan, 2000).

A análise de incerteza em DS muitas vezes é referida como análise de sensibilidade, em que a sensibilidade ao comportamento é assumida de forma frequente, demonstrando-se que os comportamentos das variáveis de interesse não mudam significativamente se os

parâmetros forem variados dentro de intervalos razoáveis, ou mesmo se mudanças justificáveis são realizadas dentro dos limites do modelo (Zagonel e Corbet, 2006).

Maani e Cavana (2004) sugerem os seguintes passos para o teste de sensibilidade:

- Selecionar os parâmetros ou grupos de parâmetros que se considera que mais afetam o comportamento do modelo;
- Modificar os valores de cada grupo separadamente a partir de uma certa porcentagem (por exemplo, mais 10% ou mais 25%) de cada vez e ir rodando as simulações;
- Identificar aqueles parâmetros que, quando modificados, afetam significativamente o comportamento do modelo; e
- Analisar se as mudanças de comportamento são justificáveis a partir da teoria ou do senso comum.

Um dos objetivos do teste de sensibilidade é a identificação de pontos chave de alavancagem, aqueles a partir dos quais pequenas mudanças nos valores de parâmetros ocasionam mudanças consideráveis no comportamento do modelo ou em seus resultados (Maani e Cavana, 2004).

Por fim, a previsão e otimização está relacionada à previsão de padrões futuros de comportamento, mudanças nesses padrões e previsão de eventos, incluindo questões de pesquisa que visam encontrar soluções ótimas ou robustas. Esse não é o foco principal em DS, tido como aprendizado, compreensão e explicação de comportamentos dos sistemas. A previsão é apenas uma extensão em que os parâmetros são alterados em intervalos razoáveis, para examinar os resultados possíveis de uma variável em um determinado momento, mas a previsão quantitativa raramente é um objetivo na prática de Dinâmica de Sistemas (Zagonel e Corbet, 2006).

Assim, para cada categoria de modelagem, existe um conjunto de testes mais apropriados a serem realizados para a confiabilidade do modelo. O Quadro 3.2 resume os 24 testes propostos por Forrester e Senge (1980) e Sterman (2000) agrupados nas 5 categorias sugeridas por Zagonel e Corbet (2006).

Quadro 3.2 – 24 testes agrupados em 5 categorias de modelagem.

MAPEAMENTO DO SISTEMA	MODELAGEM QUANTITATIVA	TESTE DE HIPÓTESES	ANÁLISE DE INCERTEZAS	PREVISÃO E OTIMIZAÇÃO	
Validação visual (avaliação da estrutura por dedução)	Conservação física	Teste qualitativo de comportamento-problema	Análise de sensibilidade quantitativa	Correspondência de comportamento	
Validação das regras de decisão (foco estrutural)	Consistência dimensional	Adequação de limites (problema de endogeneidade)	Análise de sensibilidade política	Previsão de comportamento	
	Erro de integração	Validade das regras de decisão (foco político)	Adequação de limites (implicações políticas)	Previsão de comportamento alterado	
	Teste de condições extremas	Avaliação de comportamentos Inesperados		<b>Categoria do teste</b>	
	Avaliação de parâmetros	Análise de sensibilidade do Comportamento			
	Reprodução de comportamentos Básicos	Teste de condições extremas (foco no comportamento do modelo)			Básico
	Teste endógeno de reprodução de comportamentos	Testes de anomalia de comportamento (testes de suposições alteradas)			Intermediário
	Teste de adequação de limites (modos de comportamento)	Membro da família (generabilidade)			Avançado

Fonte: Adaptado de Zagonel e Corbet (2006).

Dessa forma, a representação matemática exige precisão nas relações entre as variáveis dos sistemas, provocando uma evolução do entendimento do sistema e possíveis alterações no diagrama de causa e efeito.

Estruturado o sistema no simulador, o tomador de decisão possui um modelo que gera diferentes cenários futuros do sistema analisado (Senge, 2000). Executando-se diversas simulações com diferentes valores para as variáveis, pode-se verificar quais delas são as mais relevantes para a otimização do sistema e identificar os pontos de melhorias. Para tanto, deve-se estruturar o problema o mais próximo da realidade, diminuindo as incertezas na tomada de decisão e maximizando o poder de análise (Reinalde *et al.*, 2005).

### **3.4 Aplicação da Dinâmica de Sistemas ao Setor de Transportes**

Atualmente, a DS vem sendo aplicada a uma grande variedade de sistemas. Na modelagem da área de transportes, a aplicabilidade da DS foi avaliada por Abbas e Bell (1994) que apontaram os pontos fortes e fracos do método. Os autores sugeriram que a DS era adequada para questões estratégicas e que poderia fornecer uma ferramenta útil para apoiar a análise de políticas e a tomada de decisões na área de transportes.

Shepherd (2014) apresentou uma revisão de artigos baseados na DS, categorizando-os por área de aplicação do setor de transportes, como a aceitação de veículos de combustível alternativo, gerenciamento de cadeia de suprimentos que afetam o transporte, manutenção rodoviária, política estratégica, infraestrutura aeroportuária e ciclos econômicos da companhia aérea, além de um conjunto de áreas de aplicação emergentes.

Ghisolfi *et al.* (2016) apresentaram a aplicação da DS na área de transportes com uma caracterização e tendência da literatura existente por meio de uma revisão bibliométrica e sistêmica com a identificação de lacunas, apontadas como sugestões de pesquisas futuras.

No contexto das operações de manutenção rodoviária, destaca-se o trabalho de Chasey *et al.* (2002) que desenvolveram um modelo de DS para simular o impacto da manutenção e obsolescência de um sistema rodoviário para definir as relações entre atividades de manutenção e volume de tráfego e, em seguida, utilizar a receita

rodoviária gerada pelo tráfego para manter o nível de operação do pavimento. Dessa forma, o modelo de simulação auxilia na decisão consciente sobre o melhor uso dos recursos disponíveis.

De acordo com Fallah-Fini *et al.* (2010), a manutenção da rodovia depende de várias atividades, incluindo a compreensão das condições atuais e a previsão das condições futuras do pavimento, além da decisão de como melhor alocar recursos limitados para operações de manutenção. Os autores apresentaram um modelo dinâmico de simulação de processos de degradação e restauração rodoviária, calibrado com dados de oito seções viárias da Virgínia (EUA) e acoplado a um módulo de otimização das operações de manutenção, cuja abordagem fornece um plano de boas práticas de manutenção rodoviária. Os resultados sugerem que a mudança para uma manutenção preventiva menos onerosa, em vez de uma manutenção corretiva mais dispendiosa (e mais demorada), deve trazer benefícios para o sistema como um todo (Fallah-Fini *et al.*, 2010).

Friedman (2006), no entanto, questiona a política de manutenção preventiva, apresenta um modelo do efeito das condições da estrada no índice de acidentes rodoviários e usa dados da região de *New England* (EUA) para demonstrar que o modelo mental por trás da política de melhoria das estradas poderia, na maioria dos casos, aumentar os acidentes devido a maiores velocidades e melhores condições do pavimento. O autor demonstra as consequências de estabelecer limites ao visualizar problemas de curto prazo, devendo-se considerar a reavaliação dos conceitos de maximização dos reparos rodoviários com gastos de recursos que pode estar causando mais acidentes (Friedman, 2006).

Destaca-se, no entanto, que o contexto em que foram realizados os trabalhos citados pertence a um sistema rodoviário com infraestrutura desenvolvida, ou seja, vias expressas de alta capacidade, cujo foco da gestão é apenas a manutenção das boas condições de trafegabilidade já existentes. Essa realidade, porém, não condiz com as condições de boa parte da malha rodoviária de países em desenvolvimento, como o Brasil, conforme estudos apontados pela CNT (2016).

Em um país emergente como a China, Hang e Li (2010) estruturaram um modelo em DS para analisar a regulação do peso dos veículos de cargas e avaliar os impactos



decorrentes do sobrepeso praticado. Segundo os autores, tal regulação tem consequências econômicas importantes, tendo em vista que o custo de transporte por caminhão é diretamente influenciado por seu peso. Além disso, a regulação de peso também influencia a construção, custos de manutenção, conveniência e segurança das rodovias.

O modelo de Hang e Li (2010) é construído considerando-se variáveis relacionadas à previsão de demanda pelo transporte de mercadorias, custo de transporte, evolução da frota, uso dos veículos e desempenho do pavimento das vias de circulação. Ele é simulado em diferentes níveis de política (tolerante, rígida e moderada) para a regulação do peso dos veículos, das quais a política moderada se mostrou a mais adequada, baseando-se em parâmetros como a capacidade de estimular o desenvolvimento econômico, manter o desempenho favorável da pavimentação das vias, reduzir o custo e melhorar a eficiência do transporte (Hang e Li, 2010).

Diante do problema de sobrepeso dos caminhões no transporte rodoviário de minério de ferro na China, Liu e Mu (2015) também criaram um modelo em DS para avaliar os efeitos de longo prazo das políticas de regulação do peso do caminhão sobre a sustentabilidade da atividade. O modelo compreende seis módulos inter-relacionados, capazes de simular os efeitos das políticas sobre questões de transporte rodoviário, tais como fluxo de mercadorias, fluxo de caminhões, desempenho do pavimento, capacidade de transporte rodoviário e tempo de transporte.

O modelo ilustra também o custo econômico acumulado, incluindo o custo operacional e o custo de tempo de transporte, além do custo social acumulado, incluindo o custo de manutenção do pavimento, custo de emissão de gases de efeito estufa e custos de acidentes de trânsito, de modo que os efeitos das políticas sobre a sustentabilidade do transporte rodoviário pudessem ser avaliados (Liu e Mu, 2015).

Liu *et al.* (2017) mostraram que a aplicação de políticas rígidas de proibição do transporte rodoviário sobrecarregado na China, que aumenta o desempenho ambiental e social da sustentabilidade, não progrediu bem, pois aumenta os custos de transporte e reduz o desempenho econômico e, dessa forma, não melhora o desempenho geral da sustentabilidade.

Julgando-se necessário eliminar o transporte rodoviário sobrecarregado, sem prejudicar o desempenho geral da sustentabilidade, Liu *et al.* (2017) apresentaram um modelo de simulação em DS para realizar uma avaliação de longo prazo das políticas alternativas de mudança modal, incentivando uma maior utilização de modos de transporte mais eficientes, como o ferroviário, cujos resultados mostraram ser essa uma opção efetiva para alcançar a sustentabilidade da atividade, reduzindo-se os custos sociais, ambientais e econômicos do transporte de cargas.

O problema do excesso de peso dos veículos apresentado por Liu e Mu (2015) é semelhante ao encontrado no transporte de cargas nas rodovias brasileiras. No entanto, o modelo dos autores possui algumas limitações, como por exemplo, considera-se uma rota dedicada ao transporte de uma carga específica. Isso significa que o tráfego da rota estudada é composto por apenas um tipo de veículo, e que não há variabilidade do volume de tráfego ao longo da rota. Tais características impactam em variáveis importantes, como a capacidade, tempo de viagem e, conseqüentemente, o custo operacional de transporte.

Em suma, este capítulo apresenta a DS como um método adequado para o objetivo do estudo, pois é um método que permite compreender e avaliar o comportamento do sistema de transporte rodoviário de cargas com sobrepeso e seus impactos sobre outros parâmetros, como os custos econômicos e sociais envolvidos. No entanto, foi possível identificar algumas lacunas na literatura existente, tais como a aplicação de um modelo mais próximo das condições reais de operação de rodovias brasileiras.

No Brasil, o transporte de rochas ornamentais, realizado pelo modo rodoviário, apresenta o problema de excesso de carga, causando danos que, muitas vezes, não são contabilizados ou considerados para as decisões estratégicas do setor. Por isso, tomou-se o transporte de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo como objeto de um estudo de caso para a elaboração de um modelo de simulação dinâmica que contemple as características intrínsecas necessárias.

## 4 ESTUDO DE CASO

Sabendo-se que o transporte de cargas no Brasil é realizado majoritariamente pelo modo rodoviário, assim como o transporte de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo, e que este opera sob a prática do excesso de peso, elaborou-se um modelo de simulação em DS para avaliar o impacto do excesso de peso em tais veículos sobre custos econômicos e sociais envolvidos, como os custos operacionais de transporte, custos de manutenção do pavimento e custos com acidentes rodoviários.

O transporte de rochas ornamentais no estado do Espírito Santo, mais especificamente, o transporte realizado entre os municípios de Nova Venécia e Serra é bastante expressivo, tendo em vista que a cidade de Nova Venécia é referência na produção e beneficiamento de granito, cujo escoamento é feito pelo modo rodoviário até o Porto de Vitória, de onde segue para a exportação.

### 4.1 O Setor de Rochas Ornamentais

A produção mundial de rochas ornamentais atingiu 123,5 mil toneladas em 2013, dos quais 7,5% foi produzido pelo Brasil, que ocupou o 4º lugar no *ranking* mundial de produção (Heider e Maia, 2014). Na Figura 4.1 encontra-se discriminada a produção brasileira por região. A região Sudeste deteve 65,2% da produção nacional e a Nordeste, 24,7%. As regiões Sul, Centro-Oeste e Norte atingiram, em conjunto, 10,1% da produção nacional (Sardou Filho *et al.*, 2013).

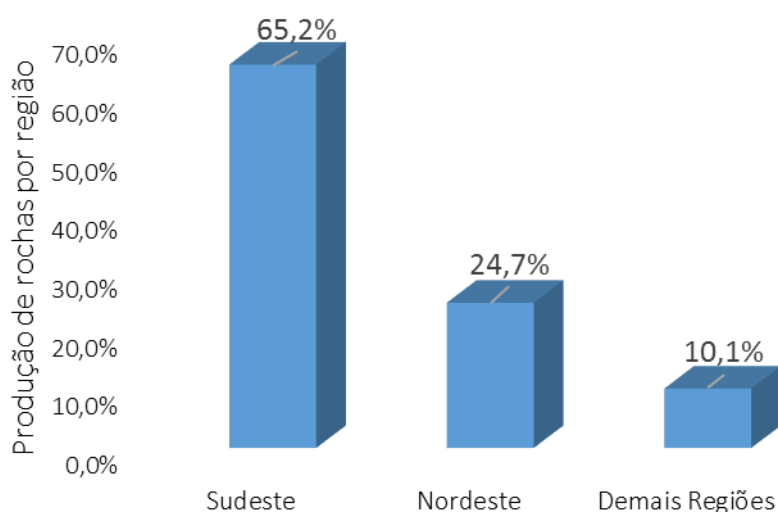


Figura 4.1 – Produção brasileira de rochas ornamentais por região.  
Fonte: Sardou Filho *et al.* (2013, p. 69).

Pertencente à região Sudeste, o estado do Espírito Santo, apresentado na Figura 4.2, destaca-se no cenário nacional de rochas ornamentais por conter a maior reserva de mármore do país e uma grande reserva de granito, correspondendo a 56% da produção nacional em 2011 (Castro *et al.*, 2011).

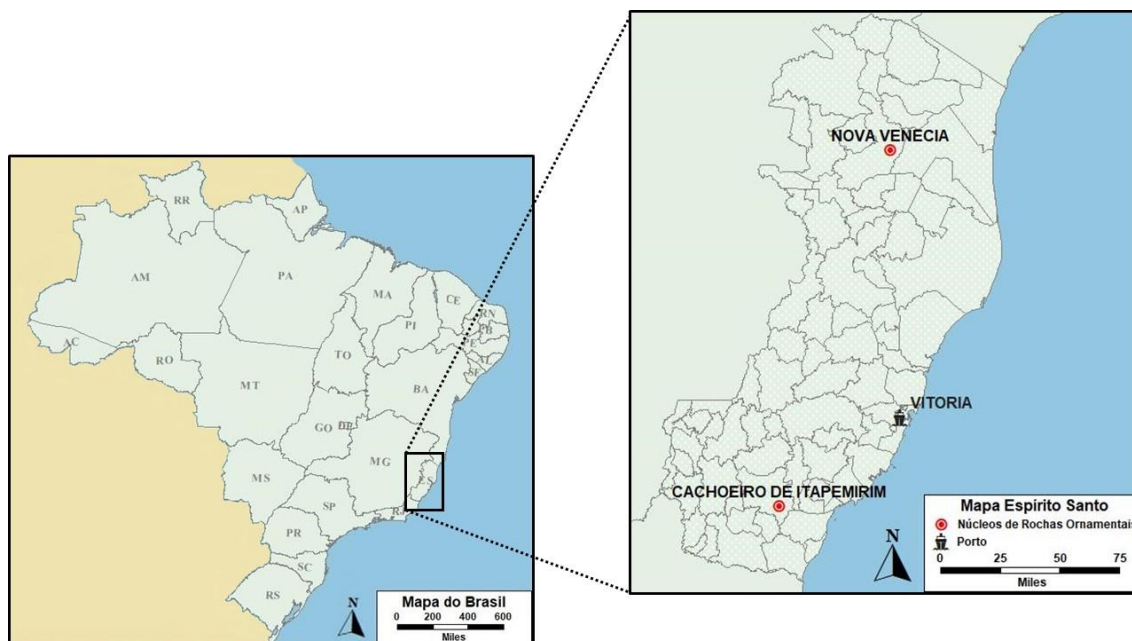


Figura 4.2 – Mapa do Brasil e do Espírito Santo com destaque aos principais núcleos da indústria de rochas ornamentais capixaba e o porto de Vitória.

Fonte: Elaboração própria.

As duas principais regiões nesse setor são: a região sul, centralizada na cidade de Cachoeiro de Itapemirim, que conta com a maior reserva de mármore brasileiro e possui grande concentração de empresas de beneficiamento; e a região noroeste, que tem como referência a cidade de Nova Venécia, com grande produção de granito e concentração de empresas tanto de extração, quanto de beneficiamento (Castro *et al.*, 2011). Como cerca de 70% de todo o granito exportado pelo Espírito Santo é proveniente da região noroeste do estado (Menezes e Sampaio, 2012), delimitou-se como objeto de estudo, o transporte de rochas ornamentais com origem em Nova Venécia e destino o Porto de Vitória.

Esta posição de destaque do Espírito Santo é consequência de um conjunto de fatores, tais como, infraestrutura portuária, incentivo fiscal, oferta de mão-de-obra e aglomeração espontânea de empresas do setor. Estas variáveis contribuíram para consolidar a posição do estado como referência mundial na produção e comercialização de rochas ornamentais (Sardou Filho *et al.*, 2013).

A indústria de mármore e granito é uma das mais importantes do estado do Espírito Santo. A produção de rochas ornamentais capixaba responde por 7% do Produto Interno Bruto (PIB) do estado. O setor emprega aproximadamente 130 mil pessoas, sendo cerca de 20 mil postos diretos e de 110 mil indiretos, com atividades de extração e beneficiamento em mais de 20 municípios capixabas, nas regiões Sul, Metropolitana, Noroeste e Norte (Espírito Santo em Ação, 2009).

Com relação à indústria de beneficiamento, o estado possui cerca de 900 teares, equipamentos utilizados no desdobramento de blocos em chapas, a maioria instalados em Cachoeiro de Itapemirim (Espírito Santo em Ação, 2009), totalizando a terceira maior concentração mundial de teares (Paraíso, 2006) e o maior parque de beneficiamento de rochas ornamentais da América Latina (Chiodi Filho, 2009b; Sardou Filho *et al.*, 2013).

Em relação às exportações brasileiras de rochas ornamentais, o Espírito Santo respondeu por 72,11% em 2014 e 70,94% em 2015 em volume físico. Os principais destinos das rochas exportadas pelo estado são: Estados Unidos, China e Itália. Os Estados Unidos é o maior comprador, com cerca de 70% de toda produção capixaba, comprando, principalmente, produtos manufaturados (Centrorochas, 2015).

Vitória, com seu complexo portuário, consiste na via principal de exportação de blocos e chapas de pedras ornamentais do Brasil (Sardou Filho *et al.*, 2013). A vocação portuária do estado favoreceu a atividade exportadora, transformando o Complexo Portuário de Vitória no maior polo brasileiro de exportação de rochas brutas e processadas (IDEIES, 2015).

As rochas ornamentais são utilizadas na indústria da construção civil como revestimentos internos e externos de paredes, pisos, pilares, colunas e soleiras. Compõem também peças isoladas, como estruturas, tampos, pés de mesa, bancadas, balcões, lápides e arte funerária em geral, além de edificações. As pedras ornamentais podem também ser torneadas para revestimento de colunas (IDEIES, 2015). A Figura 4.3 ilustra os principais elos da cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais.

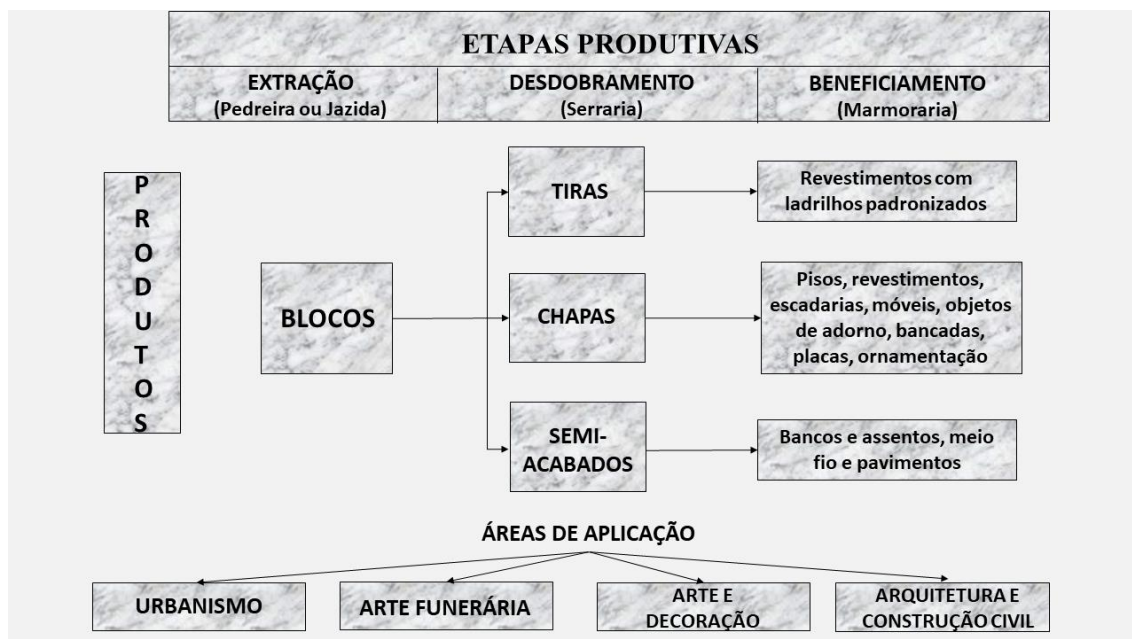


Figura 4.3 – Cadeia produtiva do setor de rochas ornamentais.

Fonte: IDEIES (2015, p.8)

O primeiro estágio da cadeia produtiva das rochas ornamentais é a lavra de blocos a céu aberto desempenhada pelas empresas extratoras. O beneficiamento primário é feito nas serrarias. Compreende o corte de blocos brutos em chapas, por meio dos teares, ou em tiras e ladrilhos por meio de talha-bloco para a produção de ladrilhos. O último processo de transformação ocorre nas marmorarias, cujos principais produtos são materiais de revestimento interno e externo em construções, além de peças isoladas como bancadas, soleiras, rodapés e objetos de decoração (IDEIES, 2015).

#### 4.2 O Transporte de Rochas Ornamentais no Espírito Santo

A produção de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo tem todo seu transporte atribuído ao modo rodoviário (Mendes, 2009), o que gera um intenso tráfego de veículos que transportam as rochas, atravessando praticamente todo o estado.

O perigo de caminhões de granito que trafegam em alta velocidade, com excesso de peso e cargas mal fixadas com risco de queda é frequente nas rodovias do Espírito Santo, provocando até cem acidentes por ano. O Estado possui um intenso tráfego de veículos transportando blocos de rochas a partir da extração até a serraria; da serraria para o beneficiamento e do beneficiamento para o porto (exportação) ou outro destino dentro do país (Camporez, 2017).

Em 2010, a Operação Carga Pesada visava coibir o transporte de peso excessivo em carretas. A operação concentrou-se no transporte de rochas ornamentais que é alvo de uma ação civil pública no estado do Espírito Santo (Gonçalves, 2010). Segundo Castro *et al.* (2011), Promotores da Justiça que atuam nas comarcas municipais do território capixaba foram aconselhados pelo Ministério Público a ingressarem com ações criminais contra proprietários de empresas exploradoras e transportadoras de rochas, caso fosse comprovado o excesso de peso durante o transporte ou ocorresse algum acidente.

A segurança do transporte de blocos de mármore e granito passou a ser um caso do Ministério Público e da Polícia Rodoviária Federal e, somente em 2010, o CONTRAN resolveu se manifestar, devido à gravidade dos acidentes nas estradas provocados pelo tombamento dos caminhões carregados com blocos de mármore e granito, por meio da aplicação da Resolução nº 354/2010, que regulamenta tanto as dimensões máximas dos blocos quanto os equipamentos e formas de amarração dos blocos para seu transporte (Castro *et al.*, 2011).

#### **4.3 Caracterização das Rotas Analisadas**

O acesso ao polo produtivo da cidade de Nova Venécia pode ser feito por duas principais rotas rodoviárias, por onde é realizado o escoamento da produção de rochas ornamentais até o Porto de Vitória: a primeira composta pelas rodovias ES-137, ES-080, BR-259 e BR-101; e a segunda composta pelas rodovias BR-381, ES-356, ES-430 e BR-101 (Menezes e Sampaio, 2012).

No entanto, os trechos que compõem cada rota possuem características específicas. No trabalho apresentado por Liu e Mu (2015) não são consideradas as especificidades de cada trecho, pois os autores assumem características idênticas para as rotas em toda sua extensão, o que não condiz com a realidade brasileira.

As características específicas dos trechos rodoviários que precisam ser consideradas são relativas ao VMDA e a capacidade viária, conforme apontado pelo DNIT (2006a), pois os fatores, como as diferentes categorias veiculares e volume de tráfego que utilizam as rodovias, impactam de forma significativa sobre a condição do pavimento, o tempo de viagem e o custo operacional de trafegar por tais rotas.

Para a caracterização do VMDA, o DNIT retomou, em 2014, o Plano Nacional de Contagem de Tráfego – PNCT, que identifica o comportamento do tráfego nas rodovias federais pavimentadas. Estudos desenvolvidos pelo DNIT, por meio do Instituto de Pesquisas Rodoviárias – IPR, em parceria com a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC identificaram 320 locais para receber a instalação dos postos de coletas permanentes em todo o país (DNIT, 2017a).

Além de definir um plano sistematizado de contagem de tráfego permanente nas rodovias federais, o DNIT realizou, em 2016 e 2017, pesquisas de Contagem Volumétrica e Classificatória – CVC, e pesquisas de Origem e Destino – OD, por meio de parcerias firmadas com o Comando de Operações Terrestres – COTER, do Exército Brasileiro, para as coletas das informações dos fluxos de veículos nas rodovias federais, além da parceria com a Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, por meio do termo de execução descentralizada N° 964/2014-DPP, para o desenvolvimento de metodologia para pesquisa de origem e destino, consolidação e tratamento dos dados de fluxos de veículos e aplicação de modelo matemático para estimativa do VMDA para toda malha rodoviária federal (DNIT, 2017a).

O detalhamento técnico-científico da primeira versão da metodologia, desenvolvida e aplicada a partir de modelagem matemática, para obtenção de estimativa do VMDA em toda a rede rodoviária pavimentada federal, encontra-se na Nota Técnica N° 002/2017/DE, disponibilizada na plataforma PNCT (DNIT, 2017a).

Dessa forma, as rotas de escoamento de rochas ornamentais em estudo foram segregadas em trechos de acordo com a homogeneidade do volume de tráfego, conforme ilustrados na Figura 4.4. Tais rotas, bem como os trechos que as compõem são denominadas da seguinte forma:

Rota #1:

- Trecho #1.1 – Compreende o trecho entre Nova Venécia e Colatina (NV-CO); e
- Trecho #1.2 – Compreende o trecho entre Colatina e João Neiva (CO-JN).

Rota #2:

- Trecho #2.1 – Compreende o trecho entre Nova Venécia e Jaguaré (NV-JA); e



- Trecho #2.2 – Compreende o trecho entre Jaguaré e João Neiva (JA-JN).

Rota #3:

- Trecho #3.1 – Compreende o trecho entre João Neiva e Fundão (JN-FU); e
- Trecho #3.2 – Compreende o trecho entre Fundão e Serra (FU-SE).



Figura 4.4 – Divisão das rotas em trechos com base no VMDA.  
Fonte: Elaboração própria.

Como pode-se observar no mapa da Figura 4.4, na altura do município de João Neiva, as Rotas #1 e #2 se unem, formando a Rota #3, compartilhada pelos veículos provenientes de ambas as rotas anteriores.

A Rota #1 não possui fiscalização por pesagem com balanças fixas, o que facilita a prática do sobrepeso pelos veículos de carga. Salienta-se que apesar de não possuir balanças fixas de pesagem em sua extensão, os veículos de carga que trafegam pela Rota #1 podem, eventualmente, ser fiscalizados por balanças móveis sob operação do DNIT. No entanto, tal fiscalização é realizada por apenas duas balanças nas rodovias federais de todo o estado.

A Rota #2 possui uma balança fixa de pesagem localizada no município de Linhares, posicionada no sentido do fluxo analisado, ou seja, no sentido norte – sul. Na Rota #3 também há outra balança fixa, localizada no município da Serra, posicionada no sentido contrário ao do fluxo analisado e, portanto, esta não fiscaliza o fluxo de veículos no sentido de análise desse trabalho. A responsabilidade pela fiscalização e operação das balanças fixas nessas rotas são da ANTT, já que a BR-101 no estado capixaba encontra-se sob concessão. No entanto, a ação fiscalizadora nessas balanças fixas está sujeita à programação e disponibilidade de fiscais da citada agência no estado, ou seja, também não operam de forma contínua.

Dessa forma, inicialmente, considera-se que os limites legais de peso por veículo são respeitados na Rota #2, no entanto, a possibilidade da prática de excesso de peso nessa rota também é avaliada pelo modelo proposto, tendo em vista a descontinuidade da fiscalização nessa rota.

Assim, tendo em vista que o excesso de peso foi identificado como um problema recorrente no transporte rodoviário de rochas ornamentais no estado do Espírito Santo, e há uma necessidade por compreender e avaliar os impactos ocasionados por essa prática, apresenta-se um modelo de simulação em Dinâmica de Sistemas, para analisar a relação entre o excesso de peso em veículos de rochas ornamentais e os custos associados às suas externalidades negativas, mais especificamente, sobre os custos operacionais de transporte e custos sociais com acidentes rodoviários e manutenção do pavimento.

## 5 FORMULAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

Considerando-se as limitações dos modelos da literatura, aplicados a rodovias de alta capacidade para a manutenção do padrão de qualidade viária, ou no caso em que foram aplicados a rodovias exclusivas para o transporte de uma carga específica e, conseqüentemente, trafega um tipo de veículo padrão, influenciando no tempo de viagem, condição do pavimento e custos operacionais das rotas, torna-se necessária a formulação de um modelo de simulação que aborde os impactos da prática do sobrepeso pelo transporte rodoviário de rochas ornamentais no território capixaba, mas considerando as características relativas à realidade brasileira, em que as rodovias são utilizadas por diversas categorias veiculares e todas impactam de forma significativa para as considerações do modelo.

Baseando-se no trabalho de Liu e Mu (2015), estruturou-se um modelo de simulação em DS para a avaliação de impactos do excesso de peso sobre custos econômicos e sociais, selecionando-se as variáveis de interesse, de acordo com o objetivo apresentado. Em seguida, as variáveis foram agrupadas em seis subsistemas, denominados módulos, que são inter-relacionados, como mostra o diagrama de causa e efeito na Figura 5.1.

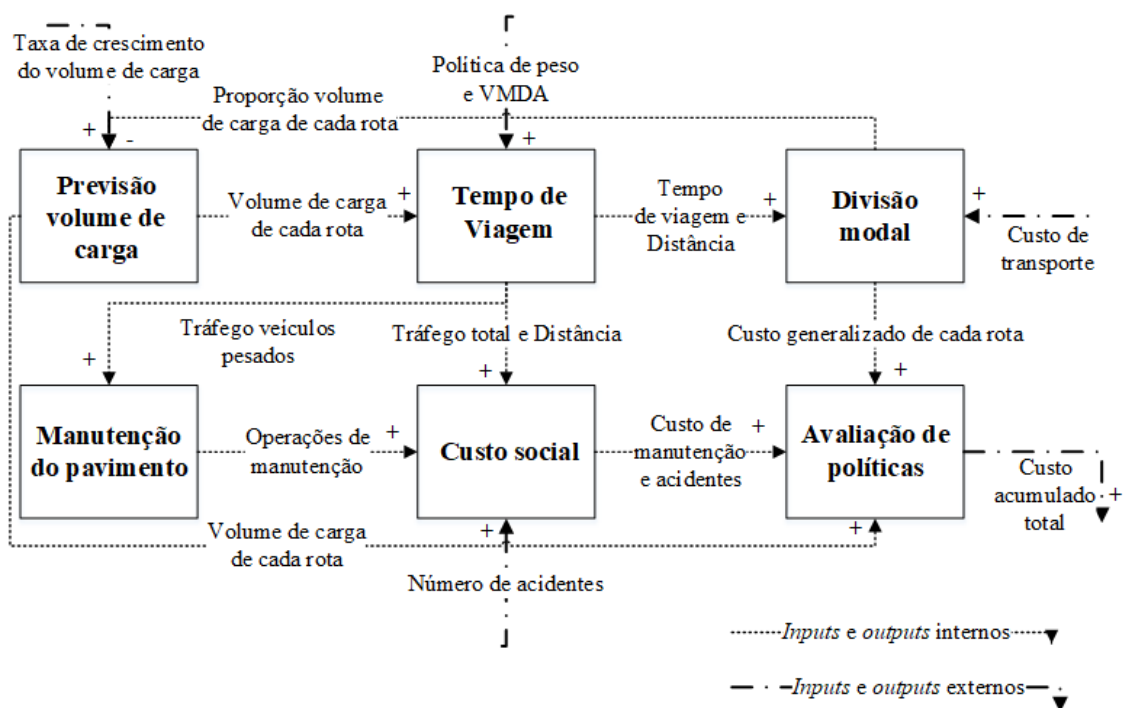


Figura 5.1 – Diagrama de causa e efeito do modelo sobre o excesso de peso no transporte rodoviário de cargas.

Fonte: Elaboração própria com base em Liu e Mu (2015).

O diagrama de causa e efeito expõe as relações de causalidade entre os módulos do sistema, pois cada módulo gera saídas que serão utilizadas como entradas em outros módulos. Além disso, existem entradas e saídas externas às fronteiras do sistema em estudo.

O módulo “*Previsão do Volume de Carga*” recebe como entrada externa, dados sobre a taxa de crescimento do volume de uma determinada carga (rochas ornamentais) a ser transportada de um ponto de origem a um ponto de destino. Tal carga poderá ser transportada por diferentes rotas e, portanto, o *input* interno deste módulo refere-se à proporção do volume de carga que será transportada por cada uma das opções de rotas disponíveis, calculada pelo módulo “*Divisão Modal*”. O objetivo do módulo “*Previsão do Volume de Carga*” é, portanto, calcular o volume de carga, em toneladas, que será escoada por cada rota considerada.

O módulo “*Tempo de Viagem*” recebe o resultado do módulo anterior, além da entrada externa sobre a política de peso adotada pelos veículos de carga e o VMDA de veículos que trafegam pelas rotas. Salienta-se que uma única rota pode possuir diferentes características físicas ao longo de seu percurso e cada trecho pode apresentar diferentes volumes e composição do tráfego, o que influencia a capacidade e o tempo de viagem em cada segmento. Desta forma, o objetivo deste módulo é fornecer o tempo total de viagem de cada rota, o volume de tráfego total, o tráfego de veículos pesados e a distância percorrida em cada opção de rota de transporte.

O terceiro módulo, “*Divisão Modal*”, utiliza o tempo de viagem e a distância, além do *input* externo sobre o custo operacional de transporte em função da distância e do tempo para cada condição do pavimento, cujo objetivo é calcular o custo generalizado de cada rota e, posteriormente, a proporção do volume de carga que deverá ser transportada por cada rota pré-estabelecida.

O módulo “*Manutenção do Pavimento*” recebe como dado de entrada, o volume de tráfego de veículos pesados, que se subdivide em categorias veiculares (ônibus, caminhão leve, semirreboque e semirreboque especial), para o cálculo do Número N, ou seja, o número de solicitações do eixo padrão equivalente, que influencia a vida útil e o índice de condição do pavimento, conforme mencionado no Capítulo 2. O objetivo

deste módulo é simular os períodos em que devem ser realizadas diferentes operações de manutenção em função do índice de condição do pavimento previsto.

O módulo “*Custo Social*” possui o objetivo de simular o custo com manutenção do pavimento, além do custo com acidentes rodoviários ao longo das rotas analisadas. Como dados de entrada, utiliza o tráfego total e distância, fornecidos pelo módulo “*Tempo de Viagem*” e operações de manutenção, fornecido pelo módulo “*Manutenção do Pavimento*”, bem como dados externos ao modelo, relativos aos custos de cada tipo de manutenção a ser realizada e custos relativos a cada tipo de acidente, que varia em função da gravidade.

Por fim, o sexto módulo, “*Avaliação de Políticas*”, recebe os custos de manutenção rodoviária e de acidentes, denominados custos sociais, além do custo generalizado de cada rota, denominado custo econômico, para calcular o custo acumulado total e simular cenários com diferentes pesos de importância aos diferentes custos (econômicos e sociais), em função de diferentes políticas de carregamento dos veículos de carga, em percentual de sobrepeso.

Para a simulação ser realizada, torna-se necessário estruturar o modelo em diagramas de estoque e fluxo e equacionar as variáveis inter-relacionadas. A seguir, detalha-se cada um dos módulos anteriores, apresentando-se os diagramas de estoque e fluxo, bem como as equações que compõem a estrutura matemática do modelo proposto.

## **5.1 Previsão do Volume de Carga**

O primeiro módulo refere-se à “*Previsão do Volume de Carga*”, apresentado na Figura 5.2. Neste módulo, as viagens são ocasionadas pela produção de um determinado produto em um local geográfico, denominado Origem (produção da viagem), cuja demanda ocorre em outro local geográfico, denominado Destino (atração da viagem).

O modelo apresenta apenas uma origem e um destino para o produto em estudo e as viagens são realizadas apenas pelo modo rodoviário. A partir do volume previsto de carga a ser transportado, existem duas rotas disponíveis para o escoamento da carga considerada, denominadas Rota #1 e Rota #2. A partir de um determinado local onde as Rotas #1 e #2 se unem, têm-se a Rota #3, compartilhada pelos veículos provenientes de ambas as rotas anteriores, conforme apresentado no Capítulo 4.

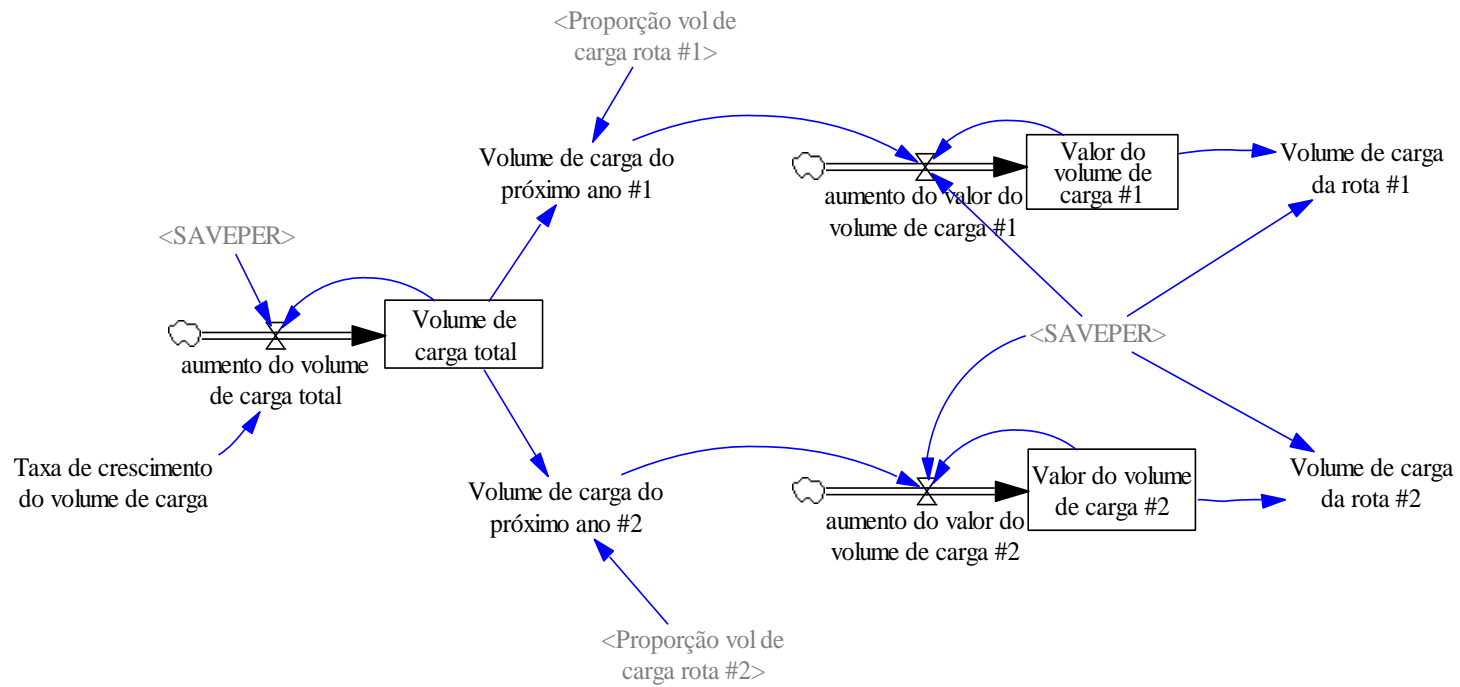


Figura 5.2 – Módulo Previsão do Volume de Carga.  
 Fonte: Elaboração própria.

Os estoques Volume de carga total, Valor do volume de carga #1 e Valor do volume de carga #2 são cumulativos porque não possuem fluxos de saída, ou seja, acumulam os valores do volume de carga ao longo do tempo, somados ao valor do estoque inicial  $E(t_0)$  dessas variáveis no período inicial da simulação, conforme Equações (5.1) - (5.3).

$$\text{Volume de carga total} = \int_{t_0}^t (\text{aumento do volume de carga total})dt + E(t_0) \quad (5.1)$$

$$\text{Valor do volume de carga 1} = \int_{t_0}^t (\text{aumento do valor do volume de carga \#1})dt + E(t_0) \quad (5.2)$$

$$\text{Valor do volume de carga 2} = \int_{t_0}^t (\text{aumento do valor do volume de carga \#2})dt + E(t_0) \quad (5.3)$$

As variáveis de fluxo representam as variações dos estoques ao longo do tempo. No módulo “*Previsão do Volume de Carga*”, as variáveis do tipo fluxo são: aumento do volume de carga total, aumento do valor do volume de carga #1 e aumento do valor do volume de carga #2.

O aumento do volume de carga total ao longo do tempo depende do Volume de carga total do ano anterior e da Taxa de crescimento do volume de carga do ano atual, conforme Equação (5.4).

$$\text{aumento do volume de carga total} = \frac{\text{Vol. carga total} \times \text{Taxa crescim. vol. carga}}{\text{SAVEPER}} \quad (5.4)$$

A variável SAVEPER é definida internamente pelo modelo como um ano e sua função é corrigir a unidade da variável de fluxo calculada, que deverá ser dada em tonelada por ano.

O aumento do valor do volume de carga #1 e #2 representa o acréscimo em relação ao volume do ano anterior. Como essas taxas somam nos estoques Valor do volume de carga #1 e #2, respectivamente, deve-se subtrair os valores dos estoques para que não sejam somados de forma redundante, conforme Equações (5.5) e (5.6).

$$\text{aumento do valor vol de carga 1} = \frac{\text{Volume de carga do próximo ano \#1} - \text{Valor do volume de carga \#1}}{\text{SAVEPER}} \quad (5.5)$$

$$\text{aumento do valor vol de carga } 2 = \frac{\text{Volume de carga do próximo ano \#2} - \text{Valor do volume de carga \#2}}{\text{SAVEPER}} \quad (5.6)$$

No módulo “*Previsão do Volume de Carga*”, as variáveis auxiliares correspondem ao Volume de carga do próximo ano #1, Volume de carga do próximo ano #2, Volume de carga #1 e Volume de carga #2.

As variáveis auxiliares Volume de carga do próximo ano #1 e #2, apresentadas nas Equações (5.7) e (5.8), representam o volume proporcional a ser transportado pelas duas rotas consideradas, respectivamente, cuja proporção é calculada no módulo “*Divisão Modal*”.

$$\text{Volume de carga do próximo ano \#1} = \text{Vol. carga total} \times \text{Prop. vol. carga rota \#1} \quad (5.7)$$

$$\text{Volume de carga do próximo ano \#2} = \text{Vol. carga total} \times \text{Prop. vol. carga rota \#2} \quad (5.8)$$

As variáveis Volume de carga da Rota #1 e #2 representam os volumes efetivamente transportados por cada rota respectivamente, conforme Equações (5.9) e (5.10).

$$\text{Volume de carga \#1} = \frac{\text{Valor do volume de carga \#1}}{\text{SAVEPER}} \quad (5.9)$$

$$\text{Volume de carga \#2} = \frac{\text{Valor do volume de carga \#2}}{\text{SAVEPER}} \quad (5.10)$$

Por fim, as variáveis do tipo constante são parâmetros de entrada no modelo, como a Taxa de crescimento do volume de carga, obtida de fontes externas e apresentada na Seção 6.1.

## 5.2 Tempo de Viagem

O segundo módulo de estoque e fluxo apresenta o “*Tempo de Viagem*”, cujo objetivo é calcular o tempo de viagem do transporte de carga em cada trecho rodoviário. Entretanto, devido às diferenças características de cada trecho que compõe as rotas, o tempo de viagem é calculado para cada trecho separadamente e, ao final, somados ao tempo total de transporte de cada rota.

A Figura 5.3 apresenta a estrutura do modelo de simulação para o tempo de viagem de um único trecho de uma dada rota, assim como toda a formulação matemática apresentada nesse módulo, pois a estrutura do modelo e as equações são semelhantes



aos demais trechos. Os parâmetros de entrada são específicos para cada trecho do estudo de caso e serão apresentados posteriormente na Seção 6.2.

Na Rota #1, o carregamento dos veículos está em função do limite legal de carga a ser transportada e do sobrepeso praticado pelos transportadores, conforme Equação (5.11).

$$\text{Carregamento do veículo \#1} = \text{Limite legal de carga} \times (1 + \text{Percent. sobrecarga}) \quad (5.11)$$

Na Rota #2, o carregamento dos veículos de carga respeita o limite de peso estabelecido legalmente em todo o período da simulação. Dessa forma, o carregamento do veículo em #2 é igual ao Limite legal de carga, conforme Equação (5.12).

$$\text{Carregamento do veículo em \#2} = \text{Limite legal de carga} \quad (5.12)$$

Dado o carregamento dos veículos em função da política adotada e o volume total de rochas ornamentais a ser transportada (fornecida pelo módulo “*Previsão do Volume de Carga*”), obtêm-se o tráfego de veículos de rochas em cada rota, conforme Equação (5.13).

$$\text{veículos de rochas \#1} = \frac{\text{Volume de carga da rota \#1}}{\text{Carregamento do veículo em \#1}} \times (1 + \text{Percentual de sobrecarga}) \quad (5.13)$$

Tal fluxo de veículos será somado ao tráfego de outras categorias veiculares que trafegam nas rotas estudadas. Este aspecto do modelo também difere daquele apresentado por Liu e Mu (2015), pois os autores consideraram apenas o tráfego dos veículos da carga em estudo, desprezando os demais veículos pesados e de outras categorias veiculares, caracterizando uma rodovia dedicada ao escoamento de uma carga específica, o que também não condiz com a realidade brasileira.

A parte superior do diagrama mostra o tráfego dos demais veículos de carga, denominados veículos pesados, para diferenciar daqueles que trafegam com a carga específica em estudo (rochas ornamentais). A parte inferior do diagrama apresenta o tráfego de veículos leves. As equações do modelo de simulação para ambos os tráfegos (leves e pesados) são semelhantes e, por isso, são apresentadas uma única vez nas Equações (5.14) - (5.19).

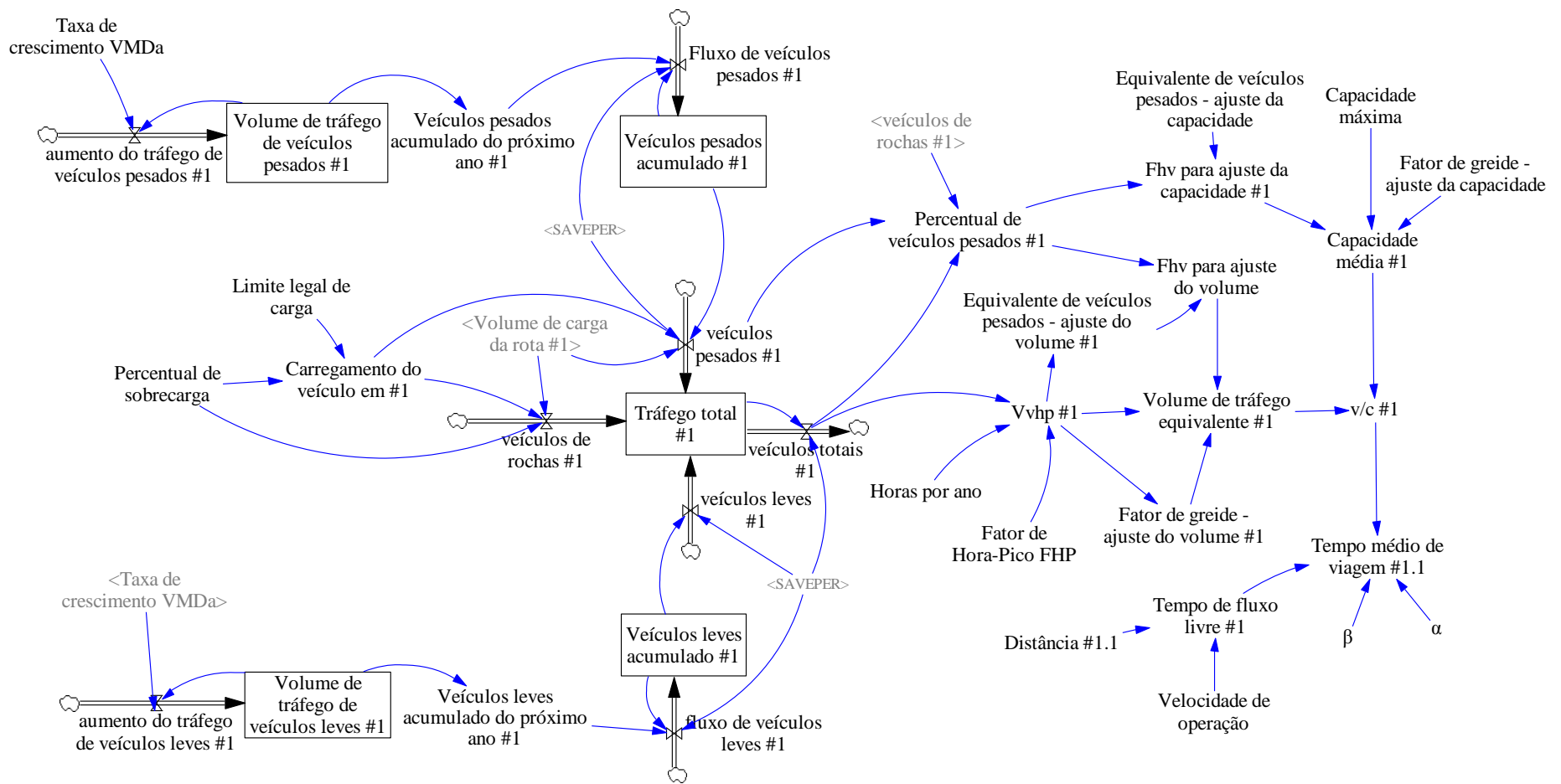


Figura 5.3 – Módulo Tempo de Viagem.  
 Fonte: Elaboração própria.

O aumento do tráfego de veículos pesados #1 é função do estoque inicial do volume de tráfego de veículos pesados #1 e da taxa de crescimento do VMDA ao longo do tempo de simulação, como mostra a Equação (5.14).

$$\text{aumento tráf. veíc. pesados \#1} = \frac{\text{Vol. tráf. veíc. pesados \#1} \times \text{Taxa cresc. VMDA}}{\text{SAVEPER}} \quad (5.14)$$

O estoque volume de tráfego de veículos pesados #1 é dado pela Equação (5.15).

$$\text{Volume tráf. veíc. pesados \#1} = \int_{t_0}^t (\text{aumento tráf. veíc. pesados \#1}) dt + E(t_0) \quad (5.15)$$

Percebe-se que este estoque acumula os veículos ao longo do tempo, pois não há uma variável de fluxo de saída. Isso ocorre porque se houvesse um fluxo de saída, o estoque seria igual a zero e não seria plausível multiplicá-lo pela taxa de crescimento para prever o aumento de tráfego do período seguinte. Dessa forma, deposita-se o valor do volume de tráfego de veículos pesados em uma variável do tipo auxiliar, denominada tráfego de veículos pesados do próximo ano #1, conforme Equação (5.16).

$$\text{Tráf. veíc. pesados próximo ano \#1} = \text{volume tráfego veículos pesados \#1} \quad (5.16)$$

Esta variável auxiliar, que contém o volume acumulado de veículos ao longo do período, alimenta o fluxo de veículos pesados que, por sua vez, subtrai o volume acumulado do período anterior. Desta forma, o fluxo de entrada será apenas a diferença do volume de veículos, ocasionada pela taxa de crescimento do período simulado, como mostra a Equação (5.17).

$$\text{Fluxo veíc. pesados \#1} = \frac{\text{Veíc. pesados acum. próx. ano \#1} - \text{Veíc. pesados acum. \#1}}{\text{SAVEPER}} \quad (5.17)$$

O estoque volume de veículos pesados é obtido conforme a Equação 5.18.

$$\text{Veículos pesados acumulado \#1} = \int_{t_0}^t (\text{fluxo de veículos pesados \#1}) dt + E(t_0) \quad (5.18)$$

Aqui novamente não há fluxo de saída e o volume de veículos pesados é acumulado para que seja subtraído do volume de tráfego acumulado do período subsequente. Dessa forma, garante-se que o volume de veículos de apenas um ano seja utilizado e não seu valor acumulado ao longo do tempo.

O fluxo de veículos pesados #1 é função de veículos pesados acumulado #1, subtraindo-se o fluxo de veículos de rochas #1. Essa subtração deve-se ao fato de que os veículos de rochas são parte integrante do tráfego de veículos pesados. Dessa forma, a subtração garante que os veículos de rochas não serão computados de forma redundante no estoque do tráfego total, de acordo com a Equação (5.19).

$$veículos\ pesados\ \#1 = \frac{Veículos\ pesados\ acumulado\ \#1 - veículos\ de\ rochas\ \#1}{SAVEPER} \quad (5.19)$$

Como dito anteriormente, a parte inferior do modelo, referente ao tráfego de veículos leves, segue a mesma lógica do tráfego de veículos pesados e as equações são semelhantes. Finalmente, somam-se todas as categorias veiculares no estoque Tráfego total #1, conforme Equação (5.20).

$$Tráf.\ total = \int_{t_0}^t (veíc.\ rochas + veíc.\ pesados + veíc.\ leves - veíc.\ totais) dt + E(t_0) \quad (5.20)$$

Em seguida, tem-se o fluxo de saída veículos totais #1, de acordo com a Equação (5.21).

$$veículos\ totais\ \#1 = \frac{Tráfego\ total\ \#1}{SAVEPER} \quad (5.21)$$

Dado o volume total de veículos que trafega no trecho de uma determinada rota, necessita-se ajustar o volume convertendo-o para a unidade de carro de passeio equivalente (ucp), por meio do fator de equivalência veicular. O *Highway Capacity Manual* – HCM define o fator de equivalência veicular como o número de carros de passeio que resultam nas mesmas condições operacionais que um único veículo pesado, em um tipo particular de rodovia, tráfego e condição de controle (TRB, 2010). Esses são valores numéricos que convertem a corrente de tráfego composta por diferentes tipos de veículos em uma corrente de tráfego equivalente, composta exclusivamente por carros de passeio (veículo padrão).

Desta forma, os volumes de tráfego observados nos trechos rodoviários devem ser convertidos para a unidade padrão (ucp/h), utilizando-se a Equação (5.22) (TRB, 2010).

$$v_p = \frac{V}{FHP \times f_g \times f_{HV}} \quad (5.22)$$

Em que:

- $v_p$ : taxa de fluxo equivalente (ucp/h);
- $V$ : volume horário observado (veículos/h);
- $FHP$ : fator de hora pico;
- $f_g$ : fator de ajuste de greide; e
- $f_{HV}$ : fator de ajuste para veículos pesados.

O valor  $FHP$  é utilizado nos estudos de capacidade das vias. Divide-se a hora-pico em intervalos de 15 minutos e o  $FHP$  varia, entre 0,25 (fluxo totalmente concentrado em um dos períodos de 15 minutos) e 1,00 (fluxo completamente uniforme), mas ambos os casos são difíceis de se verificar. Os casos mais comuns são de  $FHP$  na faixa de 0,75 a 0,90. Os valores de  $FHP$  nas áreas urbanas se situam geralmente no intervalo de 0,80 a 0,98. Valores acima de 0,95 são indicativos de grandes volumes de tráfego, algumas vezes com restrições de capacidade durante a hora de pico (DNIT, 2006a).

O fator de ajuste de greide  $f_g$  avalia os efeitos do volume (taxa de veículos) e do tipo de terreno (plano ou ondulado) na velocidade. Em relação ao tipo de terreno consideram-se dois tipos:

- Terreno em nível: uma combinação de alinhamento vertical e horizontal que permite que os veículos pesados mantenham aproximadamente a mesma velocidade que os automóveis. Isto inclui segmentos pequenos com greide menor que 2%; e
- Terreno ondulado: uma combinação de alinhamento horizontal e vertical que causa uma redução na velocidade dos veículos pesados, substancialmente abaixo dos automóveis, mas sem atingir uma velocidade de arrasto por longo período. Inclui segmentos pequenos e médios com greides menores que 4%. Segmentos longos com greide maior que 4% devem ser analisados como greide específico.

Para obter-se a taxa de fluxo equivalente, ainda é necessário calcular o fator de ajuste para veículos pesados, que permite converter caminhões, ônibus e veículos de recreação em carros de passeio equivalentes, por meio da Equação (5.23) (TRB, 2010):

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_T(E_T - 1) + P_R(E_R - 1)} \quad (5.23)$$

Em que:

- $P_T$ : fração de caminhões e ônibus na corrente de tráfego;
- $P_R$ : fração de veículos de recreação na corrente de tráfego;
- $E_T$ : fator de equivalência de um caminhão ou ônibus na corrente de tráfego; e
- $E_R$ : fator de equivalência de um veículo de recreação na corrente de tráfego.

O HCM (TRB, 2010) apresenta tabelas com o fator de equivalência veicular para caminhões, ônibus e veículos de recreação para trechos com diferentes declividades, comprimento dos aclives e porcentagens de veículos pesados na corrente de tráfego. Dessa forma, é possível converter o fluxo misto, composto por automóveis e caminhões, em fluxo básico (composto apenas por automóveis).

No modelo proposto, não são considerados veículos de recreação, os chamados *trailers*, pois esse tipo de veículo não é comum nas rodovias brasileiras. No HCM (TRB, 2010), o fator de ajuste de greide  $f_g$  e o fator de equivalência de um caminhão ou ônibus na corrente de tráfego  $E_T$  são definidos em função do volume horário de tráfego dividido pelo fator de hora pico  $FHP$  ( $v_{vhp} = \frac{V_h}{FHP}$ ).

Como a taxa de veículos totais #1 é dada em veículos por ano, divide-se essa taxa pela constante “Horas por ano” (8.760 horas/ano), para obter-se o volume de tráfego horário ( $v_h$ ). Em seguida, divide-se pelo  $FHP$ , adotado como 0,90, conforme Equação (5.24).

$$v_{vhp} = \frac{\text{veículos totais \#1}}{\text{Horas por ano} \times \text{Fator de hora pico FHP}} \quad (5.24)$$

Pode-se então determinar tanto o fator de ajuste de greide quanto o equivalente de veículos pesados em função do  $v_{vhp}$ , conforme indicado pelo manual HCM (TRB, 2010) e apresentado na Tabela 5.1.

O Percentual de veículos pesados  $P_T$  é necessário para o cálculo do fator de equivalência, sendo calculado pela Equação (5.25).

$$P_T = \frac{\text{veículos pesados \#1} + \text{veículos de rochas \#1}}{\text{veículos totais \#1}} \quad (5.25)$$

Dessa forma, o  $f_{HV}$  para ajuste do volume é dado pela Equação (5.26).

$$f_{HV} = \frac{1}{(1 + P_T) \times (E_T \text{ para ajuste do volume} - 1)} \quad (5.26)$$

Calculados todos os parâmetros necessários, o volume de tráfego equivalente é dado pela Equação (5.27).

$$\text{Volume de tráfego equivalente} = \frac{v_{vhp}}{f_g \text{ para ajuste do volume} \times f_{hv} \text{ para ajuste do volume}} \quad (5.27)$$

Tabela 5.1 – Fator de ajuste de greide e Equivalente de veículos pesados.

$v_{vhp}$ (veículos/hora)	Fator de ajuste de greide ( $f_g$ )	Equivalente de veículos pesados ( $E_T$ )
$\leq 100$	0,67	2,7
200	0,75	2,3
300	0,83	2,1
400	0,90	2,0
500	0,95	1,8
600	0,97	1,7
700	0,98	1,6
800	0,99	1,4
$\geq 900$	1,00	1,3

Fonte: HCM (TRB, 2010)

Para o cálculo da capacidade média #1 do trecho rodoviário em análise, também são necessários os fatores de ajuste de greide e de equivalência de veículos pesados. No entanto, para o cálculo da capacidade, tais fatores não dependem da variação do volume de hora-pico ( $v_{vhp}$ ). Segundo o HCM (TRB, 2010) em determinações de capacidade, todos os fatores de ajuste devem basear-se em um volume igual ou superior a 900 veículos/h. Para tal volume mínimo, os fatores de ajuste são determinados pelo HCM (TRB, 2010) conforme Equações (5.28) e (5.29).

$$f_g \text{ para ajuste da capacidade} = 1 \quad (5.28)$$

$$\text{Equivalente de veículos pesados} = 1,3 \text{ ucp} \quad (5.29)$$

Assim, calcula-se novamente o fator de ajuste para veículos pesados, para o cálculo da capacidade, conforme Equação (5.30).

$$f_{HV} = \frac{1}{(1 + P_T) \times (\text{Equivalente de veículos pesados} - 1)} \quad (5.30)$$

Além disso, a capacidade máxima sob condições ideais de uma rodovia de pista simples é de 1.700 ucp/h por sentido de tráfego, podendo alcançar 3.200 ucp/h no total dos dois

sentidos (TRB, 2010). Finalmente, pode-se obter a capacidade média do trecho por meio da Equação (5.31) (TRB, 2010).

$$Cap.média \#1 = Cap.máx. \times Fg \text{ para ajuste da cap.} \times Fhv \text{ para ajuste da cap.} \quad (5.31)$$

Após obtido o carregamento de toda a rede, é feita uma análise de cada *link* rodoviário (trecho) com o objetivo de determinar a relação entre volume e capacidade, dividindo-se o volume de tráfego equivalente pela capacidade média do trecho rodoviário, conforme Equação (5.32).

$$\frac{v}{c} \#1 = \frac{\text{Volume de tráfego equivalente \#1}}{\text{Capacidade média \#1}} \quad (5.32)$$

De posse dessa relação, aplica-se a Equação (5.33), determinada pelo *Bureau of Public Roads* – BPR (1964), para a obtenção do tempo de viagem dispendido no trecho rodoviário em análise.

$$t = t_0 \times \left( 1 + \alpha \times \left( \frac{V}{C} \right)^\beta \right) \quad (5.33)$$

Em que:

- $t$ : tempo ajustado para o qual o volume  $V$  pode utilizar o *link* rodoviário;
- $t_0$ : tempo de viagem para a condição de fluxo livre;
- $\alpha$  e  $\beta$ : parâmetros de calibração (geralmente  $\alpha = 0,15$  e  $\beta = 4$ ).

Ou seja, o tempo de viagem do trecho rodoviário pode ser calculado como na Equação (5.34).

$$\text{Tempo médio de viagem \#1} = \text{Tempo de fluxo livre \#1} \times \left( 1 + \alpha \times \left( \frac{v}{c} \#1 \right)^\beta \right) \quad (5.34)$$

O Tempo de fluxo livre #1 é calculado pela extensão do trecho considerado em quilômetros e pela velocidade de fluxo livre, ou velocidade de operação, conforme Equação (5.35).

$$\text{Tempo de fluxo livre \#1} = \frac{\text{Distância \#1}}{\text{Velocidade de fluxo livre \#1}} \quad (5.35)$$



Assim, tem-se o tempo médio de viagem para um trecho específico. Para os demais trechos deve-se proceder com os mesmos cálculos apresentados a fim de se obter os tempos médios de todos os trechos das rotas #1 e #2, bem como da rota compartilhada #3. Por fim, calcula-se o tempo total de cada rota, como mostra a Figura 5.4, sabendo que:

$$\text{Tempo total transp. rota \#1} = \text{Tempo méd. viagem \#1.1} + \text{Tempo méd. viagem \#1.2} \quad (5.36)$$

$$\text{Tempo total transp. rota \#2} = \text{Tempo méd. viagem \#2.1} + \text{Tempo méd. viagem \#2.2} \quad (5.37)$$

$$\text{Tempo total transp. rota \#3} = \text{Tempo méd. viagem \#3.1} + \text{Tempo méd. viagem \#3.2} \quad (5.38)$$

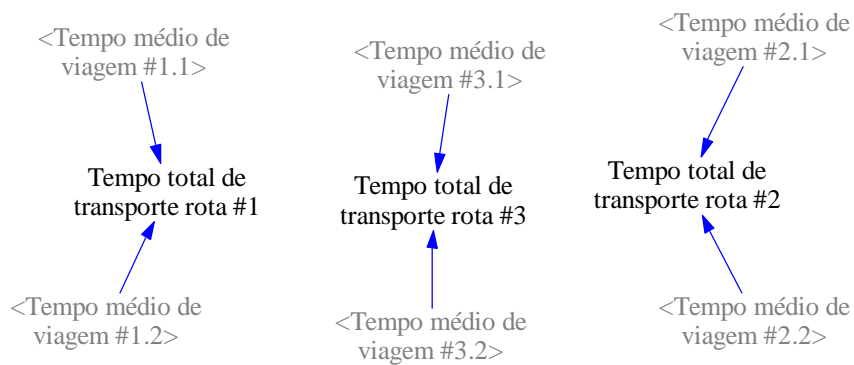


Figura 5.4 – Tempo total de transporte das rotas.  
Fonte: Elaboração própria.

Da mesma forma, ainda nesse módulo, calcula-se a distância total percorrida em cada rota, conforme Figura 5.5, em que:

$$\text{Distância rota \#1} = \text{Distância \#1.1} + \text{Distância \#1.2} \quad (5.39)$$

$$\text{Distância rota \#2} = \text{Distância \#2.1} + \text{Distância \#2.2} \quad (5.40)$$

$$\text{Distância rota \#3} = \text{Distância \#3.1} + \text{Distância \#3.2} \quad (5.41)$$

As informações sobre tempo de viagem e distância de cada rota são importantes para o cálculo do custo operacional de transporte, que impacta na escolha ou preferência do usuário por uma rota em detrimento de outra, cujo detalhamento é tratado no próximo módulo, referente à divisão modal.

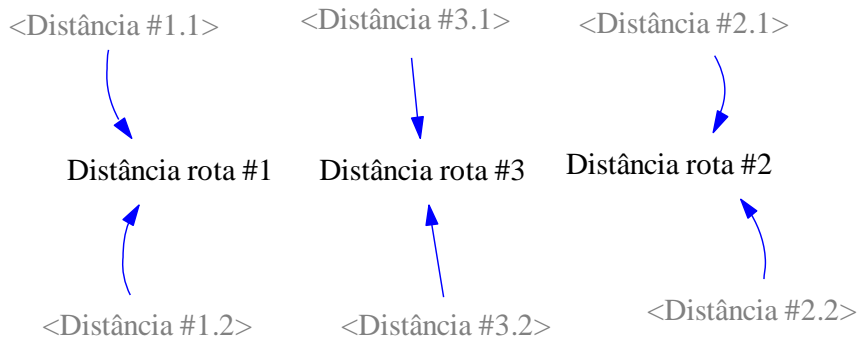


Figura 5.5 – Distância total das rotas.  
Elaboração própria.

### 5.3 Divisão Modal

O terceiro módulo, apresentado na Figura 5.6, refere-se à “*Divisão Modal*” cuja função é calcular, por meio do modelo logit multinomial (Ortúzar e Willumsen, 2001), a proporção do volume de carga a ser transportada por cada rota, que considera a utilidade negativa ou custo generalizado de trafegar por cada opção rodoviária.

Nesse módulo, a escolha modal refere-se à escolha da rota a ser utilizada entre duas opções rodoviárias possíveis entre apenas uma origem e um destino pré-definidos. A escolha entre as rotas pode ser determinada pela função logit multinomial empregada para o modelo de divisão modal (Ortúzar e Willumsen, 2001). Dessa forma, a proporção do volume de carga transportada pela Rota #1 é dada pela Equação (5.42).

$$\text{Proporção volume de carga rota \#1} = \frac{e^{c_1}}{e^{c_1} + e^{c_2}} \quad (5.42)$$

Em que:

- $c_1$ : custo generalizado da Rota #1; e
- $c_2$ : custo generalizado da Rota #2.

Conseqüentemente, a proporção do volume de carga transportada pela Rota #2 é dada pela Equação 5.43.

$$\text{Proporção volume de carga rota \#2} = 1 - \text{Proporção volume de carga rota \#1} \quad (5.43)$$

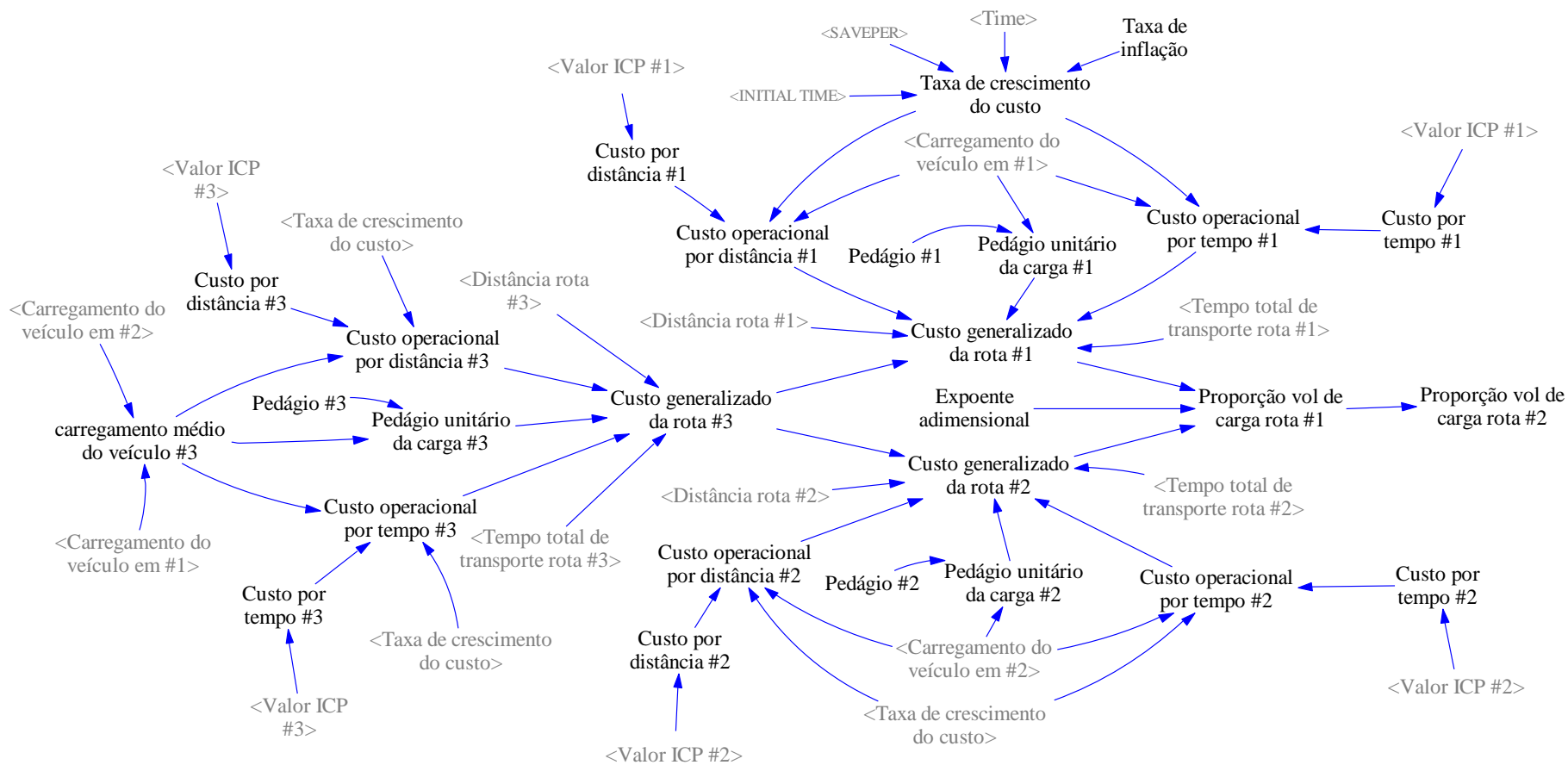


Figura 5.6 – Módulo Divisão Modal.  
 Fonte: Elaboração própria.

O custo generalizado é dependente do tipo de veículo e das condições físicas e operacionais da rodovia, assim é composto por parcelas que variam com a distância percorrida, com o tempo de percurso e com os custos fixos (como o pedágio). Para o cálculo do custo operacional generalizado, utiliza-se a Equação (5.44).

$$CG_{vrp} = (T_{vvp} \times CT_{vvp}) + (D_{rp} \times CD_{vvp}) + CP_v \quad (5.44)$$

Em que:

- $CG_{vvp}$ : custo generalizado incorrido pelo veículo  $v$  ao percorrer um *link* da categoria  $rp$  ( $r$  = tipo de relevo e  $p$  = condição do pavimento);
- $T_{vvp}$ : tempo de percurso do *link* da categoria  $rp$  pelo veículo  $v$ ;
- $CT_{vvp}$ : parâmetro do custo operacional por unidade de tempo para o veículo  $v$  percorrer um *link* da categoria  $rp$ ;
- $D_{rp}$ : extensão do *link* da categoria  $rp$ ;
- $CD_{vvp}$ : parâmetro do custo operacional por unidade de distância para o veículo  $v$  percorrer um *link* da categoria  $rp$ ; e
- $CP_v$ : custo de pedágio do *link* para o veículo da classe  $v$ , podendo ser zero, na ausência de pedágio, ou o valor da tarifa, caso exista um posto de pedágio no *link*.

Dessa forma, o custo generalizado, ou custo de utilidade negativa, da rota em estudo é calculado pela Equação (5.45).

$$\text{Custo gen.} = ((\text{Custo oper. por distância} \times \text{Distância rota}) + (\text{Custo oper. por tempo} \times \text{Tempo transporte rota}) + \text{Pedágio unit. carga}) \quad (5.45)$$

O Custo operacional por distância e o Custo operacional por tempo são funções dos respectivos custos por distância e tempo, que variam em razão da categoria veicular, tipo de pista e condição do pavimento. Como deseja-se saber o custo operacional de transporte por tonelada de carga transportada, divide-se tais custos pelo carregamento do veículo. Além disso, aplica-se uma Taxa de crescimento do custo, que varia ao longo do tempo, conforme Equações (5.46) e (5.47).

$$\text{Custo oper. por distância} = \frac{\text{Custo por distância}}{\text{Carregamento do veículo}} \times \text{Taxa de crescimento do custo} \quad (5.46)$$

$$\text{Custo oper. por tempo} = \frac{\text{Custo por tempo}}{\text{Carregamento do veículo}} \times \text{Taxa de crescimento do custo} \quad (5.47)$$

Os Custos por distância e por tempo que aparecem nas formulações matemáticas serão apresentados na Seção 6.3, pois são parâmetros externos ao modelo, mas que variam em função da categoria veicular, do tipo de pista e da condição do pavimento em determinado intervalo de tempo, ou seja, do problema objeto de estudo.

Destaca-se que o Custo operacional de transporte é inversamente proporcional ao carregamento do veículo, pois quanto maior o carregamento do veículo, menor o custo unitário de transporte.

O Tempo total de transporte Rota #1, a Distância Rota #1, bem como o Carregamento do veículo em #1 são variáveis fornecidas pelo módulo “*Tempo de Viagem*”, já apresentado. O pedágio unitário da carga #1 é dado pela relação entre o valor do pedágio na rota e o carregamento do veículo em #1, conforme Equação (5.48).

$$\text{Pedágio unitário da carga \#1} = \frac{\text{Pedágio \#1}}{\text{Carregamento do veículo em \#1}} \quad (5.48)$$

A Taxa de crescimento do custo é baseada na Taxa de inflação e na sua variação ao longo do tempo, conforme Equação (5.49). Essa taxa de crescimento do custo é aplicada sobre o custo operacional de transporte, bem como sobre os custos com acidentes e manutenção do pavimento, apresentados no módulo “*Custo Social*”.

$$\text{Taxa de crescimento do custo} = (1 + \text{Taxa de inflação})^{\frac{(\text{Time} - \text{Initial Time})}{\text{SAVEPER}}} \quad (5.49)$$

Para a Rota #2, os cálculos são semelhantes. Já para a Rota #3, não se aplica a divisão modal, pois todos os veículos provenientes das duas rotas anteriores deverão utilizar a Rota #3. Assim, o custo generalizado da Rota #3 é somado aos custos generalizados das Rotas #1 e #2. As variáveis do tipo constantes no módulo “*Divisão Modal*” são referentes ao Pedágio, Taxa de inflação, além do Custo por distância e Custo por tempo, cujos valores serão definidos na Seção 6.3, referente ao estudo de caso.

Já a variável Expoente adimensional que aparece neste módulo tem a função de tornar adimensional os custos generalizados, a fim de que se possa aplicar a função exponencial da equação de divisão do volume de carga entre as rotas consideradas.

#### 5.4 Manutenção do Pavimento

O quarto módulo refere-se à “*Manutenção do Pavimento*”, apresentado na Figura 5.7. As operações de manutenção são definidas pela manutenção corretiva e restaurativa e suas aplicações variam de acordo com o Índice de Condição do Pavimento (ICP) antes da manutenção ser realizada. A definição do tipo de manutenção a ser realizada neste módulo é importante para o cálculo do custo anual com manutenção do pavimento e identificação das diferenças de custo com a prática do excesso de peso pelos veículos de carga.

Como visto no Capítulo 2, o Número N de projeto #1 é o número de solicitações do eixo padrão previsto no projeto de dimensionamento do pavimento, com base no VMDA, na previsão de crescimento do VMDA, na vida útil de projeto do pavimento e considerando-se os limites de peso por eixo estabelecidos legalmente, traduzidos pelo fator de veículo (*FV*) da frota. O Número N de projeto é obtido pela Equação (5.50).

$$\text{Número } N \text{ de projeto \#1} = FV \text{ da frota sem excesso de peso} \times \text{Vol. total veículos \#1} \quad (5.50)$$

O *FV* da frota sem excesso de peso foi obtido do próprio modelo (*FV* da Rota #1), no cenário em que o percentual do excesso de peso por eixo é nulo. O volume total de veículos considera o volume médio diário durante o período da vida útil projetada, como expresso pela Equação (5.51).

$$\text{Vol. total veículos \#1} = \text{Volume médio de veículos \#1} \times \frac{\text{Dias}}{\text{ano}} \times \text{Vida útil de projeto} \quad (5.51)$$

A vida útil de projeto da pavimentação é definida como 15 anos e o volume médio de veículos #1 é dada pelo VMDA do ano base, vida útil de projeto e taxa de crescimento do VMDA, conforme expressa em termos das variáveis do modelo pela Equação (5.52).

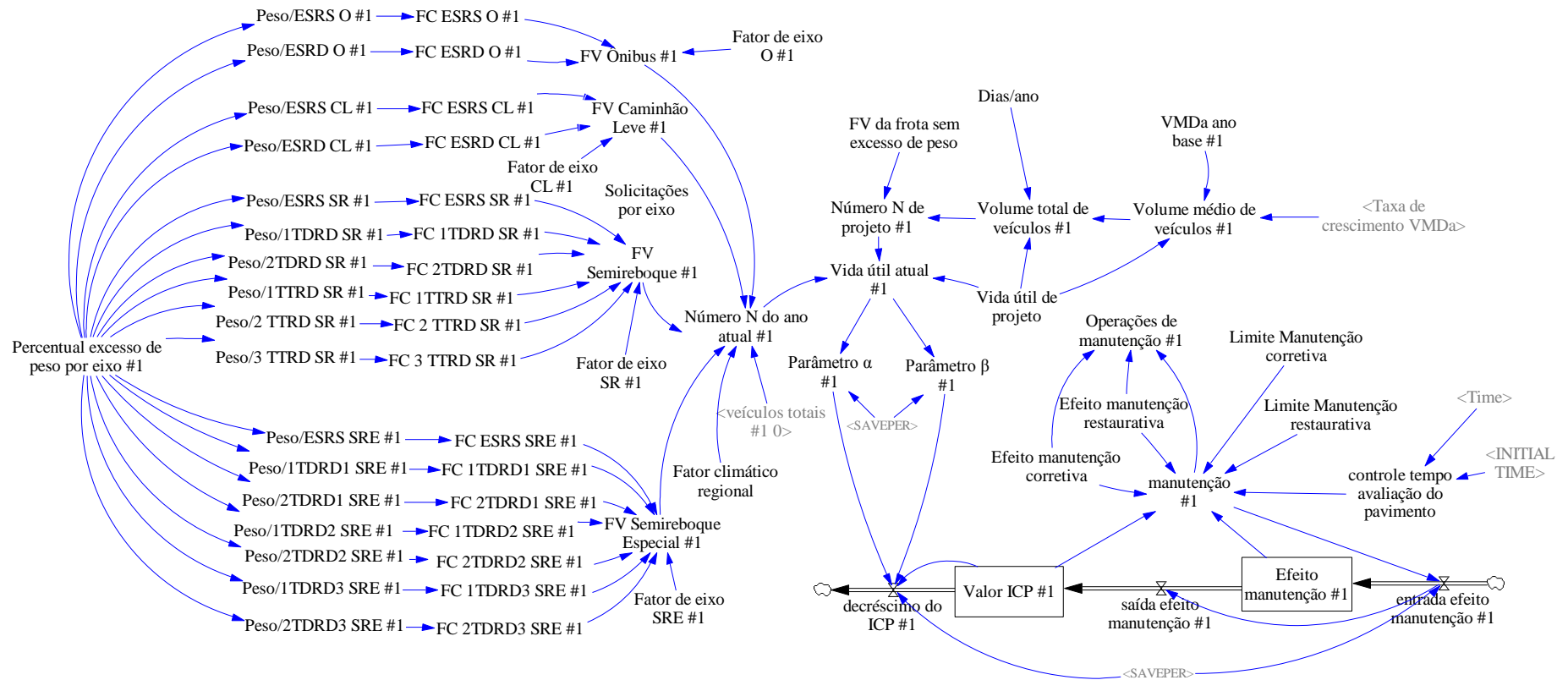


Figura 5.7 – Módulo Manutenção do Pavimento.  
 Fonte: Elaboração própria.

$$Vol. méd. veíc. \#1 = VM Da ano base \#1 x \frac{(2 + Vida \acute{u}til projeto x Taxa cresc. VM Da)}{2} \quad (5.52)$$

O VM DA do ano base é o mesmo utilizado nos trechos do módulo “*Tempo de Viagem*”, obtido do PNCT (DNIT, 2017a), cujo ano base é 2016 e será apresentado na Seção 6.2.

De posse do Número N de projeto #1, calcula-se a vida útil atual do pavimento a cada período da simulação, em função da solicitação do tráfego no respectivo período, conforme Equação (5.53).

$$Vida \acute{u}til atual \#1 = IF THEN ELSE(x > Vida \acute{u}til de projeto, Vida \acute{u}til de projeto, x) \quad (5.53)$$

Em que:

$$x = \frac{Número N de projeto \#1}{Número N do ano atual \#1} \quad (5.54)$$

A formulação matemática da vida útil do pavimento, conforme Equação (5.53), tem como limite máximo a vida útil de projeto, ou seja, 15 anos, e conforme o Número N do ano atual aumenta, a vida útil decai.

Conforme apresentado na Seção 2.1 a respeito do impacto do excesso de peso sobre a pavimentação, o que efetivamente contribui para a degradação acelerada do pavimento e a redução de sua vida útil é o excesso de peso por eixo (Borges, 2012). Além disso, consideram-se apenas os veículos comerciais, visto que os veículos de passeio e motocicletas possuem carga de magnitude desprezível em relação aos veículos comerciais (DNER, 2006).

Torna-se então necessário caracterizar a composição veicular do tráfego de veículos pesados das rotas em estudo, composto por ônibus (dois eixos), caminhão leve (dois eixos), semirreboque (seis eixos) e semirreboque especial (sete eixos). Ressalta-se que a composição veicular das rotas em estudo não é tão simples quanto apresentada por apenas quatro categorias veiculares com as citadas configurações de eixos, mas em função da enorme variedade de categorias e números de eixos, decidiu-se por quatro categorias representativas do tráfego de veículos pesados, cuja decisão foi baseada em Pesquisas de Contagem de Tráfego do PNCT (DNIT, 2017a) realizadas nas rotas em



estudo. O percentual de cada categoria veicular será apresentado na Seção 6.4, relativo aos dados do estudo de caso para este módulo.

Assim, para o cálculo do Número N do ano atual #1, considera-se o número de veículos totais (fornecido pelo módulo “*Tempo de Viagem*”), o *FV* da frota composta pelas quatro categorias veiculares representativas (caminhão leve, ônibus, semirreboque e semirreboque especial) e o Fator climático regional (*FR*), de acordo com a Equação (5.55).

$$N^{\circ} N \text{ ano atual} = (FV C. Leve + FV O. + FV S. + FV S. Esp.) \times \text{veíc. totais} \times FR \quad (5.55)$$

O Fator climático regional é definido como sendo igual a 1,0, conforme DNER (2006). Já o Fator de veículo (*FV*) é definido como a soma dos fatores de carga (*FC*) de cada eixo, multiplicado pelo fator de eixo (*FE*), conforme Equação (5.56) para a categoria Ônibus.

$$FV \text{ Ônibus \#1} = (FC \text{ ESRD O \#1} + FC \text{ ESRS O \#1}) \times FE \text{ O \#1} \times \text{Solicitações por eixo} \quad (5.56)$$

Para as demais categorias, o Fator de Veículo é calculado de forma semelhante. A variável Solicitações por eixo é definida como 1 (uma) vez por eixo, considerando que cada eixo solicita o pavimento apenas uma vez. O Fator de eixo O #1 é definido como o número de eixos do ônibus multiplicado pelo percentual de ônibus que compõe a frota em estudo, em que o ônibus considerado possui dois eixos e este representa 3% da frota das rotas em estudo, conforme Equação (5.57). Os percentuais das demais categorias veiculares serão apresentados na Seção 6.4.

$$\text{Fator de eixo O \#1} = 2 \times 0.03 \quad (5.57)$$

Para o cálculo dos Fatores de Carga (*FC*) foi utilizado o método da AASHTO (DNIT, 2006a), conforme Equações (5.58) – (5.61) para cada tipo de eixo – eixo simples de rodagem simples (ESRS); eixo simples de rodagem dupla (ESRD); tandem duplo de rodagem dupla (TDRD); e tandem triplo de rodagem dupla (TTRD).

$$FC \text{ ESRS} = \left(\frac{P}{7,77}\right)^{4,32} \quad (5.58)$$

$$FC \text{ ESRD} = \left(\frac{P}{8,17}\right)^{4,32} \quad (5.59)$$

$$FC\ TDRD = \left(\frac{P}{15,08}\right)^{4,14} \quad (5.60)$$

$$FC\ TTRD = \left(\frac{P}{22,95}\right)^{4,22} \quad (5.61)$$

Nas Equações (5.58) – (5.61),  $P$  corresponde ao peso por eixo, definido como o peso permitido legalmente para cada tipo de eixo, já considerando a tolerância de 10% adotada legalmente e considerando o percentual do excesso de peso por eixo, de acordo com a Equação (5.62).

$$Peso\ ESRS\ O\ \#1 = 6.6 \times (1 + \text{Percentual excesso de peso por eixo } \#1) \quad (5.62)$$

Para os demais tipos de eixos, prossegue-se com cálculos semelhantes. A redução da vida útil está relacionada ao ICP por meio dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , apresentados na Seção 2.1 referente ao desempenho do pavimento e definidos por Sun e Liu (1995). Os valores de  $\alpha$  e  $\beta$  utilizados referem-se a aqueles propostos por Liu e Mu (2015), conforme Equações (5.63) e (5.64).

$$\text{Parâmetro } \alpha\ \#1 = IF\ THEN\ ELSE(y > 2, (y \times 0.6), (y \times 0.3)) \quad (5.63)$$

$$\text{Parâmetro } \beta\ \#1 = IF\ THEN\ ELSE(y > 1.5, IF\ THEN\ ELSE(y < 2, (0.5), (0.1)), 0.8) \quad (5.64)$$

Em que:

$$y = \frac{\text{Vida útil atual } \#1}{SAVEPER} \quad (5.65)$$

Os autores ainda definem o decréscimo do ICP em função dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  (Sun e Liu, 1995), conforme Equação (5.66).

$$\text{decrécimo do ICP } \#1 = \frac{\text{Valor ICP } \#1 \times (e^{(-\text{Parâmetro } \alpha\ \#1)^{\text{Parâmetro } \beta\ \#1}})}{SAVEPER} \quad (5.66)$$

Destaca-se a limitação do modelo quanto ao uso da relação entre a vida útil e a condição do pavimento proposta por Sun e Liu (1995) com base em estudos em rodovias chinesas. No entanto, como este não é o foco deste estudo, sugere-se essa relação como objeto de pesquisas futuras para aprimoramento do trabalho.

O índice de condição do pavimento trata-se de um índice que avalia a qualidade da pavimentação. Dessa forma, a variável do tipo estoque Valor ICP acumula a diferença entre o efeito da manutenção e o decréscimo do ICP, provocado pelo tráfego de veículos, de acordo com a Equação (5.67).

$$\text{Valor ICP \#1} = \int_{t_0}^t (\text{saída efeito manutenção \#1} - \text{decréscimo do ICP \#1}) dt + E(t_0) \quad (5.67)$$

O Valor do ICP é utilizado como um dos parâmetros de decisão para o tipo de manutenção a ser realizada. Outros parâmetros de decisão utilizados são o estoque de efeito da manutenção e o controle do tempo de avaliação do pavimento, como mostra o Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Parâmetros para decisão do tipo de manutenção a ser realizada.

Valor do ICP	Efeito da manutenção	Controle de tempo avaliação pavimento	Manutenção
> Limite manutenção corretiva	≠ 0	= 0	Nenhuma
> Limite manutenção restaurativa	-	-	Corretiva
< Limite manutenção restaurativa	-	-	Restaurativa

Fonte: Elaboração própria.

A primeira condição para a realização da manutenção é o nível da qualidade atual do pavimento, ou seja, se o ICP atual é maior do que o limite para a realização da manutenção corretiva, não se necessita de nenhuma intervenção no pavimento naquele instante de tempo. A segunda condição para a solicitação de intervenções no pavimento é não ter nenhuma operação de manutenção já em andamento (efeito da manutenção diferente de zero), ou seja, mesmo que o ICP atingir um nível abaixo do limite indicado, não se deve solicitar outra intervenção até que a anterior tenha terminado. Por fim, a solicitação de intervenções de manutenção deve respeitar o intervalo de tempo, no qual não se faz avaliações da condição do pavimento. Isso ocorre pois, na prática, o levantamento do ICP nas rodovias brasileiras não é feito todo ano.

Considerando-se as três condições apresentadas, se o ICP estiver abaixo do limite para manutenção corretiva, mas acima do limite para manutenção restaurativa, faz-se a manutenção corretiva. Caso contrário, se o ICP estiver abaixo do limite para manutenção restaurativa, faz-se esse tipo de manutenção.

Conforme já mencionado, o levantamento do ICP não é realizado todo ano, dessa forma, optou-se por simular o intervalo de tempo no qual a avaliação da condição do

pavimento é realizada. A Equação (5.68) mostra o exemplo para um intervalo de três anos entre as avaliações do ICP.

$$\begin{aligned}
 \text{controle tempo avaliação do pavimento} &= IF THEN ELSE((Time - INITIAL TIME) \\
 &= 3: OR: (Time - INITIAL TIME) = 6: OR: (Time - INITIAL TIME) \\
 &= 9: OR: (Time - INITIAL TIME) = 12: OR: (Time - INITIAL TIME) \quad (5.68) \\
 &= 15: OR: (Time - INITIAL TIME) = 18: OR: (Time - INITIAL TIME) \\
 &= 21, 1, 0)
 \end{aligned}$$

Se a condição for respeitada, ou seja, se o intervalo de tempo entre as avaliações é igual a três anos, a variável do controle de tempo recebe o valor 1 (um), caso contrário, recebe o valor 0 (zero).

O resultado da variável manutenção #1, alimenta o fluxo de entrada do efeito da manutenção #1, conforme Equação (5.69).

$$\text{entrada efeito manutenção \#1} = \frac{\text{manutenção \#1}}{SAVEPER} \quad (5.69)$$

O estoque do efeito da manutenção #1 acumula a entrada do efeito, que ocorre instantaneamente quando a solicitação da manutenção é realizada, conforme Equação (5.70), mas com um atraso na aplicação de tal efeito sobre o ICP, devido ao tempo considerável de realização das obras, que pode variar de 2 a 5 anos.

$$\text{Efeito mant. \#1} = \int_{t_0}^t (\text{entrada efeito mant. \#1} - \text{saída efeito mant. \#1}) dt + E(t_0) \quad (5.70)$$

A saída do efeito da manutenção #1 é atrasada pela função *Delay Fixed*, que recebe a variável a sofrer o atraso, bem como o período de atraso considerado, como mostra a Equação (5.71).

$$\text{saída efeito manutenção \#1} = DELAY FIXED(E. E. M. \#1, 2, E. E. M. \#1) \quad (5.71)$$

Em que E.E.M. #1 refere-se à Entrada do efeito da manutenção. Esse exemplo da Equação (5.71) mostra que a manutenção solicitada em determinado ano, só será concluída 2 anos após a solicitação e, durante esse tempo, não poderão ser feitas novas solicitações de intervenção no pavimento. A saída do efeito da manutenção #1 alimenta o estoque do Valor ICP #1 após o tempo de atraso determinado para a realização da

manutenção. Enquanto o efeito da manutenção não é aplicado, o valor do ICP continua decrescendo em função do tráfego de veículos.

Por fim, a variável Operações de manutenção #1 é definida pelos valores 1 e 0,5, para as operações de manutenção restaurativa e corretiva, respectivamente, e zero caso não haja necessidade de intervenções no pavimento, conforme apresentado no Quadro 5.2. Tais valores serão usados posteriormente para o cálculo do custo anual com manutenção do pavimento rodoviário.

Quadro 5.2 – Variável Operações de manutenção em função do tipo de manutenção.

Manutenção	Valor “Operações de manutenção”
Restaurativa	1,0
Corretiva	0,5
Nenhuma manutenção	0,0

Fonte: Elaboração própria.

As variáveis do tipo constante neste módulo “*Manutenção do Pavimento*” são Limite para manutenção corretiva e Limite para manutenção restaurativa que se referem ao limite do ICP para que sejam realizados os devidos tipos de manutenção, bem como o Efeito da manutenção corretiva e o Efeito da manutenção restaurativa, que se referem ao efeito advindo da operação de manutenção sobre o ICP. Além disso, deve-se determinar o percentual de cada categoria veicular na frota em estudo. Tais parâmetros serão definidos na Seção 6.4 referente ao estudo de caso. Já os limites legais de peso por eixo para cada tipo de eixo envolvido no cálculo do número de solicitações do eixo padrão equivalente foram determinados na Seção 2.3.

## 5.5 Custo Social do Transporte de Carga

O quinto módulo de estoque e fluxo apresenta o “*Custo Social do Transporte de Carga*”, que se subdivide em custos com manutenção do pavimento e custos com acidentes de tráfego. A Figura 5.8 representa o diagrama de estoque e fluxo para os custos de manutenção do pavimento.

A variável do tipo estoque denominada Custo acumulado da manutenção do pavimento acumula o custo anual com manutenção do pavimento por todo o período da simulação, conforme Equação (5.72).

$$Custo\ acum.\ mant.\ pavimento = \int_{t_0}^t (Custo\ anual\ mant.\ pavimento) dt + E(t_0) \quad (5.72)$$

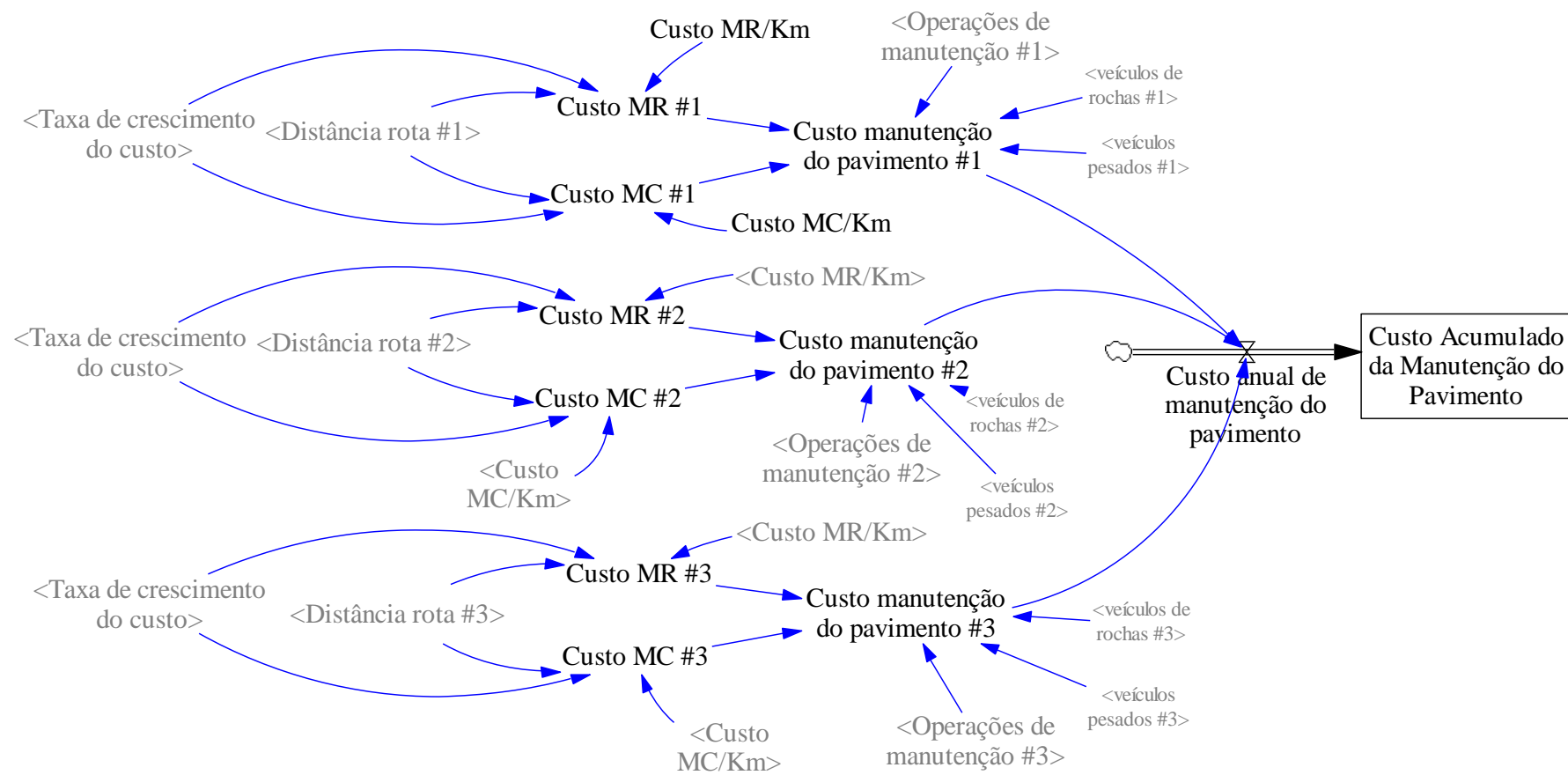


Figura 5.8 – Módulo Custo Social do Transporte de Carga – Manutenção do pavimento.  
 Fonte: Elaboração própria.

A variável de fluxo denominada Custo anual de manutenção do pavimento é a soma dos custos com manutenção em cada uma das três rotas em estudo, de acordo com a Equação (5.73).

$$\text{Custo anual de manutenção do pavimento} = \sum_{i=1}^3 (\text{Custo manutenção do pavimento } \#i) \quad (5.73)$$

O Custo de manutenção do pavimento é calculado de forma semelhante para as três rotas, em função do tipo de intervenção a ser realizada, definida no módulo “*Manutenção do Pavimento*”, e dos custos de cada tipo de manutenção, como mostra o Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Variável Operações de manutenção em função do tipo de manutenção.

Manutenção	Valor “Operações de manutenção”	Custo manutenção do pavimento
Restaurativa	1,0	<i>Custo manutenção restaurativa x P<sub>VR</sub></i>
Corretiva	0,5	<i>Custo manutenção corretiva x P<sub>VR</sub></i>
Nenhuma manutenção	Zero	Zero

Fonte: Elaboração própria.

Em que  $P_{VR}$  é o percentual dos veículos de rochas em relação ao total de veículos pesados. Se não é necessária nenhuma intervenção de manutenção no pavimento, o custo é nulo, caso contrário, se a variável operações de manutenção é igual a 0,5 ou 1,0, o custo será o Custo para manutenção corretiva ou Custo para manutenção restaurativa, respectivamente, multiplicado pelo percentual de veículos de rochas em relação ao total de veículos pesados, pois o interesse é avaliar a influência apenas dessa categoria veicular específica sobre os custos de manutenção.

Os custos com manutenção corretiva (MC) e restaurativa (MR) são definidos em função do custo por quilômetro, da distância da rota e da taxa de crescimento do custo, conforme Equações (5.74) e (5.75) que são dedicadas à Rota #1.

$$\text{Custo MC \#1} = \text{Custo} \frac{MC}{Km} x \text{Distância rota \#1} x \text{Taxa de crescimento do custo} \quad (5.74)$$

$$\text{Custo MR \#1} = \text{Custo} \frac{MR}{Km} x \text{Distância rota \#1} x \text{Taxa de crescimento do custo} \quad (5.75)$$

Os custos com manutenção do pavimento nas Rotas #2 e #3 são calculados de maneira semelhante ao da Rota #1.

A Taxa de crescimento do custo é a mesma utilizada para o custo operacional em função da taxa de inflação, fornecida pelo módulo “*Divisão Modal*”. A distância de cada rota é fornecida pelo módulo “*Tempo de Viagem*” e os Custos MR/Km e MC/Km são dados externos, definidos como variáveis constantes e serão apresentados na Seção 6.5.

A segunda parte do módulo “*Custo Social do Transporte de Carga*” refere-se aos custos com acidentes rodoviários, como mostra o diagrama de estoque e fluxo apresentado na Figura 5.9.

A variável do tipo estoque Custo acumulado acidentes de tráfego acumula os custos anuais com acidentes rodoviários ao longo de todo o período de simulação (2016-2030), conforme Equação (5.76).

$$Custo\ acum.\ acidentes\ de\ tráfego = \int_{t_0}^t (custo\ anual\ acidentes\ de\ tráfego) dt + E(t_0) \quad (5.76)$$

A variável de fluxo Custo anual com acidentes de tráfego é a soma dos custos com acidentes nas três rotas em estudo por ano, de acordo com a Equação (5.77).

$$Custo\ anual\ acidentes\ de\ tráfego = \sum_{i=1}^3 (custo\ acidentes\ tráfego\ #i) \quad (5.77)$$

Existem três tipos de gravidade dos acidentes rodoviários: acidente com óbito (ACO); acidente com vítima (ACV); e acidente sem vítima (ASV). Para cada gravidade de acidente existe um custo associado. Dessa forma, os custos com acidentes de tráfego (CAT) nas três rotas são calculados de forma semelhante, em função do percentual de cada tipo de acidente, previsão do número total de acidentes e custo para cada tipo de acidente envolvido, além da taxa de crescimento do custo, conforme Equação (5.78).

$$CAT = prev.\ acid. \times \sum_{i=1}^3 (tipo\ de\ acidente\ i \times custo\ acidente\ i) \times Taxa\ cresc.\ custo \quad (5.78)$$

A previsão de acidentes é definida em função do VMDA e da distância percorrida, de acordo com o modelo de previsão de acidentes proposto pelo *Highway Safety Manual User Guide – HSM* (TRB, 2014), como apresentada na Equação (5.79).



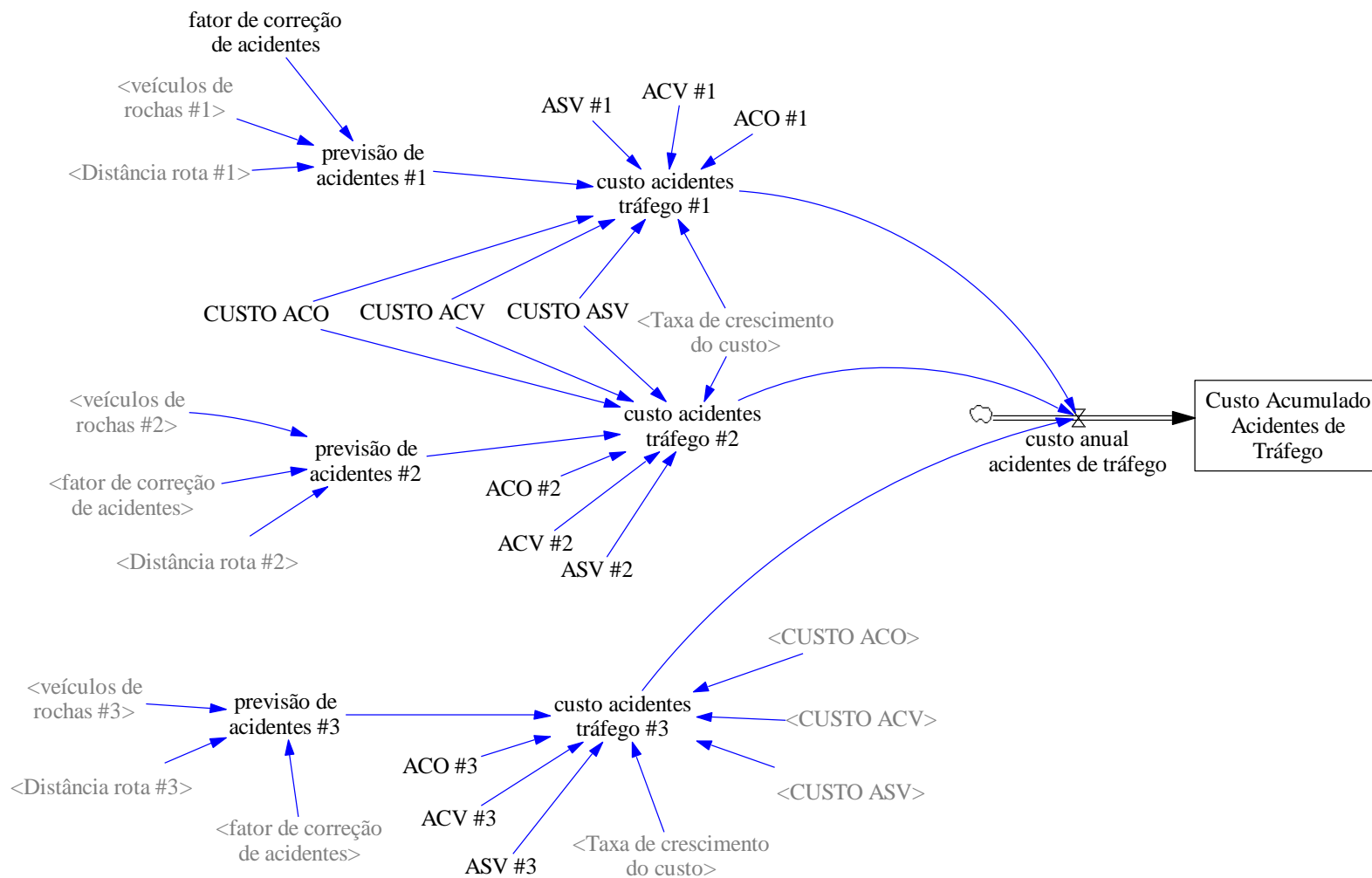


Figura 5.9 – Módulo Custo Social do Transporte de Carga – Acidentes.  
 Fonte: Elaboração própria.

$$\text{previsão de acidentes} = \text{veic.rochas} \times \text{Distância rota} \times 10^{-6} \times e^{-0.312} \times \text{fator acidentes} \quad (5.79)$$

O VMDA de interesse no estudo são os veículos transportadores de rochas ornamentais, fornecido pelo módulo “*Tempo de Viagem*”, bem como as distâncias das rotas. O fator de correção de acidentes é necessário e indicado pelo HSM caso as rotas em estudo não estejam sob as condições ideais indicadas pelo manual. Tal fator de correção será apresentado na Seção 6.5, bem como os demais parâmetros constantes, obtidos de fontes externas ao modelo, como o percentual de cada tipo de gravidade dos acidentes, típicos das rotas sob análise, e os custos envolvidos.

## 5.6 Avaliação de Políticas

Por fim, o sexto e último módulo do modelo de estoque e fluxo, “*Avaliação de Políticas*”, apresenta o cálculo do custo anual e acumulado do transporte de carga em função dos custos generalizados provenientes do “*Módulo Divisão Modal*” e os custos sociais já calculados no módulo “*Custo Social do Transporte de Carga*”. A Figura 5.10 apresenta o diagrama de estoque e fluxo para o módulo “*Avaliação de Políticas*”.

O objetivo do módulo “*Avaliação de Políticas*” é avaliar o custo total do transporte de carga, considerando os diferentes pesos ou importâncias dados às esferas econômica e social para, a partir de então, propor políticas estratégicas mais eficientes no que tange à variação no percentual do excesso de peso e carregamento dos veículos de cargas.

A variável do tipo estoque Custo acumulado de transporte, acumula o custo anual de transporte das Rotas #1 e #2, conforme Equação (5.80).

$$\text{Custo acumulado de transporte} = \int_{t_0}^t (\text{custo anual de transporte}) dt + E(t_0) \quad (5.80)$$

Para o custo anual de transporte, ao contrário dos custos sociais, não se segrega a Rota #3, pois a divisão modal é aplicada apenas nas Rotas #1 e #2, já que o fluxo de tráfego de ambas as rotas é convergido para a Rota #3. No entanto, o cálculo do custo generalizado da Rota #3 é somado ao custo generalizado das duas rotas antecedentes. Dessa forma, têm-se o custo generalizado da Rota #3 embutido no custo das Rotas #1 e #2. Assim, o custo anual de transporte é dado pela Equação (5.81).

$$\text{custo anual transporte} = \sum_{i=1}^2 (\text{Volume carga rota } \#i \times \text{Custo generalizado rota } \#i) \quad (5.81)$$

Os Volumes de carga das Rotas #1 e #2 são fornecidos pelo módulo “*Previsão do Volume de Carga*” e os Custos generalizados das Rotas #1 e #2 são fornecidos pelo módulo “*Divisão Modal*”.

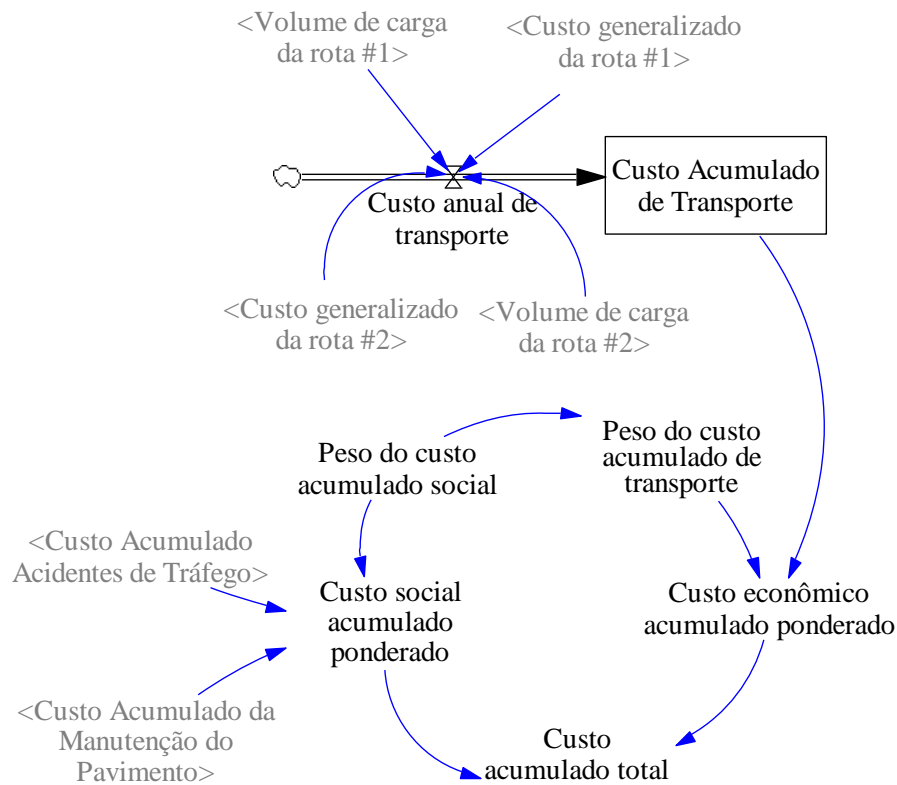


Figura 5.10 – Módulo Avaliação de Políticas para o Transporte de Carga.  
Fonte: Elaboração própria.

O Custo econômico acumulado ponderado é dado pelo estoque do custo acumulado de transporte e pelo peso (importância) de tal custo, conforme Equação (5.82).

$$\text{Custo econ. acum. pond.} = \text{Custo acum. transporte} \times \text{Peso custo acum. transporte} \quad (5.82)$$

Da mesma forma, o Custo social acumulado ponderado (CSAP) é dado pela soma dos custos de manutenção do pavimento e custos de acidentes, multiplicado pelo peso dos custos sociais, conforme Equação (5.83).

$$\text{CSAP} = (\text{Custo Manutenção Pavim.} + \text{Custo Acidente Tráf.}) \times \text{Peso custo acum. social} \quad (5.83)$$

O peso do custo acumulado de transporte varia em função do peso do custo acumulado social, conforme Equação (5.84).

$$\text{peso do custo acumulado de transporte} = 1 - \text{Peso do custo acumulado social} \quad (5.84)$$

O peso do custo acumulado social é utilizado para a elaboração dos cenários, em que seu valor varia de 0 (sem nenhuma importância) a 1,0 (com extrema importância) em relação ao custo econômico. Por fim, o Custo acumulado total é a soma dos custos econômicos e sociais de todas as rotas envolvidas, conforme Equação (5.85).

$$\text{Custo acum. total} = \text{Custo econômico acum. pond.} + \text{Custo social acum. pond.} \quad (5.85)$$

Dessa forma, pode-se avaliar o impacto sobre o custo total do sistema quando se varia o percentual do excesso de peso no carregamento dos veículos de carga, bem como pela variação da importância de cada tipo de custo para os tomadores de decisão. Para o módulo “*Avaliação de Políticas*” não há nenhum parâmetro de entrada necessário.

## 6 PARÂMETROS PARA A SIMULAÇÃO DO MODELO

O modelo de simulação proposto é dividido em 6 (seis) módulos como apresentado no Capítulo 5, a saber: “*Previsão do volume de carga*”, “*Tempo de Viagem*”, “*Divisão modal*”, “*Manutenção do pavimento*”, “*Custo social do transporte de carga*” e “*Avaliação de políticas*”. Cada módulo possui variáveis classificadas como do tipo estoque, fluxo, auxiliares e constantes de acordo com a teoria da Dinâmica de Sistemas.

O equacionamento matemático das variáveis do tipo estoque, fluxo e auxiliares já foi apresentado na formulação do modelo (Capítulo 5). Neste capítulo, apresenta-se os valores das constantes, específicas para a aplicação do estudo de caso proposto.

Para a determinação do período de simulação, adota-se o período de 15 anos, correspondendo ao tempo de duração média do pavimento e compatível com as necessidades da análise econômica, relativo ao intervalo entre 2016 e 2030.

### 6.1 Parâmetros para o módulo Previsão do Volume de Carga

No módulo referente à “*Previsão do volume de carga*”, deve-se obter como parâmetro de entrada a Taxa de crescimento do volume de carga. Para tanto, o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior mantém, por meio da Secretaria de Comércio Exterior – SECEX, a plataforma Alice Web para análise das estatísticas de comércio exterior do governo brasileiro.

Dessa forma, obteve-se os dados de exportação de rochas ornamentais do município de Nova Venécia dos itens categorizados pela Nomenclatura Comum do Mercosul – NCM (Ministério de Minas e Energia, 2009), a saber:

- NCM 2506 – blocos e chapas brutas de quartzitos;
- NCM 2515 – blocos e chapas brutas de mármore e rochas carbonáticas correlatas;
- NCM 2516 – blocos e chapas brutas de granitos e rochas silicáticas correlatas; e
- NCM 6802 – rochas processadas especiais, envolvendo, sobretudo, chapas polidas e lajotas padronizadas de granitos e mármore, além de seus congêneres (quartzitos, travertinos, calcários, pedra-sabão).

Os valores das exportações dos produtos referenciados, provenientes do município de Nova Venécia – ES, no período de janeiro de 2005 a dezembro de 2017 são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Exportação de rochas ornamentais de Nova Venécia – ES (Kg).

Ano	NCM				Total
	2506	2515	2516	6802	
2005		30.431	2.393.573	5.632.455	8.056.459
2006			7.442.520	11.435.672	18.878.192
2007			1.752.770	11.895.091	13.647.861
2008			2.304.996	10.502.843	12.807.839
2009			6.355.640	11.417.276	17.772.916
2010			14.334.351	13.837.059	28.171.410
2011			22.558.580	13.309.044	35.867.624
2012			32.982.880	13.848.161	46.831.041
2013			24.839.738	26.069.716	50.909.454
2014	96.340		1.700.470	36.431.006	38.227.816
2015			14.298.731	28.429.215	42.727.946
2016	717.265		17.527.787	23.318.152	41.563.204
2017	604.500	39.526	11.136.799	15.965.578	32.230.873

Fonte: Alice Web (2017).

No entanto, sabe-se que a produção de rochas ornamentais não é totalmente destinada ao mercado externo, pois atende também a demanda do mercado interno brasileiro. Chiodi Filho (2009a) estima que em média 34% da produção brasileira de rochas estava voltada para o mercado externo entre 2005 e 2008. Na ausência de dados sobre a produção de rochas do município de Nova Venécia, utilizou-se esse percentual para estimar a produção com base nos valores das exportações obtidos, como mostra a Figura 6.1.

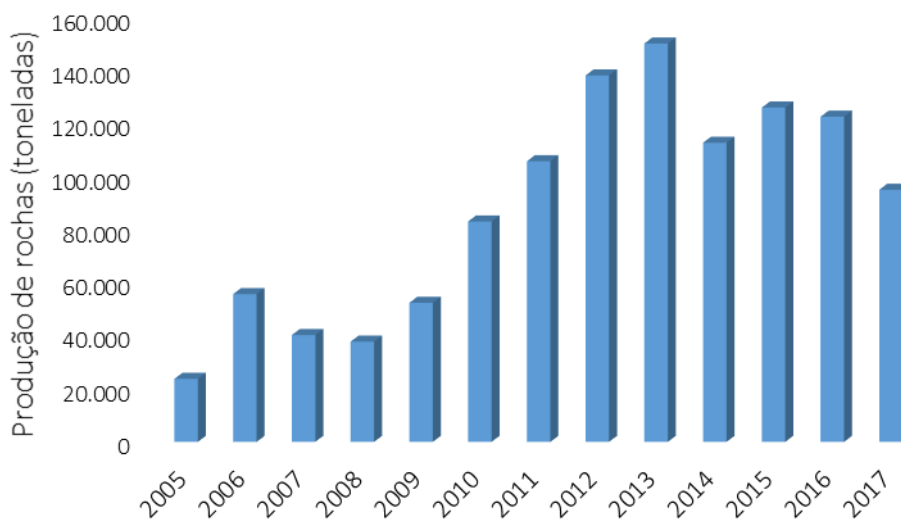


Figura 6.1 – Estimativa da produção de rochas ornamentais de Nova Venécia – ES.

Fonte: Elaborada pela autora com base em Alice Web (2017) e Chiodi Filho (2009a).

Observa-se um crescimento na produção de rochas no período entre 2008 e 2013 e uma oscilação nos demais períodos, com uma média geral de crescimento de 8% ao ano. Quando se desconsidera o ano de 2017, pois o ano base para o início da simulação é 2016, o percentual de crescimento é de 11% ao ano. Dessa forma, optou-se por analisar ambas as possibilidades para a taxa de crescimento do volume de carga, com 8% e 11% ao ano.

Por fim, o parâmetro SAVEPER, também utilizado em outros módulos, serve para ajustar as unidades das demais variáveis do modelo.

$$SAVEPER = 1 \text{ ano} \quad (6.1)$$

## 6.2 Parâmetros para o módulo Tempo de Viagem

Para o módulo “*Tempo de Viagem*”, necessita-se do VMDA de cada trecho das rotas em análise, obtido do projeto PNCT (DNIT, 2017a) e apresentado na Tabela 6.2. Cada ID corresponde a um determinado sub-trecho, pertencente ao Sistema Nacional de Viação – SNV, com a identificação da respectiva rodovia (campo BR), jurisdição (federal, federal delegada ou estadual), tipo de pavimentação (todos pavimentados, com exceção do ID 19843 do tipo leito natural) e do tipo de pista (todos os trechos são em pista simples).

A Tabela 6.2 apresenta o volume de tráfego para veículos leves e pesados, nos dois sentidos de fluxo, sendo o sentido AB o sentido topográfico crescente, e o sentido BA, o sentido topográfico decrescente.

No entanto, a base georreferenciada do *software Transcad 5.0*, no qual foi realizada a modelagem do VMDA, apresenta cada sub-trecho do SNV em um sentido topográfico de crescimento. Dessa forma, inicialmente foi necessário identificar, para cada sub-trecho, o sentido correto para análise, tendo em vista o objetivo de identificar as viagens realizadas no sentido de Nova Venécia para o Porto de Vitória. Os sentidos de análise do fluxo de cada sub-trecho estão destacados na Tabela 6.2.

Para cada trecho em análise, considerou-se o volume médio dos sub-trechos SNV que o compõe. Assim, o volume de veículos leves e pesados, identificados no ano base de simulação do modelo (2016), é resumido na Tabela 6.3.

Tabela 6.2 – Estimativa do VM DA para os trechos em análise.

Trechos	ID	BR	JURISDICA O	TIPO_PNV	PISTA	AB_Leves	AB_Pesados	BA_Leves	BA_Pesados	AB_Total	BA_Total	Fluxo Total
#1.1 NV-CO	8563	381	Fed.delegada	PAV	Simples	1388	590	1382	589	1979	1971	3950
	8509	137	Estadual	PAV	Simples	174	75	183	79	248	261	510
	8440	137	Estadual	PAV	Simples	174	75	183	79	248	261	510
	8395	137	Estadual	PAV	Simples	536	181	601	213	717	814	1532
	8328	80	Estadual	PAV	Simples	1212	357	1247	405	1569	1653	3222
	8305	80	Estadual	PAV	Simples	1294	387	1308	432	1681	1740	3421
	8196	80	Estadual	PAV	Simples	1347	420	1367	472	1767	1839	3605
	8139	80	Estadual	PAV	Simples	1703	653	1779	655	2356	2434	4790
#1.2 CO-JN	8057	259	Federal	PAV	Simples	1769	591	1719	593	2360	2312	4673
	8052	259	Federal	PAV	Simples	1769	591	1719	593	2360	2312	4673
	8042	259	Federal	PAV	Simples	1373	461	1368	460	1834	1828	3662
	29647609 <sup>1</sup>	259	Federal	PAV	Simples	2378	794	2330	791	3172	3122	6293
#2.1 NV-JÁ	8564	381	Fed.delegada	PAV	Simples	1421	618	1415	617	2039	2032	4072
	8551	381	Fed.delegada	PAV	Simples	1471	618	1467	617	2089	2084	4174
	19843			LEN	Simples	558	219	536	227	777	762	1540
	8434	430	Estadual	PAV	Simples	360	90	374	100	450	474	923
#2.2 JA-JN	8409	101	Federal	PAV	Simples	2706	1060	2676	1045	3767	3721	7487
	8 237	101	Federal	PAV	Simples	2751	1040	2710	1039	3791	3749	7540
	8169	101	Federal	PAV	Simples	2807	1040	2844	1039	3847	3883	7731
	8116	101	Federal	PAV	Simples	4302	1590	4627	1847	5892	6474	12365
	8110 <sup>1</sup>	101	Federal	PAV	Simples	4302	1590	4627	1847	5892	6474	12365
	8076	101	Federal	PAV	Simples	4302	1590	4627	1847	5892	6474	12365
	7925 <sup>2</sup>	101	Federal	PAV	Simples	2559	1155	2765	1141	3715	3905	7620
#3.1 JN-FU	7762	101	Federal	PAV	Simples	4732	2172	5015	2221	6904	7236	14140
	7815	101	Federal	PAV	Simples	5180	2407	5078	2429	7587	7507	15093
#3.2	7681	101	Federal	PAV	Simples	6454	2038	6611	2127	8492	8738	17231
FU-SE	7545 <sup>2</sup>	101	Federal	PAV	Simples	6577	2022	6746	1949	8599	8696	17295

Nota: As células destacadas em cinza representam o volume de veículos no sentido topográfico de interesse para análise nesse trabalho.

Fonte: DNIT (2017)



Tabela 6.3 – Estimativa do VMDA médio de cada trecho.

<b>Rotas</b>	<b>Trechos</b>	<b>VMDA Leves</b>	<b>VMDA Pesados</b>	<b>Total</b>
#1	#1.1 – NV-CO	998	365	1.363
	#1.2 – CO-JN	1.784	609	2.394
#2	#2.1 – NV-JA	947	388	1.335
	#2.2 – JA-JN	3.385	1.293	4.678
#3	#3.1 – JN-FU	4.956	2.289	7.245
	#3.2 – FU-SE	6.515	2.030	8.546

Fonte: Elaborada pela autora com base em DNIT (2017).

Segundo o Manual de Estudos de Tráfego (DNIT, 2006a), o tráfego possui taxas de crescimento anuais de variação relativamente lenta. De acordo com o manual, tem sido comum adotar uma taxa de crescimento anual de 3%. Por isso, adotou-se no modelo de simulação, uma Taxa de crescimento do VMDA igual a 3% ao ano.

Outros parâmetros de entrada no módulo “*Tempo de Viagem*” são o Limite legal de carga e o Percentual de sobrecarga praticado, os quais determinam o carregamento dos veículos transportadores de rochas. O limite de peso permitido legalmente depende da configuração de eixos do veículo, conforme apresentado na Seção 2.3. Para o transporte de rochas ornamentais, existem diversas configurações de eixos dos veículos, cujo limite do peso bruto total – PBT varia de 23,1 a 77,7 toneladas.

No entanto, adotou-se como veículo padrão para o transporte de rochas, aquele ilustrado na Figura 2.3 da Resolução nº 354/2010 (CONTRAN, 2010), um semirreboque especial de sete eixos (três tandem duplo de rodagem dupla e um eixo simples de rodagem simples), cujo PBTC é de 57 toneladas.

Para informações a respeito do excesso de peso praticado no transporte de rochas ornamentais nas rotas em estudo, buscou-se dados relativos às pesagens realizadas por balanças móveis, sob operação do DNIT, nas rodovias do estado do Espírito Santo, no período de 2015 a 2017<sup>1</sup>. Contatou-se que o percentual do excesso de peso no PBT variou de 0,05% a 57,2%, já considerada a tolerância de 5% definida na legislação. Já o excesso de peso por eixo, variou de 0,25% a 70,7%, já considerada a tolerância de 10% no peso por eixo, conforme indica a legislação em vigor.

<sup>1</sup> Dados não publicados, fornecidos por Josenilson Gobira dos Santos, servidor vinculado à Coordenação-Geral de Operações Rodoviárias - CGPERT do DNIT, via e-mail em 19/10/2017.

Os dois últimos parâmetros de entrada referentes ao módulo “*Tempo de Viagem*” são a velocidade de operação e as distâncias de cada trecho que compõe as rotas. A velocidade de operação adotada foi de 80 quilômetros por hora (Km/h) e as distâncias consideradas, obtidas da base georreferenciada do *software Transcad 5.0*, utilizada no projeto PNCT (DNIT, 2017a) são:

- Distância trecho #1.1 – NV-CO: 123 Km;
- Distância trecho #1.2 – CO-JN: 45 Km;
- Distância trecho #2.1 – NV-JA: 65 Km;
- Distância trecho #2.2 – JA-JN: 110 Km;
- Distância trecho #3.1 – JN-FU: 38 Km; e
- Distância trecho #3.2 – FU-SE: 26 Km.

### **6.3 Parâmetros para o módulo Divisão Modal**

O custo operacional associado a cada uma das rotas analisadas foi obtido da metodologia HDM-4, aplicada à base de dados georreferenciada para o projeto “Desenvolvimento de metodologia para implementação de centros de integração logística – CILs” dos “Estudos e pesquisas para desenvolvimento de metodologia para implementação de centros de integração logística com vistas a subsidiar políticas públicas voltadas à promoção da intermodalidade no transporte de cargas”, firmado entre a Secretaria de Política Nacional de Transportes, do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil, e a COPPE da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por meio do Termo de Cooperação nº 01/2013/SPNT/MT (MTPA e COPPE, 2016).

Os custos operacionais variam de acordo com variáveis como tipo de veículo, tipo de via, condição do pavimento e tipo de relevo. Tais diferenças geram tempos de viagem distintos para distâncias iguais, o que pode afetar significativamente a escolha das rotas de transporte do modo rodoviário. Dessa forma, a matriz de custos operacionais foi calculada para as seguintes categorias de veículos (MTPA e COPPE, 2016):

- Moto;
- Automóvel;
- Utilitário;
- Ônibus;

- Caminhão 2 eixos;
- Caminhão 3 eixos;
- Caminhão articulado de 5 eixos;
- Caminhão biarticulado de 7 eixos (Bitrem); e
- Caminhão biarticulado de 9 eixos (Rodotrem).

Para cada categoria elencada, foi escolhido um veículo representativo cujos dados foram pesquisados no mercado. Além disso, a matriz de custos operacionais foi calculada para a seguinte combinação de *links*-tipo:

- Rodovias (5 tipos): Pista dupla, pista “wide” (pista simples com acostamento pavimentado em nível), pista simples federal, pista simples estadual e não pavimentada;
- Pavimento (4 tipos): Bom, regular, mau e péssimo, definidos pelo IRI (índice de rugosidade internacional); e
- Relevo (5 tipos): Plano, levemente ondulado, ondulado, fortemente ondulado e montanhoso, definido pelo IGV – Índice de Geometria Vertical e IGH – Índice de Geometria Horizontal.

Dentre os possíveis relatórios gerados pelo HDM-4, destacam-se dois usados para a elaboração da matriz de custos operacionais: (i) o relatório de velocidades por tipo de veículo em cada tipo de *link* e (ii) o relatório de gastos com itens de manutenção pelos veículos por 1.000 km para cada tipo de *link*. A velocidade especificada na rede corresponde ao automóvel de passeio sendo que, para o cálculo do tempo de viagem dos demais veículos, é utilizado um multiplicador correspondente à relação entre velocidade do veículo em questão e a velocidade do automóvel, considerado o mesmo *link* (MTPA e COPPE, 2016).

Como itens de manutenção, foram considerados: combustível, lubrificantes, pneus, manutenção (peças), manutenção (mão de obra), depreciação e custos da tripulação (veículos de carga). Destes, os quatro primeiros itens estão relacionados com a distância percorrida e os demais com o tempo necessário para percorrer esta distância. Assim, chega-se a um conjunto de custos unitários que variam com a distância ( $C_D$ ) e um conjunto de custos unitários que variam com o tempo ( $C_T$ ) (MTPA e COPPE, 2016).

As Rotas #1, #2 e #3 possuem informações sobre tipo de pista e relevo na base de dados georreferenciados do *Transcad* para o projeto PNCT (DNIT, 2017a), a classe veicular selecionada foi o caminhão biarticulado de 7 eixos e os custos por distância e custos por tempo foram determinados em função da variação da condição do pavimento, conforme apresentado na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 – Custos operacionais por distância e tempo em relação ao tipo de pista, condição do pavimento e relevo para o caminhão biarticulado de 7 eixos.

ROTAS	TIPO DE PISTA_CONDIÇÃO_RELEVO	ICP	Custo por Distância (R\$/Km)	Custo por Tempo (R\$/h)
#1	Pista Simples_Bom_Ondulado	100	1,5810	83,9126
	Pista Simples_Regular_Ondulado	75	1,7288	83,0619
	Pista Simples_Mau_Ondulado	50	1,9050	79,6047
	Pista Simples_Péssimo_Ondulado	25	2,1040	72,9313
#2	Pista Simples_Bom_Ondulado	100	1,5280	72,1894
	Pista Simples_Regular_Ondulado	75	1,6727	71,2022
	Pista Simples_Mau_Ondulado	50	1,8422	67,9374
	Pista Simples_Péssimo_Ondulado	25	2,0253	63,0468
#3	Pista Simples_Bom_Fortemente Ondulado	100	1,6284	64,0397
	Pista Simples_Regular_Fortemente Ondulado	75	1,7689	63,8627
	Pista Simples_Mau_Fortemente Ondulado	50	1,9380	63,2785
	Pista Simples_Péssimo_Fortemente Ondulado	25	2,1159	61,1832

Fonte: MTPA e COPPE (2016).

As Rotas #1 e #2 são predominantemente compostas por pista simples e relevo ondulado e a Rota #3 é formada predominantemente por pista simples e relevo fortemente ondulado. Para cada tipo de pista e relevo, as condições do pavimento podem ser do tipo bom, regular, mau e péssimo e foram relacionadas ao ICP por meio dos valores 100, 75, 50 e 25, respectivamente.

Pode-se observar na Tabela 6.4 que, à medida que a condição do pavimento piora, com queda do ICP, o custo por distância aumenta, relacionado ao consumo de combustível, lubrificantes, pneus e manutenção de peças. Já o custo por tempo, relacionado à mão de obra, depreciação e custos da tripulação, diminui com a queda do ICP. Isso pode ser explicado pelo fato de que, quando a condição do pavimento piora, a velocidade do veículo diminui e, conseqüentemente, o tempo de viagem aumenta. Dessa forma, relacionando-se custos fixos com um tempo maior de viagem, os custos por tempo são menores quando o ICP diminui.

Outra variável a ser determinada no módulo “*Divisão Modal*” é o pedágio de cada rota. Na Rota #1 não há postos de pedágio. Na Rota #2 há um posto de pedágio na altura do

município de Aracruz e na Rota #3 há um posto de pedágio no município da Serra, ambos na BR-101. Os valores mostrados no Quadro 6.1 foram obtidos no *site* da concessionária ECO-101 (2017).

Quadro 6.1 – Valores de pedágios nas rotas em análise para o caminhão de 7 eixos.

	<b>Município</b>	<b>Localização</b>	<b>Valor (R\$)</b>
<b>Rota #2</b>	Aracruz	BR 101, Km 171,7	30,00
<b>Rota #3</b>	Serra	BR 101, Km 242	28,80

Fonte: Eco-101 (2017).

Já a Taxa de inflação determina a Taxa de crescimento dos custos operacionais de transporte, bem como os demais custos em outros módulos do modelo, como o custo de acidente de tráfego e o custo de manutenção do pavimento.

O Índice de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA, produzido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, é considerado o índice oficial de inflação do país. Em 2016, o IPCA apresentou um crescimento de 6,29% (IBGE, 2017). Portanto, utilizou-se esse percentual para a Taxa de inflação no primeiro ano da simulação do modelo.

#### 6.4 Parâmetros para o módulo Manutenção do Pavimento

Para o módulo “*Manutenção do Pavimento*” necessita-se determinar o VMDA do ano base utilizado em cada uma das três rotas. Como cada rota é dividida em dois trechos, para o cálculo do Número N de projeto optou-se por utilizar o maior VMDA de cada rota. Assim, a Tabela 6.3 se resume na Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – VMDA de cada rota.

<b>Rotas</b>	<b>VMDA Total (veículos/dia)</b>
#1	2.394
#2	4.678
#3	8.546

Fonte: Elaboração própria com base em DNIT (2017).

Ainda para o Número N de projeto, utilizou-se a Vida útil de projeto igual a 15 anos, em que a variável Dias/ano é definida como 365 dias/ano. A Taxa de crescimento do VMDA é proveniente do módulo “*Tempo de Viagem*” e o FV da frota foi obtido do próprio modelo como sendo a soma dos FV’s de cada categoria no cenário em que o percentual do excesso de peso por eixo é nulo.

Para o cálculo do Número N do ano atual, fez-se necessário distinguir o percentual de cada categoria de veículos pesados na frota veicular, com base nas amostras das pesquisas de Contagem Volumétrica e Classificatória – CVC da Pesquisa Nacional de Tráfego realizada em 2016 – PNT 2016, integrante do projeto PNCT (DNIT, 2017a) realizadas nos postos de pesquisas localizados nas rotas em estudo, conforme ilustrado na Figura 6.2.



Figura 6.2 – Localização dos Postos PNT 2016.  
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 6.3 mostra o percentual de cada categoria veicular contado e classificado pelas pesquisas nos postos de Colatina e Linhares entre os dias 19 e 25 de novembro de 2016.

No entanto, para o cálculo do Número N são considerados apenas veículos comerciais, excluindo-se dessa análise os veículos de passeio e motos. Além disso, o percentual de *trucks* e reboques na frota foi irrelevante frente às demais categorias de veículos pesados. Portanto, selecionou-se quatro categorias representativas de veículos pesados para o cálculo do Número N, quais sejam: ônibus, caminhões leves, semirreboques e semirreboques especiais, cujos percentuais são utilizados para o cálculo do Fator de Eixo no modelo de simulação para as Rotas #1 e #2. Para a Rota #3 não se conhece os

percentuais de cada categoria veicular, por isso, adotou-se a média dos percentuais das Rotas #1 e #2.

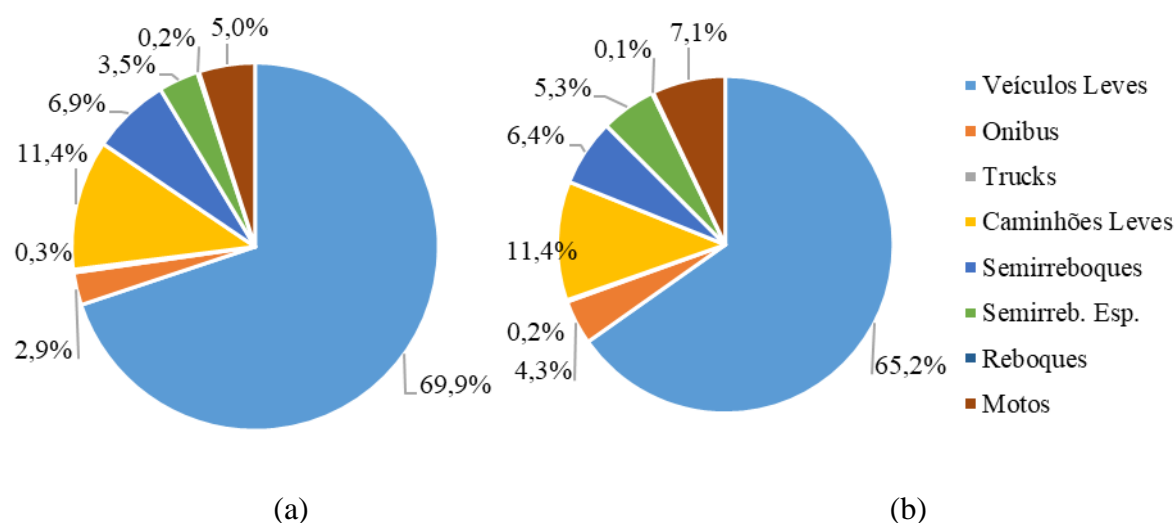


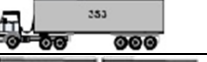



Figura 6.3 – Percentual das categorias veiculares na CVC de Colatina (a) e Linhares (b).  
Fonte: PNT 2016 (DNIT, 2017a).

Porém, cada categoria veicular pode apresentar uma grande variedade de configurações de eixos. Para a PNT 2016 (DNIT, 2017a), foram adotadas três configurações para ônibus (O1, O2 e O3), cinco para caminhões leves (C1, C2, C3, C4 e C5), seis para semirreboques (S1, S2, S3, S4, S5 e S6) e cinco para semirreboques especiais (SE1, SE2, SE3, SE4 e SE5). Destaca-se na Figura 6.4 as configurações de eixos percentualmente mais relevantes dentro de cada categoria veicular selecionada, obtida da PNT 2016 durante sete dias ininterruptos.

Percebe-se na Figura 6.4, o destaque das configurações O1, C1, S6 e SE1. Assim, as respectivas representações e número total de eixos para cada categoria veicular selecionada, encontram-se discriminadas no Quadro 6.2 e são utilizadas no modelo para o cálculo do Fator de Carga em cada eixo.

Quadro 6.2 – Configurações das categorias representativas para o cálculo do Número N.

Representação	Categoria	Configuração de eixos	Eixos
	Ônibus (O1)	1 ESRS e 1 ESRD	2
	Caminhão leve (C1)	1 ESRS e 1 ESRD	2
	Semirreboque (S6)	1 ESRS; 1 TDRD e 1 TTRD	6
	Semirreboque especial (SE1)	1 ESRS e 3 TDRD	7

Fonte: Elaboração própria.

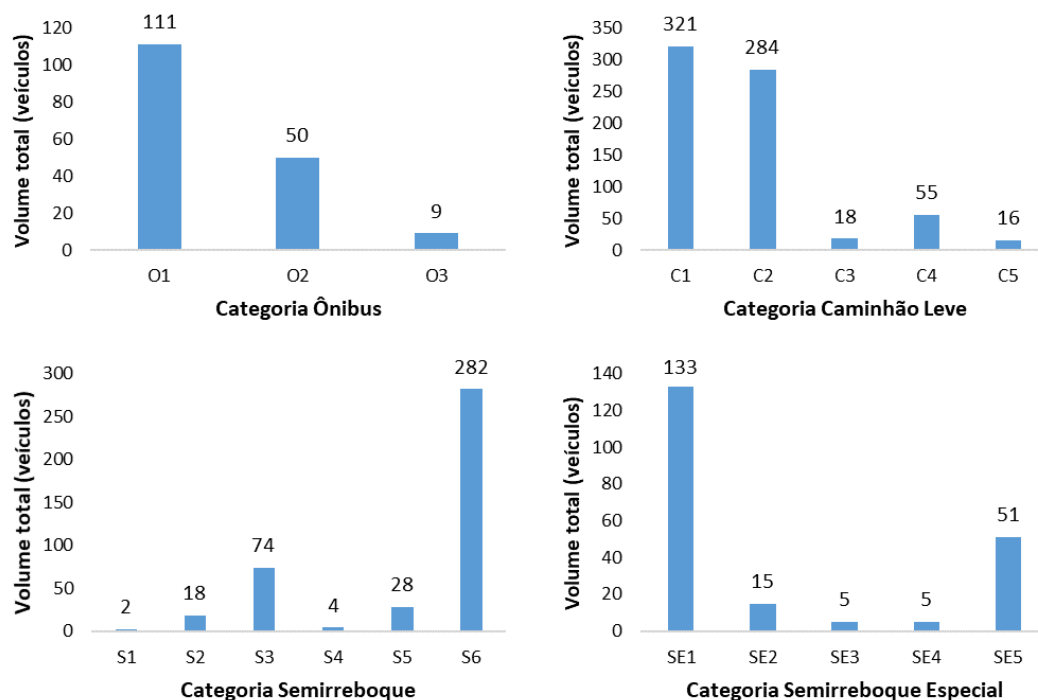


Figura 6.4 – Configurações mais relevantes das categorias de veículos pesados.  
Fonte: Elaboração própria com base em DNIT (2017a).

Os pesos permitidos legalmente para cada tipo de eixo, considerando-se a tolerância, são apresentados no Quadro 6.3.

Quadro 6.3 – Limites de peso, admitindo-se a tolerância de 10% por eixo.

	Peso permitido por grupo de eixo (t)	Total (+ tolerância 10%)	Peso por eixo
ESRS	6	6,6	6,6
ESRD	10	11	11
TDRD	17	18,7	9,35
TTRD	25,5	28,05	9,35

Fonte: Elaboração própria com base em CONTRAN (2006a) e CONTRAN (2007).

O Percentual de excesso de peso por eixo será simulado variando-se de 0% a 100%, de modo a avaliar o impacto dessa variação sobre a redução da vida útil do pavimento e sobre os custos de manutenção rodoviária ao longo do período de simulação.

Depois de simulado o Número N em função dos pesos por eixo e a vida útil do pavimento, deve-se decidir qual o tipo de manutenção deverá ser realizado. Os limites para manutenção corretiva e restaurativa são definidos pelo DNIT (2006b) em função do IRI e do QI apresentados na Tabela 2.1, em que aconselha-se o valor do  $IRI \geq 3,5$  como gatilho para intervenção de manutenção no pavimento. Sugere-se correlacionar tais índices com o ICP por meio do conceito subjetivo, conforme apresentado na Tabela 6.6.



Tabela 6.6 – Relação entre índice de condição do pavimento e índices de irregularidade.

Conceito	Irregularidade		Condição	Intervenções	Efeitos
	QI (cont./Km)	IRI (m/Km)	ICP (pontos)	Manutenção	ICP (pontos)
Excelente	13-25	1-1,9	100	-	-
Bom	25-35	1,9-2,7	80	-	-
Regular	35-45	2,7-3,5	60	-	-
Ruim	45-60	3,5-4,6	40	Corretiva	80
Péssimo	> 60	> 4,6	20	Restaurativa	100

Fonte: Adaptado de DNIT (2006b).

Assim, os limites para intervenção de manutenção corretiva e restaurativa em relação ao ICP são de 40 e 20 pontos, respectivamente. Já os efeitos de cada tipo de manutenção também diferem. Caso a manutenção corretiva seja realizada, eleva-se o ICP para 80 pontos. Se a manutenção restaurativa for solicitada, o nível do ICP eleva-se para a condição de 100 pontos.

Por fim, sabe-se que o levantamento das condições do pavimento não é realizado todos os anos. Dessa forma, optou-se por simular o intervalo de tempo entre dois levantamentos do ICP, variando-se de 2 a 5 anos, bem como o tempo de duração das obras de manutenção, também variando de 2 a 5 anos.

## 6.5 Parâmetros para o módulo Custo Social do Transporte de Carga

O módulo “*Custo Social do Transporte de Carga*” é dividido em custo de manutenção do pavimento e custo com acidentes rodoviários. Para o custo de manutenção do pavimento, existem apenas dois parâmetros de entrada a serem determinados: o custo da manutenção corretiva por quilômetro (MC/Km); e o custo da manutenção restaurativa por quilômetro (MR/Km).

Para tanto, a Coordenação Geral de Planejamento e Programação de Investimentos – CGPLAN do DNIT divulgou os custos médios gerenciais para o modo rodoviário, conforme apresentado na Tabela 6.7. Dessa forma, utilizou-se o custo médio em R\$/Km para cada tipo de manutenção.

Tabela 6.7 – Custos para manutenção do pavimento.

Manutenção	Limite inferior (R\$/Km)	Limite superior (R\$/Km)	Média (R\$/Km)
Corretiva	566.577,08	1.761.708,99	1.164.000,00
Restaurativa	1.783.916,27	2.883.935,73	2.334.000,00

Fonte: DNIT (2017b).

Para os custos com acidentes rodoviários, o IPEA (2015) apresentou uma caracterização geral dos acidentes nas rodovias federais brasileiras, analisando a evolução dos seus custos com base em dados da Polícia Rodoviária Federal (PRF) nos anos-base 2007, 2010 e 2014. A CNT (2016) atualizou o estudo, com base no número de acidentes registrados em 2015 e na inflação do período, conforme apresentado na Tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Custo total e médio por gravidade de acidente.

<b>Gravidade do acidente</b>	<b>Custo médio (R\$/ocorrência)</b>
Com fatalidade	715.772,55
Com vítimas	99.805,21
Sem vítimas	25.523,79

Fonte: CNT (2016).

Para o percentual de cada tipo de acidente em relação à sua gravidade, utilizou-se dados da PRF (2017) sobre os acidentes ocorridos nos trechos de rodovia federal pertencentes às rotas em estudo no ano de 2016, conforme apresentado na Tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Número e percentual de acidentes por gravidade.

<b>Rodovia</b>	<b>Gravidade</b>	<b>Número de acidentes</b>	<b>Percentual (%)</b>	<b>Média acidente/Km Trecho federal</b>	<b>Estimativa Trecho estadual</b>	<b>Total</b>
<b>BR 259</b> (Trecho #1.2)	ACO	13	11	0,3	36	49
	ACV	89	75	2,0	243	332
	ASV	17	14	0,4	46	63
	<b>TOTAL</b>	<b>119</b>	<b>100</b>	<b>2,6</b>	<b>325<sup>1</sup></b>	<b>444</b>
<b>BR 101</b> (Trecho #2.2)	ACO	15	3	0,1	9	24
	ACV	367	82	3,3	217	584
	ASV	65	15	0,6	38	103
	<b>TOTAL</b>	<b>447</b>	<b>100</b>	<b>4,1</b>	<b>264<sup>2</sup></b>	<b>711</b>
<b>BR 101</b> (Rota #3)	ACO	34	4	0,5	-	34
	ACV	641	76	10,0	-	641
	ASV	173	20	2,7	-	173
	<b>TOTAL</b>	<b>848</b>	<b>100</b>	<b>13,3</b>	<b>-</b>	<b>848</b>

Nota: <sup>1</sup>Estimativa de acidentes para o trecho #1.1 e <sup>2</sup>Estimativa para o trecho #2.1.

Fonte: PRF (2017).

Para a estimativa do número de acidentes nos trechos de rodovias estaduais das Rotas #1 (trecho #1.1) e #2 (trecho #2.1), utilizou-se a média de acidentes por quilômetro nas rodovias federais e multiplicou-se pela extensão do trecho de rodovia estadual. Em seguida, foram somados o número de acidentes dos trechos rodoviários federais à estimativa do número de acidentes dos trechos rodoviários estaduais.

O modelo de previsão de acidentes proposto pelo HSM (TRB, 2014) sugere um fator de correção para o caso em que as condições das rodovias não sejam ideais, ou seja, para características de geometria da via e de tráfego específicas, como largura de faixa e

acostamento, faixa de ultrapassagem e retorno, raios de curvatura horizontal, inclinação vertical, canteiro central, densidade do tráfego e outras. Na ausência de informações sobre tais características, aplicou-se um fator de correção ao modelo de previsão de acidentes, com base no número real de acidentes ocorridos nos trechos das rodovias federais pertencentes às rotas do modelo de simulação.

Para a obtenção do fator de correção, simulou-se o modelo considerando-se o cenário em que as condições das vias e do tráfego são ideais, ou seja, a previsão de acidentes foi baseada apenas no VMDA e na extensão das rotas. Em seguida, dividiu-se o número real de acidentes pelo número de acidentes sob as condições ideais e obteve-se o fator de correção médio para o modelo de previsão de acidentes de cada rota igual a 8,5306, ou seja, o número real de acidentes é em média 8,5 vezes maior do que o previsto pelo modelo sob condições ideais.

Após a apresentação do modelo, seu equacionamento matemático e todos os parâmetros externos necessários, torna-se importante atestar sua confiabilidade, ou seja, sua utilidade como adequada representação do sistema real. Dessa forma, o próximo capítulo apresenta a aplicação dos testes ao modelo, conforme indicado pela literatura pertinente.

## 7 TESTES DO MODELO PROPOSTO

O modelo de simulação proposto se enquadra na categoria de modelagem quantitativa, pois envolve a formulação indutiva e a simulação do modelo, focada na compreensão das estruturas de estoque e fluxo e aplicada na representação de sistemas quantificáveis (Zagonel e Corbet, 2006). Conforme apresentado na Seção 3.3, os testes considerados mais apropriados para esta categoria de modelagem são: conservação física ou avaliação da estrutura, consistência dimensional e erro de integração (básicos); teste de condições extremas, avaliação de parâmetros e reprodução de comportamentos (intermediários); teste endógeno de reprodução de comportamentos e teste de adequação de limites (avanzados). Estes testes são apresentados a seguir.

### 7.1 Avaliação da Estrutura (Conservação Física)

A avaliação da estrutura centra-se no nível de agregação e na conformidade do modelo às realidades físicas básicas, como as leis de conservação. Uma violação comum das leis físicas envolve estoques que se tornam negativos, no entanto, estoques como matéria-prima e população, por exemplo, não podem ser negativos e, portanto, os fluxos de saída desses estoques devem ser nulos quando o estoque é nulo (Sterman, 2000).

Isso significa que deve existir um *feedback* negativo de primeira ordem para restringir os fluxos de saída, de modo que o fluxo seja zero quando o estoque for zero. O *feedback* negativo provoca o comportamento de equilíbrio do sistema, ou seja, impõe-se um limite ao decrescimento exponencial. Por exemplo, se o estoque tende a cair exponencialmente, limita-se a taxa de saída de modo que o estoque não se torne negativo. Já a ordem de um sistema é o número de variáveis de estado, ou estoques, que este contém. Um sistema de primeira ordem contém apenas um estoque. Como cada variável de estoque possui um atraso associado, esses *loops* devem ser de primeira ordem, pois qualquer atraso no tempo pode fazer com que a taxa de saída continue, mesmo após o estoque chegar a zero, uma impossibilidade física. Dessa forma, a formulação matemática deve ser a seguinte (Sterman, 2000):

$$\text{Estoque} = \int_{t_0}^t (\text{fluxo de entrada} - \text{fluxo de saída}) dt + \text{Estoque}(t_0) \quad (7.1)$$

$$\text{fluxo de saída} = \min(\text{fluxo de saída desejado}, \text{fluxo de saída máximo}) \quad (7.2)$$

$$\text{fluxo de saída máximo} = \frac{\text{Estoque}}{\text{tempo mínimo de saída}} \quad (7.3)$$

Assim, em condições normais, quando o estoque está em grande quantidade, a saída é igual à taxa desejada. Se o estoque cair suficientemente, no entanto, o fluxo de saída será limitado pelo próprio valor do estoque.

Os testes de avaliação da estrutura são realizados usando diagramas dos subsistemas e os mapas de estoque e fluxo, além da inspeção direta das equações. Outra técnica para testar a adequação dos pressupostos de agregação é desenvolver um submodelo mais detalhado, em seguida, comparar seu comportamento com o da formulação mais agregada. Quando a desagregação não afeta significativamente os resultados do modelo e as implicações políticas, o modelo original e mais simples pode ser mantido (Sternan, 2000).

Durante a formulação do modelo, foram realizadas simulações para verificar a conservação física da estrutura do modelo. Como exemplo, ilustra-se na Figura 7.1, o estoque do Índice de Condição do Pavimento, em que se pode observar o decréscimo no índice até o recebimento do efeito da manutenção restaurativa em 2022 (100 pontos) e corretiva em 2028 (80 pontos), no entanto, o estoque não se torna negativo, satisfazendo o comportamento esperado.

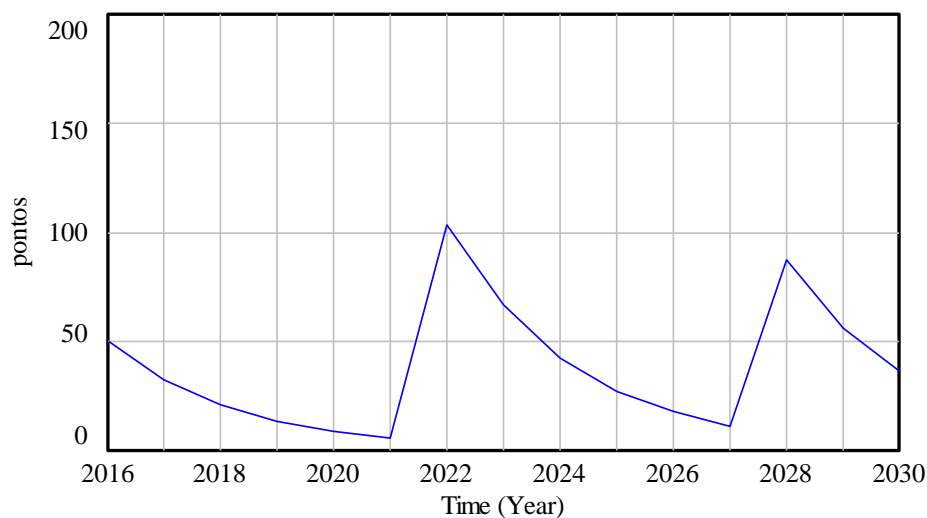


Figura 7.1 – Estoque do índice de condição do pavimento.  
Fonte: Elaboração própria.

## 7.2 Consistência Dimensional

A consistência dimensional consiste em especificar as unidades de medida das variáveis ao longo da formulação do modelo e checar o significado físico das mesmas por meio das equações matemáticas. Alguns aplicativos computacionais de simulação em DS incluem a análise dimensional automatizada. No entanto, mesmo que o modelo não gere nenhuma mensagem de erro dimensional, todas as equações devem ser consistentes sem a inclusão de nenhum fator arbitrário que não tenha significado real (Sterman, 2000).

Para a realização desse teste, foi utilizado o comando “*Check Units*” do *software* Vensim, o qual apresentou diversas inconsistências que foram sanadas durante a formulação do modelo, até apresentação da mensagem demonstrada na Figura 7.2, ou seja, indicando a adequação dimensional de todas as variáveis envolvidas no modelo proposto.

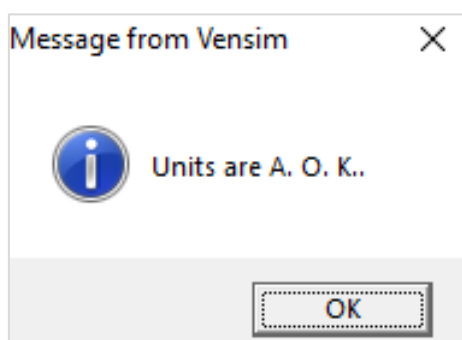


Figura 7.2 – Mensagem do comando “*Check Units*” do Vensim.

Fonte: Elaboração própria.

Além disso, algumas variáveis sem significado real foram usadas inicialmente (como por exemplo, Unidade de ajuste = 1 ano) cuja função era corrigir as unidades das variáveis relacionadas. Tais variáveis foram substituídas por variáveis internas como “Time” (tempo atual da simulação), “Initial Time” (tempo inicial da simulação) e “Saveper” (intervalo de tempo no qual os resultados da simulação são salvos), cujas unidades são as mesmas definidas para o horizonte de simulação do modelo, dado em anos.

Outras variáveis, cujo nome não possuía significado, antes denominadas “Unidades de ajuste”, foram renomeadas, como por exemplo, a variável “Horas por ano”. Dessa forma, a comunicação e compreensão do modelo foi facilitada.

### 7.3 Erro de Integração

Para o modelo proposto, utilizou-se a técnica de integração de Euler, tendo em vista o menor tempo computacional requerido, maior estabilidade numérica e devido a este método ser adequado a aplicações em que existem imprecisões nos parâmetros e condições iniciais, conforme visto na Seção 3.2.

No teste de erro de integração, deve-se executar o modelo com uma estimativa inicial para  $d_t$ . Em seguida, deve-se reduzir o valor de  $d_t$  ao meio e executar o modelo novamente. Se não houver mudanças expressivas no comportamento do modelo, então a estimativa inicial é razoável. Se o comportamento muda de forma considerável, deve-se repetir o teste reduzindo-se o  $d_t$  ao meio novamente até que os resultados não sejam mais impactados significativamente (Stermán, 2000).

O *time step* selecionado para o modelo foi de 0,25 ou um quarto de ano. Esta escolha foi baseada em simulações com diferentes valores de *time step*, como apresentado na Tabela 7.1 para a variável Tráfego total #1.

Tabela 7.1 – Resultados do Tráfego total #1 para diferentes valores de Time Step.

	<b>Time Step</b>	<b>Diferença</b>	<b>Time step</b>	<b>Diferença</b>	<b>Time step</b>	<b>Diferença</b>	<b>Time step</b>
<b>Ano</b>	<b>1 (A)</b>	<b>B – A</b>	<b>0,5 (B)</b>	<b>C – B</b>	<b>0,25 (C)</b>	<b>D – C</b>	<b>0,125 (D)</b>
2016	497.495	0	497.495	0	497.495	0	497.495
2017	497.495	0	497.495	2%	504.985	1%	508.794
2018	497.495	3%	512.532	2%	520.306	1%	524.260
2019	512.420	3%	528.023	2%	536.092	1%	540.196
2020	527.792	3%	543.983	2%	552.357	1%	556.616
2021	543.626	3%	560.424	2%	569.115	1%	573.535
2022	559.935	3%	577.363	2%	586.381	1%	590.968
2023	576.733	3%	594.814	2%	604.171	1%	608.932
2024	594.035	3%	612.792	2%	622.501	1%	627.442
2025	611.856	3%	631.314	2%	641.388	1%	646.514
2026	630.212	3%	650.395	2%	660.847	1%	666.166
2027	649.118	3%	670.054	2%	680.896	1%	686.415
2028	668.592	3%	690.306	2%	701.554	1%	707.280
2029	688.649	3%	711.171	2%	722.839	1%	728.776
2030	709.309	3%	732.666	2%	744.769	1%	750.928

Fonte: Elaboração própria.

Admitiu-se uma diferença de 1% como aceitável para o tráfego total durante um ano na rota considerada. Dessa forma, o *time step* selecionado foi de 0,25 (1/4 de ano), pois, quando se altera o *time step* de 0,25 para 0,125, a mudança no comportamento da variável não é significativa, dada a diferença nos dados simulados de apenas 1%.

#### 7.4 Teste de Condições Extremas

Os modelos devem ser robustos sob condições extremas, o que significa que seu comportamento deve ser realista sob qualquer condição imposta. O teste de condições extremas verifica se o modelo apresenta um comportamento apropriado quando os parâmetros são submetidos a valores extremos, como zero ou infinito, e pode ser realizado de duas maneiras: por inspeção direta das equações do modelo ou por simulação (Serman, 2000).

As variáveis submetidas a valores extremos para esse teste, bem como o comportamento esperado para verificação, estão apresentados no Quadro 7.1.

Quadro 7.1 – Variáveis para o teste de condições extremas.

Módulo	Variável	Valor	Comportamento Esperado
Previsão do volume de carga	Estoque inicial do Volume de carga total	0	Inexistência de veículos de rochas e seus efeitos sobre os custos
	Estoque inicial do valor do volume de carga #1 e #2	0	
Fluxo de velocidade	Capacidade máxima	10	Aumento do tempo médio de viagem
Divisão modal	Pedágio #1	1.000	Proporção do volume de carga na Rota #1 será nula
Manutenção do pavimento	Percentual excesso de peso por eixo	10.000	Vida útil atual será nula
	Vida útil de projeto	0	Valor ICP será nulo

Fonte: Elaboração própria.

Sob a condição em que os valores iniciais dos estoques no módulo “*Previsão do Volume de Carga*” foram nulos, o fluxo de veículos de rochas também foi nulo, não havendo o transporte desse tipo de carga nas rotas consideradas.

Da mesma forma, os custos associados ao transporte de rochas ornamentais foram nulos quando não houve a carga a ser transportada. Assim, o custo acumulado de transporte (custo econômico operacional), o custo acumulado de acidentes de tráfego e o custo acumulado da manutenção do pavimento (custos sociais) foram nulos sob esta condição, o que satisfaz o comportamento esperado.

No módulo “*Tempo de Viagem*” submeteu-se a Capacidade máxima da via a um valor de 10 ucp/h ao invés de 1.700 ucp/h, o que resultou em um nível de serviço (relação entre volume e capacidade) igual a 42,5 e um tempo médio de viagem de 754.648 horas para o trecho #1.1. Esse comportamento também é esperado, uma vez que a diminuição



da capacidade da via piora o nível de serviço, tornando-se um gargalo e aumentando o tempo da viagem.

Para o módulo “*Divisão Modal*” submeteu-se o pedágio da Rota #1 a um valor de R\$ 1.000,00, o que levou a proporção do volume de carga na Rota #1 ser igual a zero e, conseqüentemente, todo o volume de carga foi transportado pela Rota #2, como mostra a Figura 7.3.

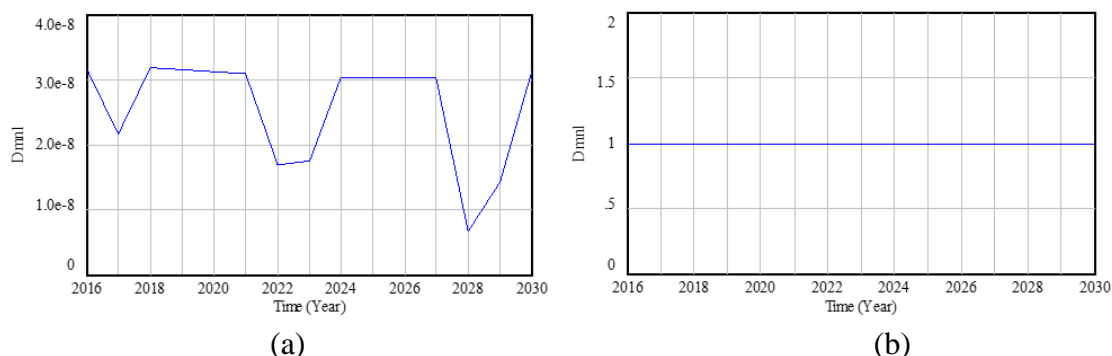


Figura 7.3 – Proporção do volume de carga nas Rotas #1 (a) e #2 (b) sob o pedágio da Rota #1 alterado.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 7.3, observa-se que a dimensão do resultado do gráfico (a) é  $10^{-8}$ , enquanto para o gráfico (b), o resultado é constante igual a unidade. Esse comportamento também satisfaz o esperado devido ao aumento significativo do custo generalizado da Rota #1.

No módulo “*Manutenção do Pavimento*”, com um percentual no excesso de peso por eixo igual a 10.000, a vida útil remanescente do pavimento se aproximou de zero, como mostra a Figura 7.4.

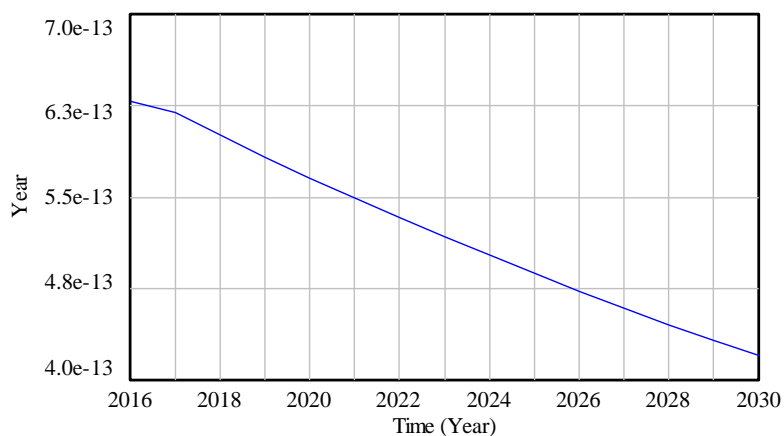


Figura 7.4 – Vida útil do pavimento sob percentual de 1.000% de excesso de peso por eixo.

Fonte: Elaboração própria.

Ainda no mesmo módulo, submeteu-se a vida útil de projeto igual a zero anos, cujo impacto sobre o valor do ICP é instantâneo, fazendo-o cair de seu valor inicial de 50 pontos para zero em apenas 1 ano, como mostra a Figura 7.5.

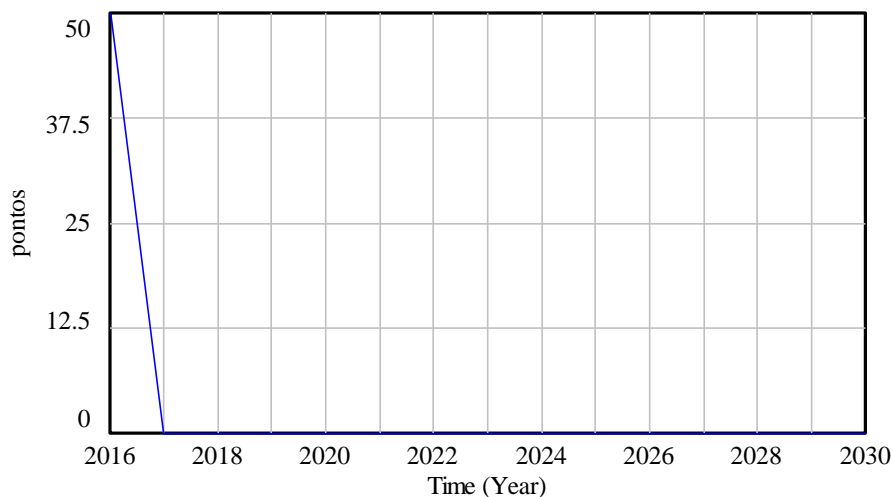


Figura 7.5 – Valor do ICP sob vida útil de projeto igual a zero.

Fonte: Elaboração própria.

No entanto, ressalta-se que, mesmo que o ICP esteja igual a zero, a manutenção só ocorrerá respeitando-se o intervalo de tempo no qual são feitos os levantamentos da condição do pavimento, como mostra a Figura 7.6, ou seja, com o intervalo de 3 anos.

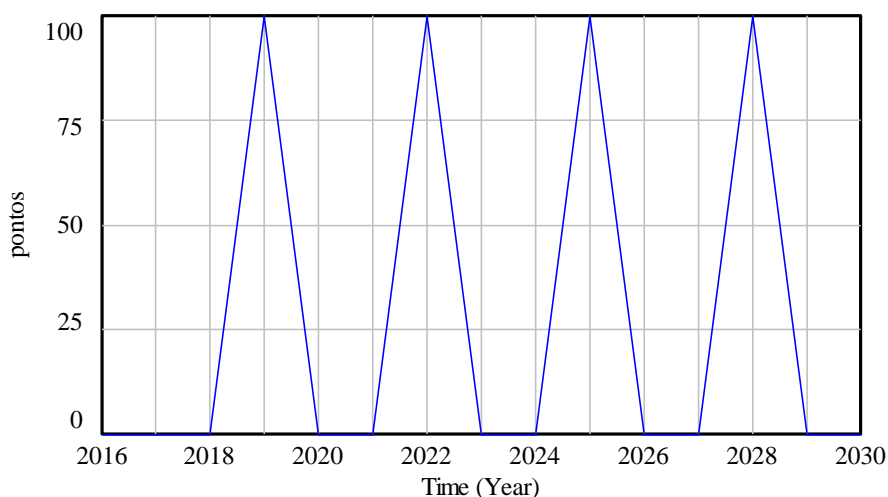


Figura 7.6 – Manutenção sob vida útil e ICP igual a zero com intervalo de avaliação do pavimento igual a 3 anos.

Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, todos os comportamentos esperados sob as condições extremas estabelecidas foram respeitados, o que corrobora para a confiabilidade da estrutura do modelo proposto.

## 7.5 Avaliação de Parâmetros

A estimativa de parâmetros a partir de dados numéricos é comum na modelagem, particularmente por modelos econométricos e técnicas de regressão. No entanto, a indisponibilidade de dados numéricos muitas vezes impossibilita a estimativa de todos os parâmetros em um modelo, devendo-se, neste caso, estimar os parâmetros usando a opinião de especialistas obtida por meio de entrevistas, oficinas, materiais de arquivo, experiência direta e outros métodos (Sterman, 2000).

Além disso, a significância estatística dos parâmetros em uma equação não é um indicador de que a relação está correta. O significado dos testes estatísticos indica quão bem uma equação se encaixa nos dados observados, mas não indica se as equações caracterizam corretamente as relações causais no mundo real. Uma relação estatisticamente significativa entre as variáveis mostra apenas que elas estão altamente correlacionadas (Sterman, 2000).

Usar a significância estatística como teste do modelo também pode levar os modeladores a rejeitar equações que descrevem relacionamentos importantes. Um relacionamento pode ser estatisticamente insignificante simplesmente porque existem poucos dados ou porque estes não variam o suficiente. Quando o conhecimento direto do sistema sugere que uma relação é real e importante, deve-se incluí-la, mesmo que os dados numéricos não permitam que você estime sua correlação estatisticamente (Sterman, 2000).

O teste de avaliação de parâmetros não foi realizado no modelo proposto pela ausência de dados históricos do volume médio diário anual para toda a rede viária em estudo, entretanto, os demais testes permitem indicar que o modelo representa o problema de maneira adequada.

## 7.6 Reprodução de Comportamentos

Outras ferramentas disponíveis para avaliar a capacidade de um modelo para reproduzir o comportamento de um sistema, são as estatísticas descritivas de ajuste ponto a ponto. Tais métricas calculam a medida do erro entre uma série de dados reais e o resultado do modelo em cada ponto para o qual existem dados. A medida de ajuste mais divulgada é o coeficiente de determinação  $R^2$ , que mede a fração da variância nos dados explicados

pelo modelo. Se o modelo replica exatamente a série real, o  $R^2$  é igual a 1; se a saída do modelo for constante, o  $R^2$  é nulo, em que  $R^2$  é o quadrado do coeficiente de correlação  $r$ , que mede o grau em que duas séries covariam (Sterman, 2000).

Para a realização desse teste, seria necessário simular o modelo a partir de determinado período em que houvesse uma série histórica de dados reais para a correlação com os resultados do modelo. No entanto, a realização desse teste não foi possível no modelo proposto porque o parâmetro de entrada VMDA só é expandido para a rede viária analisada no ano de 2016, logo esse foi o critério de escolha do período inicial de simulação do modelo. Dessa forma, não foi possível realizar a simulação em anos anteriores para comparação com séries históricas de outros dados. No entanto, a ausência desse teste não invalida o modelo, tendo em vista que a realização dos demais testes apresentam comportamentos esperados em relação ao sistema real.

### **7.7 Teste Endógeno de Reprodução de Comportamentos**

Quando o modelo é uma réplica perfeita da estrutura, condições e parâmetros iniciais do sistema real, o resultado da simulação será idêntico desde que o modelo seja conduzido exatamente pelos mesmos eventos aleatórios que o sistema real. Caso contrário, mesmo que as variações aleatórias sejam extraídas da mesma distribuição, com a mesma variação e tempo de correlação, o comportamento do modelo diverge rapidamente dos dados reais (Sterman, 2000).

Neste caso, as medidas de erro estatístico não são significativas quando um modelo é altamente sensível a perturbações. No entanto, um bom modelo deve exibir os mesmos modos de comportamento observados nos dados, como flutuações, frequências e amplitudes. Assim, deve-se traçar os dados simulados e reais juntos para analisar se o modelo captura as assimetrias e outras características sutis do comportamento observado nos dados. Testes de reprodução comportamental não podem comprovar que um modelo é correto ou confiável, mas auxilia a descoberta de falhas na estrutura ou parâmetros do modelo e avalia se eles são relevantes em relação ao propósito pretendido (Sterman, 2000).

O teste endógeno de reprodução de comportamento não foi realizado pela indisponibilidade de curvas de comportamento específicas das rotas em estudo, a fim de

comparação com os resultados obtidos. No entanto, como citado anteriormente, os demais testes realizados apresentam a confiabilidade requerida ao modelo proposto.

## **7.8 Teste de Adequação de Limites**

Esse teste avalia se os limites das fronteiras do modelo estão adequados para o propósito em questão. Para tanto, pode-se inspecionar diretamente as equações do modelo, mas os diagramas de relação causal e de estoque e fluxo facilitam a identificação de constantes exógenas que deveriam ser consideradas variáveis do modelo. Se uma estrutura adicional possui um impacto significativo sobre o comportamento ou implicações políticas, esta deve ser incluída como parte integrante do modelo (Sterman, 2000).

No modelo proposto, para o módulo *“Tempo de Viagem”*, cujo objetivo é simular o tempo de viagem das rotas, inicialmente tinha-se a capacidade como uma constante, ou seja, um parâmetro de entrada externo ao modelo. No entanto, como este parâmetro influencia o tempo de viagem e o tráfego deveria ser convertido para o tráfego equivalente em ucp, optou-se por incluir o cálculo da capacidade viária no modelo, tendo-se como referência o HCM (TRB, 2010).

No módulo *“Manutenção do Pavimento”* ocorreu a inclusão do cálculo do Número N, antes tido como constante. Porém, como não foi possível a obtenção desse dado para as três rotas em análise, apenas para o trecho relativo à BR-101 da Rota #2 no ano de 1989, optou-se pela inclusão do Número N como variável interna do modelo, acrescentando-se a estrutura com as variáveis relacionadas. Dessa forma, os limites do modelo foram expandidos e adequados de acordo com as necessidades durante a construção e formulação do mesmo, com vistas ao objetivo pretendido.

Apesar da ausência de alguns testes, devido à indisponibilidade de séries históricas de dados reais, como o VMDA da rede viária, para a simulação e correlação de parâmetros, pode-se considerar pelos testes de avaliação da estrutura, consistência dimensional, erro de integração, condições extremas e adequação de limites, que o modelo está apto para a obtenção de resultados e simulação de cenários. Dessa forma, o próximo capítulo apresenta os cenários propostos para a simulação do modelo, os resultados obtidos, bem como as discussões e análises a respeito dos mesmos.

## 8 CENÁRIOS E RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DINÂMICA

Alguns cenários foram criados devido às oscilações de certos parâmetros e outros devido às necessidades de se avaliar os resultados do modelo. O Quadro 8.1 sintetiza a descrição dos cenários, as variáveis simuladas e o impacto analisado em cada cenário proposto, detalhados em seguida.

Quadro 8.1 – Descrição dos cenários.

CENÁRIO	VARIÁVEIS SIMULADAS	IMPACTO
1. Cenário de Referência	Taxa de crescimento da produção de rochas: 8% e 11%	Veículos de rochas; Tempo médio de viagem; Custo de transporte
	Valor inicial do ICP (25, 50, 75 e 100 pontos)	Manutenção; Custo acumulado da manutenção do pavimento
	Controle de tempo na avaliação do pavimento (2, 3, 4 e 5 anos)	
	Atraso no fluxo de saída efeito da manutenção (2, 3, 4 e 5 anos)	
2. Política Rígida	Percentual de sobrecarga: 0% (comparação com cenário de referência)	Aumento do Custo acumulado de transporte
		Decréscimo no Custo acumulado de manutenção do pavimento e acidentes de tráfego
3. Política Moderada e Tolerante	Percentual de sobrecarga de 10 a 100% (Incremento de 10%)	Decréscimo no Custo acumulado de transporte
		Aumento do Custo acumulado da manutenção do pavimento e acidentes de tráfego
		Custo acumulado total
4. Avaliação da Melhor Política	Percentual de sobrecarga e Peso do custo social	Custo acumulado total
5. Cenário Extra	Excesso de peso em todas as rotas	Custo acumulado de manutenção do pavimento; custo acumulado de transporte; custo acumulado de acidente

Fonte: Elaboração própria.

Inicialmente, no Cenário 1, chamado Cenário de Referência, simulou-se diferentes valores para quatro variáveis: Taxa de crescimento do volume de carga; condição inicial do Valor do ICP; controle de tempo na avaliação do pavimento; e atraso no fluxo de saída do efeito da manutenção. A Taxa de crescimento do volume de carga foi simulada em 8% e 11% devido à imprecisão dos dados obtidos sobre a produção de rochas ornamentais do município de Nova Venécia. Tendo-se o percentual de excesso de peso fixo, analisou-se a variação na Taxa de crescimento do volume de carga sobre o volume de veículos de rochas, tempo médio de viagem e custo acumulado de transporte.

Ainda no Cenário de Referência, variou-se a condição inicial do estoque Valor do ICP, pois não se obteve o índice de condição do pavimento das rotas no ano inicial da simulação. Dessa forma, avaliou-se a influência da condição inicial sobre a manutenção e o custo acumulado de manutenção do pavimento.

Da mesma forma, simulou-se diferentes valores para o controle de tempo na avaliação do pavimento, com intervalos de 2 a 5 anos entre uma avaliação e a avaliação seguinte e o atraso (*delay*) no fluxo de saída do efeito da manutenção, ou seja, a duração em anos das obras de manutenção, também com intervalos de 2 a 5 anos. Os efeitos analisados foram sobre o número de solicitações de manutenção e custo acumulado de manutenção do pavimento.

O Cenário 1 foi construído para simular a prática atual de carregamento com sobrepeso. Como citado na Seção 6.2, buscou-se dados de pesagem das balanças móveis presentes no estado do Espírito Santo, o que comprovou a prática do excesso de peso por veículos transportadores de rochas ornamentais na Rota #1, com um percentual máximo de excesso no PBT de 57% e nos eixos de 71%.

Em seguida, o Cenário 2 (política rígida) e o Cenário 3 (política moderada e tolerante) também foram simulados e comparados com o Cenário de Referência. Seguindo a notação de Hang e Li (2010) e Liu e Mu (2015), três políticas de carregamento foram adotadas considerando uma variação de zero a 100% de sobrepeso, em que:

- Política Rígida – não admite sobrepeso;
- Política Moderada – admite até 50% de sobrepeso;
- Política Tolerante – admite entre 50% e 100% de sobrepeso.

Os impactos analisados referem-se à diferença no comportamento dos três custos do modelo, a saber: Custo acumulado de transporte; Custo acumulado de manutenção do pavimento; e Custo acumulado de acidentes de tráfego.

O Cenário 4 (Avaliação da Melhor Política) simulou a variação do Percentual de sobrecarga dos veículos e a variação da importância do custo social de forma concomitante, de modo a avaliar qual a melhor política de carregamento dos veículos (percentual de sobrepeso) sob diferentes cenários de importância dos custos sociais em relação aos custos econômicos, com base na minimização dos custos totais do sistema.

Por fim, o último cenário abordou uma situação diferente das hipóteses assumidas inicialmente, que se refere à prática do excesso de peso em todas as rotas analisadas, independente da presença ou operação das balanças de pesagem. Tal cenário foi

simulado para avaliação do impacto sobre todos os custos considerados no modelo. Os resultados dos cenários propostos são apresentados nas subseções seguintes.

### 8.1 Cenário de Referência

Considerando-se uma Taxa de crescimento da produção de rochas de 8% ao ano, no cenário de referência, ou seja, mantendo-se fixo o percentual de excesso de peso no carregamento dos veículos na Rota #1, a Figura 8.1 e a Figura 8.2 apresentam o comportamento da variável Veículos de rochas nas Rotas #1 e #2, respectivamente.

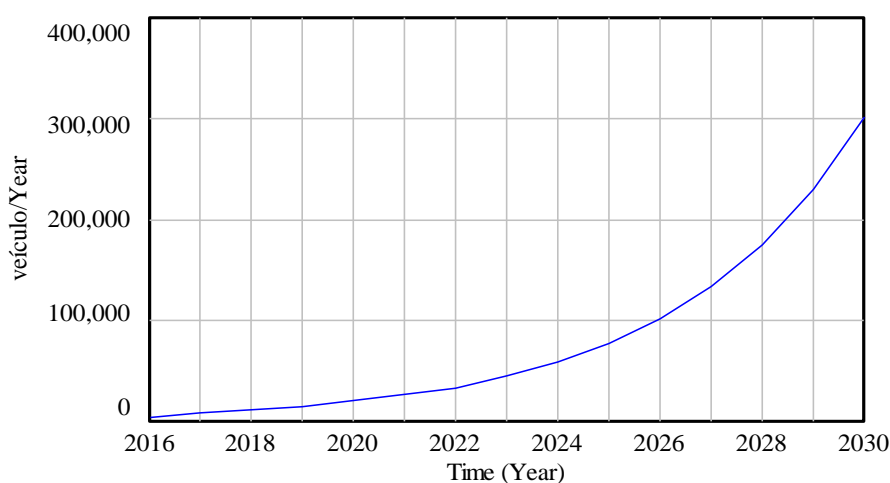


Figura 8.1 – Veículos de rochas por ano na Rota #1 com 8% de crescimento na produção de rochas ornamentais.  
Fonte: Elaboração própria.

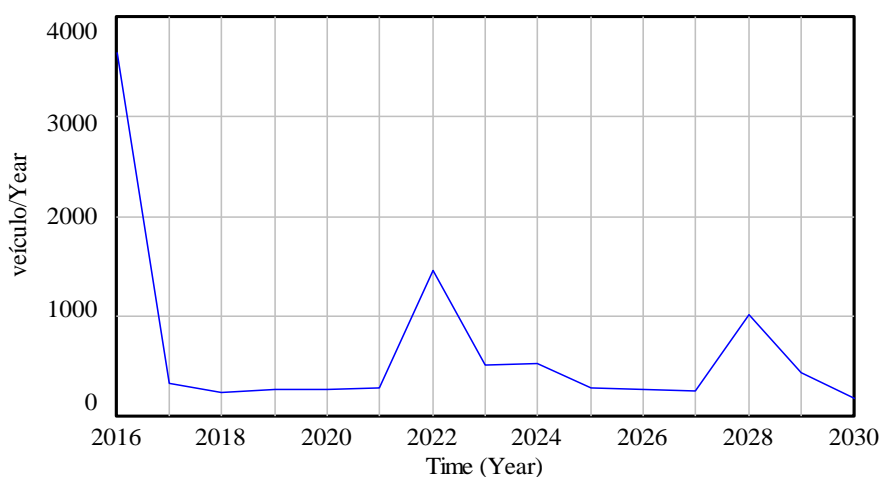


Figura 8.2 – Veículos de rochas por ano na Rota #2 com 8% de crescimento na produção de rochas ornamentais.  
Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que na Rota #1, com a prática do sobrepeso, o volume de veículos de rochas que trafegam por ano é da ordem de  $10^5$ , enquanto na Rota #2 é da ordem de  $10^3$ , pois



a proporção do volume de rochas que será transportada pela Rota #1 varia de 96 a 99%. Essa elevada proporção de veículos de rochas na Rota #1 pode ser entendida pelo menor custo operacional associado a esta rota, pela ausência da cobrança de pedágio, além da ausência de balanças fixas, o que atrai o tráfego de tais veículos.

Para a Taxa de crescimento do volume de carga igual a 11%, o volume de veículos de rochas segue o mesmo comportamento, com 96 a 99% do volume de rochas sendo transportado pela Rota #1, conforme mostram a Figura 8.3 e a Figura 8.4.

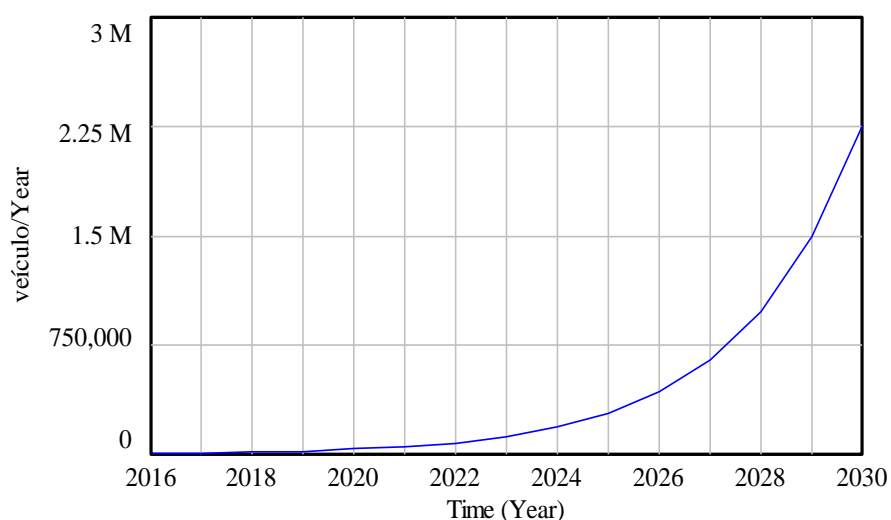


Figura 8.3 – Veículos de rochas por ano na Rota #1 com 11% de crescimento na produção de rochas ornamentais.

Fonte: Elaboração própria.

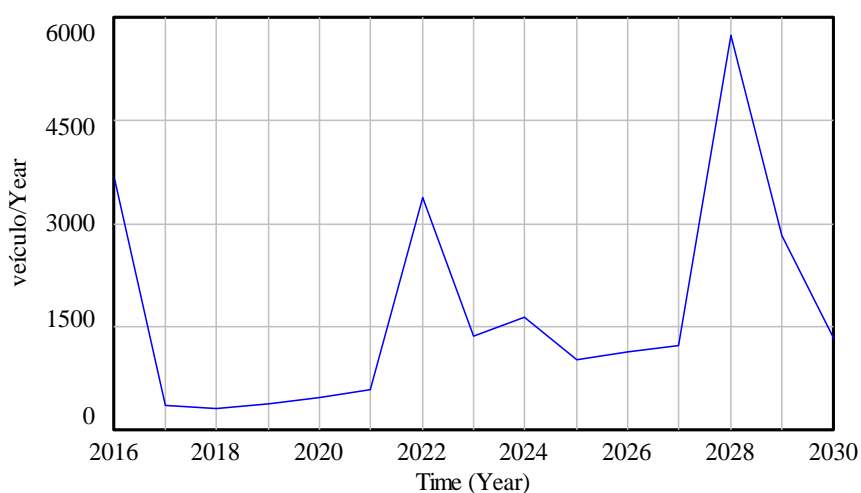


Figura 8.4 – Veículos de rochas por ano na Rota #2 com 11% de crescimento na produção de rochas ornamentais.

Fonte: Elaboração própria.

Para a Rota #1, observa-se a diferença no número de veículos de rochas em função da taxa de crescimento do volume de carga, em cada ano de simulação (2016 a 2030),

como mostra a Figura 8.5. Para um crescimento de 11% ao ano do volume de rochas ornamentais, o volume de veículos de rochas aumenta consideravelmente em relação à taxa de 8%, de modo a suprir a demanda pelo transporte de um volume maior de carga.

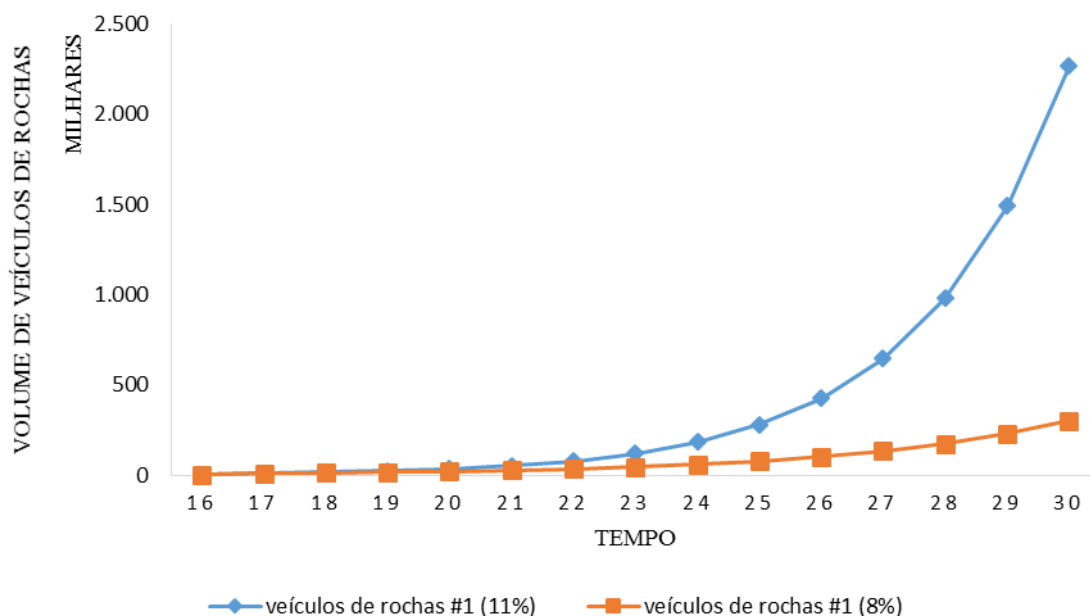


Figura 8.5 – Veículos de rochas na Rota #1 em função da taxa de crescimento no volume de carga a ser transportada.

Fonte: Elaboração própria.

Para ambas as Taxas de crescimento do volume de carga, o volume de veículos na Rota #3 segue o mesmo comportamento da Rota #1, tendo em vista que essa possui a maior proporção dos veículos. Na Rota #2, apesar do baixo volume de veículos de rochas, observa-se dois picos no volume nos anos de 2022 e 2028 para ambas as taxas de crescimento do volume de carga. Isso ocorre porque nesses períodos a Rota #2 recebe os efeitos de duas manutenções que aumentam o índice de condição do pavimento e, conseqüentemente, reduzem o custo por distância nessa rota, como mostra a Figura 8.6.

Dessa forma, a proporção de veículos na Rota #2 aumenta nesses dois períodos, porém não de forma significativa em relação à Rota #1, como pode-se observar nos gráficos da Figura 8.1 – Figura 8.4.

Com a Taxa de crescimento do volume de carga igual a 8% e 11%, o Tempo total médio de transporte é de 3,21 horas para a Rota #1 e 3,35 horas para a Rota #2, já somado o tempo de viagem da Rota #3. O tempo de viagem não difere em grandes proporções porque a distância percorrida é semelhante independente da rota selecionada. No

entanto, mesmo com a maior proporção de veículos de rochas na Rota #1, o tempo de viagem na Rota #2 ainda é um pouco maior devido ao maior fluxo de outros veículos nessa rota.

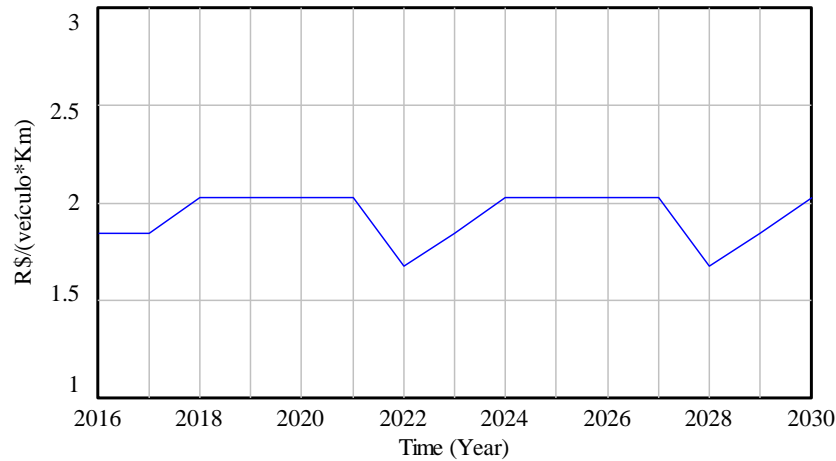


Figura 8.6 – Custo por distância na Rota #2.  
Fonte: Elaboração própria.

Além disso, o tempo de viagem não difere em relação ao percentual de crescimento do volume de carga (e conseqüentemente ao maior volume anual de veículos de rochas), porque o tempo é simulado em relação ao volume e capacidade horária. Essa relação varia entre 0,25 e 0,36 no primeiro caso e 0,25 e 0,44 no segundo caso para o trecho #1.1 (Nova Venécia a Colatina), o que indica que a capacidade ainda é superior à demanda horária, mesmo com o aumento do volume de veículos de rochas por ano. Para os demais trechos, verificou-se o mesmo comportamento.

Já o Custo acumulado de transporte é impactado de forma significativa, pois este varia em relação ao volume de carga transportada, como apresentado na Figura 8.7.

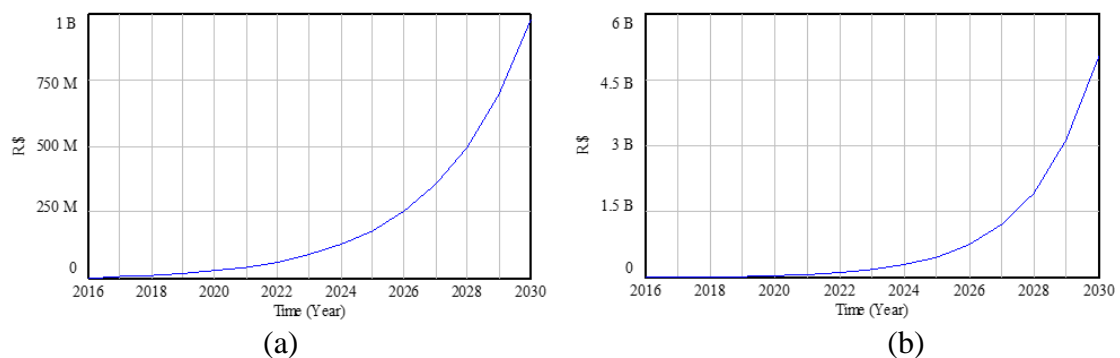


Figura 8.7 – Custo acumulado de transporte para (a) 8% e (b) 11% de crescimento no volume de carga.  
Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, percebe-se que o volume de carga transportada impacta consideravelmente no custo total do sistema analisado, devendo-se, portanto, estimar o crescimento da produção de rochas ornamentais de forma mais precisa. No entanto, essa limitação não invalida o modelo proposto, cuja simulação retrata o comportamento do sistema.

O segundo parâmetro simulado no Cenário de Referência (percentual do excesso de peso fixo), é a condição inicial do estoque Valor do ICP. Sob a condição inicial do ICP igual a 0; 25; 50; e 75 pontos, o comportamento da variável manutenção foi o mesmo nas três rotas analisadas, como mostra a Figura 8.8 e a Figura 8.9.

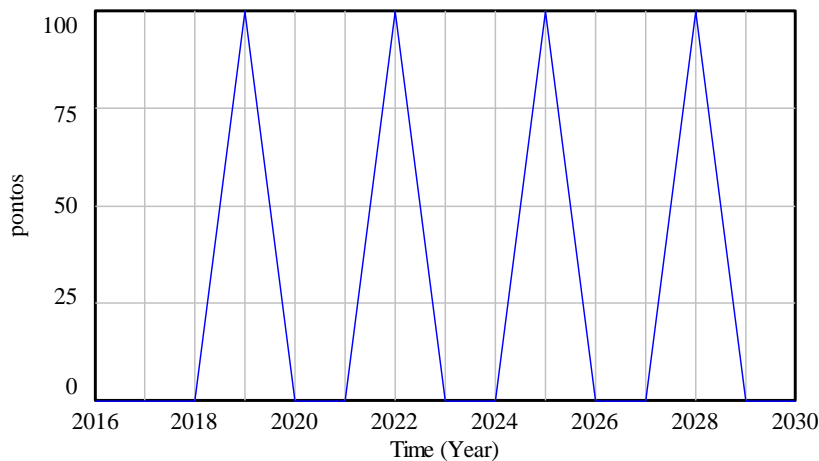


Figura 8.8 – Solicitações de manutenção nas Rotas #1 e #3 sob a condição inicial do ICP igual a 0, 25, 50 e 75 pontos.

Fonte: Elaboração própria.

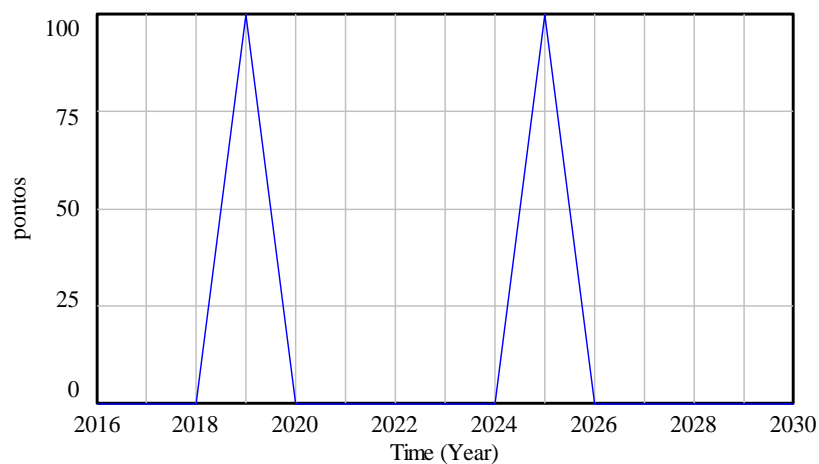


Figura 8.9 – Solicitações de manutenção na Rota #2 sob a condição inicial do ICP igual a 0, 25, 50 e 75 pontos.

Fonte: Elaboração própria.

Nas Rotas #1 e #3 são realizadas quatro manutenções restaurativas entre 2016 e 2030 com intervalos de três anos entre as manutenções, conforme Figura 8.8. Já na Rota #2 são realizadas duas manutenções restaurativas no mesmo período com um intervalo de seis anos, de acordo com a Figura 8.9. A diferença no número de manutenções nas rotas deve-se à prática do excesso de peso na Rota #1, assumido como inexistente na Rota #2. Já a Rota #3, apesar da presença de uma balança de pesagem, absorve o fluxo de veículos com e sem excesso de peso das Rotas #1 e #2.

Além disso, o número de solicitações frequentes de manutenção nas Rotas #1 e #3, independente da condição inicial do Valor do ICP, deve-se ao elevado percentual de excesso de peso de 71% por eixo no cenário de referência. No entanto, salienta-se que este percentual é o máximo encontrado em um conjunto de eixos de veículos transportadores de rochas ornamentais, mas sabe-se que este percentual não é encontrado em todos os eixos de todos os veículos em todas as viagens realizadas. Nesse sentido, pode-se aprimorar a estrutura do modelo de modo a simular diferentes percentuais de excesso de peso para cada tipo de eixo de cada categoria veicular.

Para a condição inicial do estoque Valor do ICP igual a 100 pontos, a manutenção apresentou o mesmo comportamento nas Rotas #1 e #3. Apenas a Rota #2 apresentou diferença no tipo de manutenção solicitada, como mostra a Figura 8.10.

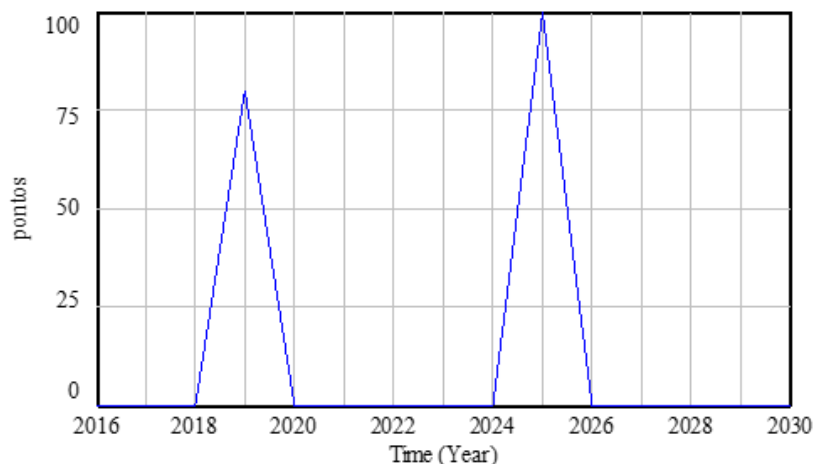


Figura 8.10 - Solicitações de manutenção na Rota #2 sob a condição inicial do ICP igual a 100 pontos.

Fonte: Elaboração própria.

Para a condição inicial do estoque Valor do ICP igual a 100 pontos, a Rota #2 solicita uma manutenção corretiva (80 pontos) em 2019 e uma manutenção restaurativa (100

pontos) em 2025. Portanto, essa é a única diferença no Custo acumulado de manutenção do pavimento entre todos os valores iniciais do ICP considerados. A Tabela 8.1 apresenta os custos de manutenção nas três rotas para a condição inicial do pavimento igual a 50 e 100 pontos.

Na Tabela 8.1, observa-se que, mesmo com a redução do custo de manutenção na Rota #2 no ano de 2019, devido à mudança no tipo de manutenção restaurativa para corretiva quando o ICP inicial é elevado de 50 para 100 pontos, o custo total de manutenção é maior para o ICP inicial igual a 100 pontos. Esse fato justifica-se, pois, o aumento do ICP em todas as rotas reduz o custo operacional por distância e aumenta a proporção de veículos de rochas na Rota #1, cujo custo ainda se refere à manutenção restaurativa, já que o aumento do ICP inicial não compensa o excesso de peso praticado nessa rota.

Tabela 8.1 – Custo manutenção do pavimento para ICP inicial igual a 50 e 100 pontos.

Ano	ICP = 50 PONTOS				ICP = 100 PONTOS			
	Rota #1 (R\$x10 <sup>6</sup> )	Rota #2 (R\$x10 <sup>6</sup> )	Rota #3 (R\$x10 <sup>6</sup> )	Total (R\$x10 <sup>6</sup> )	Rota #1 (R\$x10 <sup>6</sup> )	Rota #2 (R\$x10 <sup>6</sup> )	Rota #3 (R\$x10 <sup>6</sup> )	Total (R\$x10 <sup>6</sup> )
2019	18	0,3	1	19	18	0,2	1	19
2022	65		4	69	66		4	70
2025	234	0,9	16	251	234	0,9	16	251
2028	694		62	756	694		62	756
Total	1.010	1	84	1.095	1.011	1	84	1.096

Fonte: Elaboração própria.

O terceiro e o quarto parâmetros simulados no Cenário de Referência são o controle de tempo na avaliação do pavimento, ou seja, o intervalo em anos entre o levantamento das condições do pavimento para avaliação da necessidade de manutenção e o *delay* no fluxo de saída do efeito da manutenção ou tempo de duração das obras de manutenção. As variáveis impactadas são a Manutenção e o Custo acumulado da manutenção do pavimento.

O atraso na saída do efeito da manutenção refere-se ao tempo dispendido na realização das obras de manutenção para a elevação do ICP. Para a definição desse tempo de manutenção utilizou-se como referência o Programa Contratos de Restauração e Manutenção – CREMA que se subdivide em CREMA 1ª Etapa, com duração de dois anos, e CREMA 2ª Etapa, com duração de cinco anos (DNIT, 2007).

Considerou-se que a avaliação das condições do pavimento não é realizada caso uma operação de manutenção esteja em andamento. Dessa forma, se a manutenção leva dois

anos para ser concluída (*delay*), a avaliação poderá ser feita em intervalos de 2, 3, 4 e 5 anos. Por outro lado, se a manutenção possui um *delay* de 3 anos para ser concluída, a avaliação não será realizada de 2 em 2 anos, mas poderá ser realizada em intervalos de 3, 4 e 5 anos. A Tabela 8.2 apresenta a quantidade e o tipo de manutenção a ser realizada, bem como o custo total de manutenção em cada rota, após os experimentos de simulação.

Tabela 8.2 – Manutenção e Custo total por rota para cada combinação de intervalos de tempo da manutenção e avaliação do pavimento.

Delay (anos)	Avaliação pavimento (anos)	Manut.* Rota #1	Custo total manutenção #1	Manut.* Rota #2	Custo total manutenção #2	Manut.* rota #3	Custo total manutenção #3
2	2	4 R	1.658.018.037	2 R e 1 C	2.427.611	4 R	182.418.339
	3	4 R	1.010.624.854	2 R	1.272.970	4 R	84.030.351
	4	3 R	878.864.580	1 R e 2 C	2.480.086	3 R	74.492.566
	5	2 R	388.020.604	2 R	1.575.210	2 R	28.275.918
3	3	2 R	251.825.934	1 R e 1 C	788.948	2 R	17.472.238
	4	3 R	876.486.084	2 R	1.703.138	3 R	74.492.573
	5	2 R	387.335.132	1 R e 1 C	1.522.382	2 R	28.275.918
4	4	2 R	724.094.260	2 R	1.703.138	2 R	64.026.375
	5	2 R	385.919.132	1 R	480.876	2 R	28.275.918
5	5	1 R	43.413.788	1 R	480.876	1 R	2.747.492

Nota: \*Nesta coluna, a letra “R” indica manutenção “Restaurativa” e a letra “C” manutenção “Corretiva”.

Fonte: Elaboração própria.

Os custos variam em função de três características: tipo de manutenção; extensão da rota; e percentual de veículos de rochas na rota analisada. Por exemplo, para um *delay* de 2 anos no efeito da manutenção e um intervalo também de 2 anos entre as avaliações do pavimento, são solicitadas: 4 manutenções restaurativas na Rota #1; 2 manutenções restaurativas e 1 corretiva na Rota #2; e 4 manutenções restaurativas na Rota #3. Apesar das Rotas #1 e #3 receberem a mesma quantidade de manutenções restaurativas, o custo difere por causa da diferença na extensão das rotas e no percentual de veículos de rochas em relação ao total de veículos pesados.

Além disso, uma rota também pode apresentar custos diferentes com a mesma quantidade de um mesmo tipo de manutenção, como ocorreu na Rota #1 sob o *delay* de 2 anos e os intervalos de 2 e 3 anos entre as avaliações do pavimento. Em ambos os casos, a Rota #1 solicitou 4 manutenções restaurativas e, ainda assim, o custo total da

manutenção no período diferiu em função dos diferentes percentuais de veículos de rochas que contribuem para a degradação do pavimento e seu custo de manutenção.

Analisando-se os intervalos iguais de avaliação do pavimento (em cores iguais na Tabela 8.2), à medida que o *delay* da manutenção aumenta, o número de solicitações e, conseqüentemente, o custo da manutenção é reduzido. O custo mínimo de manutenção do pavimento em todas as rotas ocorre com o máximo intervalo de tempo entre as avaliações de condição do pavimento e *delay* do efeito da manutenção. No entanto, os gestores devem decidir sobre o *trade-off* entre a redução do custo de manutenção e o índice de condição do pavimento que mede a condição de trafegabilidade da rede viária. Quanto maior o intervalo de tempo entre as avaliações do pavimento, menores os custos de manutenção, mas piores serão as condições do pavimento, conforme ilustrado na Figura 8.11 e na Figura 8.12.

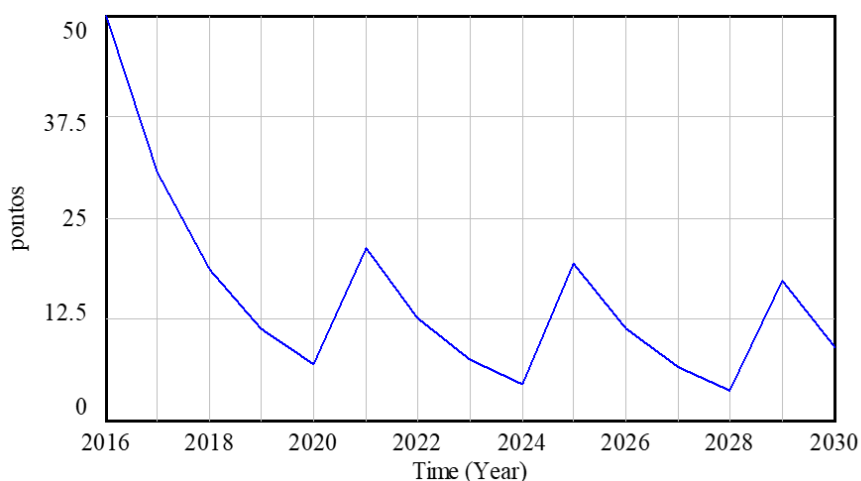


Figura 8.11 – Valor do ICP da Rota #1 para um intervalo de dois anos na avaliação do pavimento e dois anos nas obras de manutenção.

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 8.11 e na Figura 8.12, ilustra-se dois extremos dos intervalos de tempo simulados para a avaliação do pavimento e realização da manutenção na Rota #1. No primeiro caso, os intervalos são de dois anos com a realização de quatro manutenções restaurativas e, no segundo caso, os intervalos são de cinco anos para as duas variáveis com a realização de apenas uma manutenção restaurativa. Da Tabela 8.2, sabe-se que a diferença no custo com manutenção é de 97%, no entanto, o índice de condição do pavimento permanece abaixo do limite para a manutenção restaurativa sob as condições do tráfego estabelecidas.



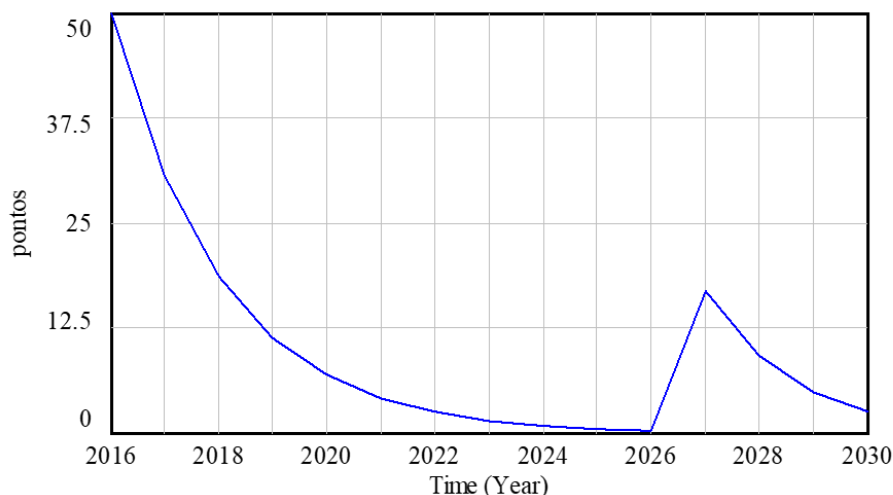


Figura 8.12 – Valor do ICP da Rota #1 para um intervalo de cinco anos na avaliação do pavimento e cinco anos nas obras de manutenção.

Fonte: Elaboração própria.

Devido à grande possibilidade de combinação de cenários com os parâmetros simulados, para os demais cenários selecionou-se valores fixos, a partir das análises do cenário de referência. Para a Taxa de crescimento do volume de rochas ornamentais, considerou-se 11% com base em Alice Web (2017) e Chiodi Filho (2009a).

Já para o Valor inicial do ICP, tendo em vista a relação deste índice com os índices de irregularidade e os conceitos da avaliação subjetiva proposta pelo DNIT (2006b), tomou-se o valor de 50 pontos para o ICP inicial, que se encontra no conceito “regular”, o que está de acordo com o resultado da Pesquisa CNT de Rodovias em relação ao estado do pavimento e em relação ao estado geral das rodovias (CNT, 2016).

Para o atraso na saída do efeito da manutenção ou tempo de realização da manutenção utilizou-se como referência o CREMA 1ª Etapa, com duração de dois anos (DNIT, 2007). Por fim, o intervalo de tempo para o levantamento das condições do pavimento foi tomado como três anos. Assim, para os parâmetros para o cenário-base foram definidos como:

- Taxa de crescimento do volume de carga: 11%;
- Valor inicial do ICP: 50 pontos;
- *Delay* saída do efeito da manutenção: 2 anos; e
- Controle do tempo de avaliação do pavimento: 3 anos.

Dessa forma, simulou-se o cenário-base com tais parâmetros e o percentual fixo de excesso de carga, a fim de comparação posterior com os demais cenários em que diferentes políticas de carregamento serão simuladas. A Figura 8.13 apresenta os custos acumulados de transporte (custo econômico), manutenção do pavimento e acidentes de tráfego (custos sociais), bem como o custo total para o Cenário de Referência.

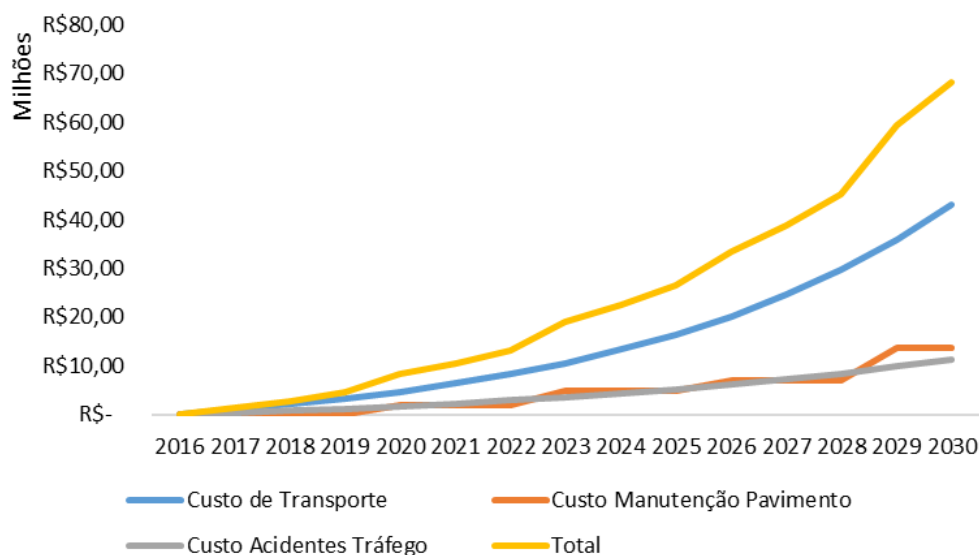


Figura 8.13 – Custos econômicos, sociais e total acumulados no cenário-base.  
Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que o custo econômico de transporte é mais expressivo do que a soma dos custos sociais de manutenção do pavimento e acidentes de tráfego, representando 63% do custo total acumulado no período de 2016 a 2030. No entanto, salienta-se que os custos sociais são subdimensionados no trabalho, pois considera-se apenas o custo de manutenção do pavimento e acidentes de tráfego, e desconsidera outros custos importantes mas que não foi possível a mensuração, como o atraso na viagem de veículos em ocasiões de acidentes e bloqueio da rodovia, com diversas consequências para os envolvidos, como necessidade das empresas manterem estoques de segurança e risco de degradação e poluição ambiental com acidentes envolvendo veículos de cargas perigosas, por exemplo. Os próximos cenários apresentam o impacto do percentual de excesso de peso sobre os custos do sistema.

## 8.2 Política Rígida

No cenário da Política Rígida, considera-se que o excesso de peso, tanto no PBT quanto nos eixos, é nulo, ou seja, os limites legais de peso seriam respeitados pelos transportadores de carga. Neste caso, os custos são apresentados na Figura 8.14.

A imposição legal sobre os limites de peso no carregamento dos veículos de carga aumenta o custo econômico de transporte, uma vez que esse custo é rateado pelo volume de carga transportada, eliminando-se a economia de escala obtida com o excesso de peso. Já os custos sociais com manutenção e acidentes são reduzidos em relação ao Cenário de Referência, como mostra a Figura 8.15.

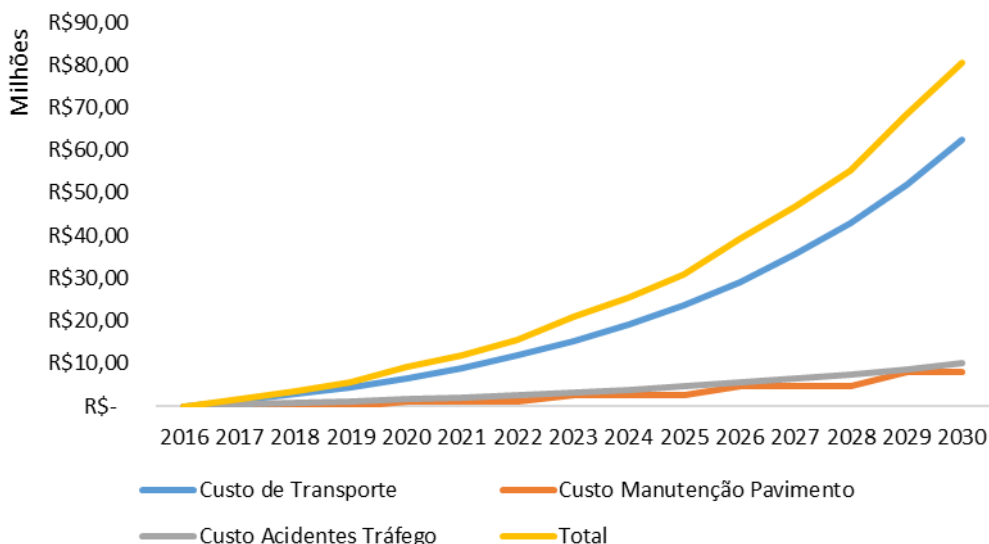


Figura 8.14 – Custos econômicos, sociais e total acumulados no cenário Política Rígida.  
Fonte: Elaboração própria.

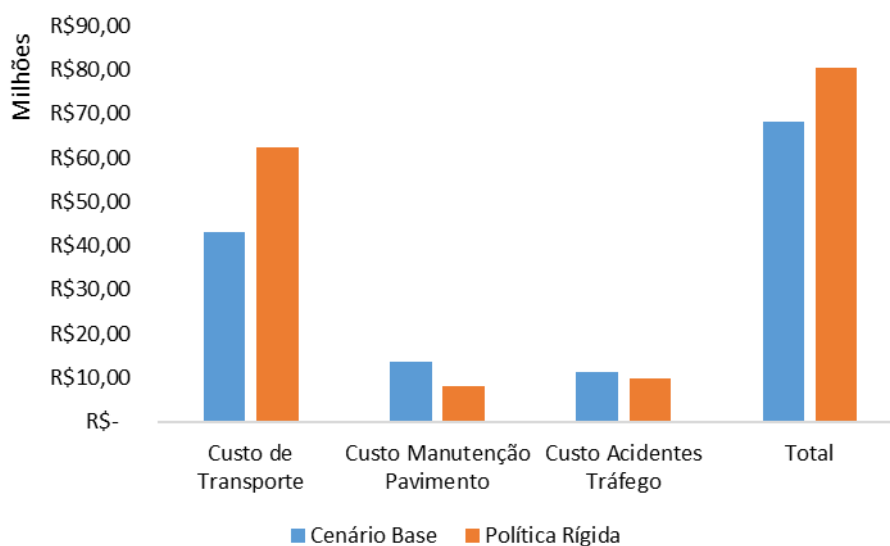


Figura 8.15 – Comparação dos custos no cenário-base e política rígida.  
Fonte: Elaboração própria.

O custo econômico de transporte aumenta 45%, os custos com manutenção e com acidentes de tráfego reduzem 41% e 12%, respectivamente, e o custo total sofre um aumento de 18%. Analisando-se unicamente os resultados numéricos, pode-se dizer que a política rígida, com imposição e cumprimento legal dos limites de peso dos veículos

de carga, causa prejuízo para o sistema como um todo, tendo em vista o aumento do custo total. Entretanto, mais estudos deveriam ser realizados a fim de se avaliar o número de acidentes ocasionados exclusivamente pelos veículos do transporte de rochas ornamentais, tendo em vista que o número de acidentes no modelo é estimado pelo percentual do volume de tais veículos e o número total de acidentes da rodovia, sem distinção do tipo de veículo envolvido. Além disso, ressalta-se também a necessidade de atribuir a devida importância a cada tipo de custo para a decisão do melhor cenário.

### 8.3 Política Moderada e Tolerante

Na Política Moderada, o percentual de excesso de peso varia de 0 a 50% e na Política Tolerante, varia de 50 a 100%. Nesse cenário, o excesso de carga foi incrementado gradualmente, de 10 em 10%, para avaliação do comportamento de cada custo separadamente e o custo total do sistema, como mostra a Tabela 8.3. As células destacadas em cinza indicam os menores valores de custos das respectivas colunas.

Tabela 8.3 – Custos econômicos e sociais no cenário Política Moderada e Tolerante.

Cenário	Excesso de peso	Custo de Transporte (R\$)	Custo de Manutenção do Pavimento (R\$)	Custo de Acidentes de Tráfego (R\$)	Custo Total (R\$)
Política Moderada	10%	58.908.980,00	<b>8.105.233,00</b>	<b>10.682.519,00</b>	77.696.732,00
	20%	54.648.836,00	8.884.721,00	11.053.576,00	74.587.133,00
	30%	50.911.264,00	8.942.155,00	11.199.539,00	71.052.958,00
	40%	47.685.272,00	9.024.282,00	11.260.134,00	67.969.688,00
	50%	44.843.116,00	9.033.064,00	11.287.587,00	65.163.767,00
Política Tolerante	60%	42.407.408,00	9.035.846,00	11.301.690,00	62.744.944,00
	70%	40.273.284,00	11.143.123,00	11.309.238,00	62.725.645,00
	80%	38.381.336,00	15.715.177,00	11.313.623,00	65.410.136,00
	90%	36.611.484,00	15.711.889,00	11.316.477,00	63.639.850,00
	100%	<b>35.018.720,00</b>	15.706.810,00	11.318.336,00	<b>62.043.866,00</b>

Fonte: Elaboração própria.

Os custos apresentados referem-se ao custo acumulado no final do período de simulação, ou seja, são os custos totais entre 2016 e 2030. Observa-se que, à medida que o percentual de excesso de peso aumenta, o custo econômico de transporte é reduzido, confirmando a economia de escala obtida pela prática do transporte com excesso de carga. O custo mínimo de transporte ocorre sob um percentual de 100% de excesso de peso.

Já os custos sociais mínimos ocorrem sob um percentual de 10% de excesso de peso (mas são ainda menores sob a política rígida) e aumentam com o incremento do excesso de carga, mas não de forma tão significativa quanto a redução do custo econômico. Dessa forma, o custo total do sistema é reduzido com a prática do excesso de peso no transporte rodoviário de cargas, como apresenta a Figura 8.16.

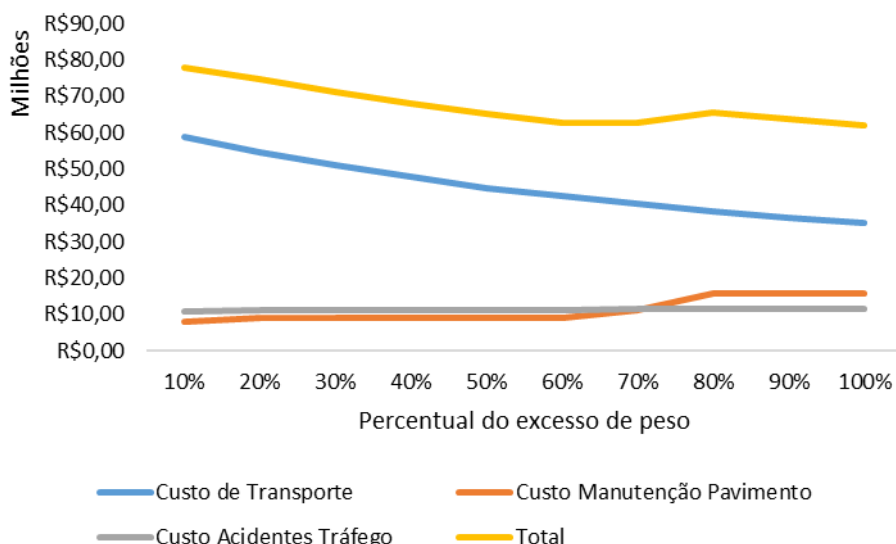


Figura 8.16 – Comparação dos custos no cenário Política Moderada e Tolerante.  
Fonte: Elaboração própria.

A redução no custo total do sistema pode chegar a 23% entre a Política Rígida e a Política Tolerante com 100% de excesso de carga, no entanto, como já mencionado anteriormente, os gestores responsáveis devem levar em consideração a importância de cada custo para a sociedade. Portanto, o próximo cenário avalia os custos com base tanto na variação do excesso de peso, quanto na importância dos custos sociais em relação ao custo econômico de transporte.

#### 8.4 Avaliação da Melhor Política

A variação da importância relativa do custo social em relação ao custo econômico deve ser considerada pelos gestores responsáveis como critério de avaliação das melhores políticas a serem adotadas, com base na minimização dos custos totais. A Tabela 8.4 apresenta os custos totais do sistema, considerando-se a importância do custo social, em que este varia de 0 (sem importância) a 100 (extrema importância) para cada política de carregamento (rígida, moderada e tolerante). Assim como na Tabela 8.3, as células destacadas em cinza também indicam os menores valores das respectivas colunas.

Os resultados da Tabela 8.4 mostram que, para o caso em que os custos sociais têm importância menor do que o custo econômico ou estes são igualmente importantes, a melhor alternativa é a sobrecarga de 100% nos veículos para a redução do custo total do sistema. Para uma importância relativa dos custos sociais de 60 a 80%, os custos totais são mínimos sob um percentual de 60% de excesso de peso nos veículos de carga. Apenas no cenário em que os custos sociais são de extrema importância em comparação ao custo de transporte, o custo total mínimo é identificado na política rígida, em que os limites legais de peso são cumpridos.

Tabela 8.4 – Custo acumulado total sob variação do percentual de sobrecarga e importância do custo social em relação ao custo econômico (R\$ milhões).

Importância do custo social		Sem Importância			Pouco Importante		Igualmente Importante	Muito Importante		Extrema Importância		
		0	10	20	30	40		50	60	70	80	90
Política Rígida	0%	62,4	58,0	53,6	49,1	44,7	40,2	35,8	31,4	26,9	<b>22,5</b>	<b>18,0</b>
	10%	58,9	54,9	50,8	46,9	42,8	38,9	34,8	30,8	26,8	22,8	18,8
Política Moderada	20%	54,6	51,2	47,7	44,2	40,7	37,3	33,8	30,4	26,9	23,4	19,9
	30%	50,9	47,8	44,8	41,7	38,6	35,5	32,5	29,4	26,3	23,2	20,1
	40%	47,6	44,9	42,2	39,5	36,7	34,0	31,2	28,5	25,8	23,0	20,3
	50%	44,8	42,4	39,9	37,5	35,0	32,6	30,1	27,7	25,2	22,8	20,3
Política Tolerante	60%	42,4	40,2	38,0	35,8	33,6	31,4	<b>29,2</b>	<b>27,0</b>	<b>24,8</b>	22,5	20,3
	70%	40,3	38,5	36,7	34,9	33,1	31,4	29,6	27,8	26,0	24,2	22,5
	80%	38,4	37,3	36,1	35,0	33,8	32,7	31,6	30,4	29,3	28,2	27,0
	90%	36,6	35,7	34,7	33,7	32,8	31,8	30,9	29,9	28,9	28,0	27,0
	100%	<b>35,0</b>	<b>34,2</b>	<b>33,4</b>	<b>32,6</b>	<b>31,8</b>	<b>31,0</b>	30,2	29,4	28,6	27,8	27,0

Fonte: Elaboração própria.

Cabe aos gestores responsáveis, novamente, a imposição da devida importância de cada categoria de custo analisada. No entanto, tendo em vista que a deterioração do pavimento dos segmentos da rodovia em análise (BR 101) afeta a infraestrutura logística do país e a competitividade da produção nacional e, os custos com acidentes devem ser nulos em um cenário ideal, acredita-se que os custos sociais deveriam ser considerados de extrema importância para os interesses da sociedade e não somente para um grupo minoritário de empresas privadas.

## 8.5 Excesso de Peso em todas as Rotas

O objetivo desse cenário é avaliar novamente o comportamento dos custos considerados no modelo, sob a condição da prática de excesso de peso em todas as possíveis rotas de

escoamento da produção de rochas ornamentais, independente da presença e fiscalização por balanças de pesagem.

Para isso, acrescentou-se a variável “Percentual de sobrecarga” ao carregamento de veículos na Rota #2. A Tabela 8.5 apresenta os custos de transporte, manutenção do pavimento e acidentes de tráfego, bem como o custo total acumulado para cada percentual de excesso de peso praticado nas duas rotas possíveis de transporte das rochas ornamentais, destacando-se em cinza o custo mínimo de cada categoria.

Tabela 8.5 – Custos no cenário com todas as rotas em excesso de carga (R\$).

Cenário	Excesso de peso	Custo de Transporte	Custo de Manutenção do Pavimento	Custo de Acidentes de Tráfego	Total
<b>Política Rígida</b>	0%	62.444.356,00	8.072.306,00	9.956.531,00	80.473.193,00
<b>Política Moderada</b>	10%	56.880.892,00	6.418.579,00	9.999.498,00	73.298.969,00
	20%	51.983.908,00	6.862.883,50	<b>9.936.235,00</b>	68.783.026,50
	30%	48.008.948,00	<b>6.113.306,50</b>	9.944.422,00	64.066.676,50
	40%	44.772.580,00	7.871.248,50	10.003.806,00	62.647.634,50
	50%	41.712.944,00	8.553.867,00	9.969.701,00	60.236.512,00
<b>Política Tolerante</b>	60%	39.496.832,00	8.552.256,00	10.067.161,00	<b>58.116.249,00</b>
	70%	37.418.580,00	11.413.970,00	10.135.188,00	58.967.738,00
	80%	35.393.508,00	16.106.194,00	10.125.914,00	61.625.616,00
	90%	33.539.002,00	16.100.504,00	10.124.556,00	59.764.062,00
	100%	<b>31.890.532,00</b>	16.098.772,00	10.132.575,00	58.121.879,00

Fonte: Elaboração própria.

À medida que o percentual de excesso de peso aumenta igualmente nas duas rotas, a proporção do volume de carga distribuída é mais igualitária e, ao contrário do que ocorria nos cenários anteriores, o custo de manutenção do pavimento e acidentes inicialmente reduz, porque tais impactos não sobrecarregam apenas uma rota. Em seguida, a partir de 30% e 20% de sobrepeso, os custos de manutenção e de acidentes aumentam, respectivamente.

O custo total ainda é minimizado sob a Política Tolerante de carregamento, com 60% de excesso de carga por veículo, já que o custo econômico é mais expressivo do que os custos sociais, caso não seja considerada a importância relativa de cada custo.

A importância relativa dos custos sociais em relação ao custo econômico também foi simulada para o caso em que ambas as rotas possuem excesso de peso nos veículos de

rochas ornamentais. Os resultados são mostrados na Tabela 8.6. Percebe-se que, quanto maior a importância dos custos sociais relativos à manutenção do pavimento e acidentes de tráfego em relação ao custo econômico de transporte, menor deve ser o percentual de excesso de peso para a minimização dos custos totais.

Tabela 8.6 – Custo acumulado total sob variação do percentual de sobrecarga e importância do custo social em relação ao custo econômico (R\$ milhões).

Importância do custo social		Sem Importância			Pouco Importante		Igualmente Importante	Muito Importante		Extrema Importância		
		0	10	20	30	40		50	60	70	80	90
Política Rígida	0%	62,0	58,0	53,6	49,1	44,7	40,2	35,8	31,4	26,9	22,5	18,0
	10%	56,9	52,8	48,8	44,7	40,7	36,7	32,6	28,6	24,5	20,5	16,4
Política Moderada	20%	52,0	48,5	45,0	41,4	38,0	34,3	30,9	27,3	23,8	20,3	16,8
	30%	48,0	44,8	41,6	38,4	35,2	32,0	28,8	25,6	<b>22,5</b>	<b>19,2</b>	<b>16,1</b>
	40%	44,7	42,0	39,4	36,7	34,0	31,3	28,6	26,0	23,3	20,6	17,9
	50%	41,7	39,4	37,0	34,8	32,4	30,1	27,8	25,5	23,1	20,8	18,5
Política Tolerante	60%	39,5	37,4	35,3	33,2	31,0	<b>29,1</b>	<b>27,0</b>	<b>24,9</b>	22,8	20,7	18,6
	70%	37,4	35,8	34,2	32,7	31,0	29,5	27,9	26,3	24,7	23,1	21,5
	80%	35,4	34,5	33,6	32,6	31,7	30,8	29,9	29,0	28,1	27,1	26,2
	90%	33,5	33,0	32,1	31,3	30,6	29,9	29,1	28,4	27,7	27,0	26,2
	100%	<b>31,9</b>	<b>31,3</b>	<b>30,8</b>	<b>30,2</b>	<b>29,6</b>	29,1	28,5	27,9	27,4	26,8	26,2

Fonte: Elaboração própria.

A diferença de custos entre os cenários com excesso de peso apenas na Rota #1 e com excesso de peso nas Rotas #1 e #2, varia de 6% a 15% de acordo com o peso do custo social, cujos resultados são apresentados na Figura 8.17.

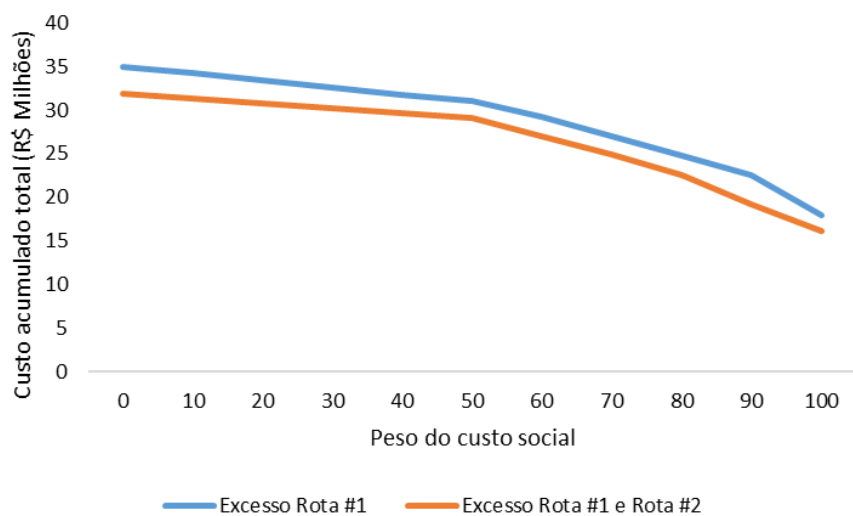


Figura 8.17 – Diferença de custos nos cenários com excesso de peso apenas na Rota #1 e nas Rotas #1 e #2.

Fonte: Elaboração própria.



Percebe-se que, economicamente, é melhor que os veículos de rochas ornamentais sobrecarregados utilizem as duas rotas ao invés de apenas uma, pois os danos causados pelo excesso de peso em apenas uma rota, como a deterioração do pavimento por exemplo, são maiores para o sistema sob as condições estabelecidas.

Isso ocorre porque, com o excesso de peso nos veículos de rochas apenas na Rota #1, a proporção do volume de carga nessa rota é em média 90%, fazendo com que a maior parte dos veículos de rochas utilizem essa rota para o transporte, penalizando-a em relação à Rota #2. Já com a prática de excesso de peso em ambas as rotas, a proporção do volume de carga na Rota #1 reduz para 48% em média, equilibrando os danos provocados pelo excesso de peso por ambas as rotas.

No entanto, sabe-se que na prática, os veículos de carga optam pela Rota #1 devido ao menor custo operacional pela ausência de pedágio e os veículos sobrecarregados também optam por esta rota pela ausência de balanças de pesagem e a menor possibilidade de uma ação fiscalizadora em comparação à Rota #2.

## 9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio da discussão teórica apresentada foi possível compreender o impacto do excesso de peso em veículos de carga sobre alguns custos envolvidos, como o custo operacional de transporte, custos com manutenção do pavimento e acidentes rodoviários.

No entanto, a literatura possui algumas limitações, como por exemplo, a consideração de uma via rodoviária dedicada ao transporte de uma carga específica, o que torna o modelo simplificado em relação à realidade, pois não se considera o tráfego de uma gama diversificada de veículos e seus impactos sobre variáveis como capacidade viária, tempo de viagem e custo operacional de transporte.

Além disso, verificou-se a importância de observar o intervalo de tempo entre as avaliações da condição do pavimento, bem como o intervalo de tempo sobre a duração das obras de manutenção, que impactam de forma relevante no custo de manutenção do pavimento. No entanto, tais intervalos de tempo não contemplam o atraso entre a tomada decisão sobre a necessidade de realização da manutenção e o efetivo início das obras nas rodovias, para atividades como licitações ou contratação de terceirizadas para o serviço de manutenção. Esse atraso pode afetar ainda mais o índice de condição do pavimento, sendo interessante realizar uma futura análise sobre esse impacto decorrido do atraso mencionado.

Dessa forma, o objetivo do trabalho foi alcançado, visto que o modelo de simulação proposto auxilia a compreensão do comportamento do sistema real, quantificando o impacto do excesso de peso no transporte rodoviário de cargas sobre os custos operacionais de transporte, manutenção do pavimento e acidentes rodoviários.

Por meio dos cenários criados para a simulação do modelo computacional foi possível comparar o impacto das políticas rígida, moderada e tolerante sobre os custos econômicos e sociais, bem como sobre o custo total do modelo. Além disso, atribuiu-se pesos para os custos econômicos e sociais para avaliação das melhores políticas em cada caso. Por fim, o último cenário comparou a diferença de custos quando o excesso de peso é praticado em apenas uma rota ou em ambas as rotas analisadas.

Os resultados confirmam a estratégia empresarial de redução no custo unitário operacional de transporte com a prática de excesso de peso nos veículos de rochas ornamentais. No entanto, à medida que o percentual de excesso de peso aumenta, os custos sociais envolvidos, manutenção do pavimento e acidentes rodoviários, também aumentam. Dessa forma existe um *trade-off* entre a redução do custo econômico e dos custos sociais, devendo-se medir tais custos pela respectiva importância atribuída.

A prática do excesso de peso por eixo aumenta a produtividade e os lucros da indústria do transporte, mas por outro lado gera ônus para a sociedade, como a rápida deterioração dos pavimentos, aumento de gastos na manutenção viária, além da insegurança nas viagens, causada pelo aumento no índice de acidentes.

A deterioração das estradas brasileiras tem impacto direto no custo logístico e, conseqüentemente, na competitividade dos produtos nacionais frente à economia globalizada. Além disso, a falta de infraestrutura ou a baixa qualidade da infraestrutura existente desmotiva a atração de novos investimentos. Com relação aos acidentes rodoviários, utilizam-se apenas os custos mensuráveis, ou seja, os custos com acidentes utilizados no trabalho estão subestimados, já que não é possível computar o custo da perda de vidas, por exemplo.

Além disso, existe uma série de outros custos associados às externalidades negativas que não foram mensurados no trabalho, como os custos indiretos relacionados ao tempo de atraso das viagens, nas ocasiões em que as rodovias são bloqueadas por motivos de acidentes, forçando as empresas a manterem estoques de segurança, mesmo aquelas que dependem de fornecimento diário de suprimentos, além dos prejuízos pessoais dos diversos usuários das rodovias. Outros custos não mensurados no trabalho são referentes aos impactos ambientais quando esses acidentes envolvem veículos com cargas perigosas, colocando em risco a integridade ambiental do ecossistema em torno do evento ocorrido. Portanto, os impactos sociais deveriam ser melhor estudados e mensurados para a avaliação mais precisa dos custos reais relacionados.

Para o cenário em que os custos sociais são considerados de extrema importância, os resultados mostram que se deve adotar uma política rígida com relação à tolerância no excesso de peso dos veículos transportadores. No entanto, identificou-se uma tolerância cada vez maior admitida legalmente em relação ao peso transmitido por eixo, o que

contribui para a deterioração acelerada do pavimento e a outros danos associados. Ainda assim, as infrações por excesso de peso são frequentes nas rodovias nacionais.

Portanto, acredita-se que a fiscalização deve ser realizada de forma ininterrupta, além de outras ações como conscientização dos motoristas, que também correm riscos devido aos acidentes, declaração obrigatória do peso da carga na nota fiscal por parte dos embarcadores, além de multas equivalentes ao lucro obtido pela prática do excesso de peso, também são válidas na tentativa de sanar o problema.

Nesse contexto, acredita-se que esse trabalho contribui para a literatura de modo a complementar o conhecimento difundido. Além disso, o presente estudo contribui para o planejamento estratégico e tomada de decisão no que se refere à formulação e implementação de políticas que regulamentam o peso de cargas no sistema de transporte rodoviário brasileiro por meio de um modelo de simulação dinâmica, auxiliando no entendimento do comportamento do sistema, na quantificação dos custos envolvidos com base no percentual do excesso de peso praticado, mas, principalmente, na importância dada a cada categoria de custo.

Com relação às limitações, a ausência de alguns dados, como a série histórica do volume médio diário anual de veículos nos trechos das rotas em estudo, impossibilitou a realização de alguns testes do modelo, como avaliação de parâmetros e reprodução de comportamentos por meio de relações estatísticas. No entanto, tais testes poderão ser realizados à medida que os dados necessários sejam obtidos.

Após conclusão da presente pesquisa, dentro do escopo dos assuntos analisados, ainda existem diversos fatores que podem ser analisados de forma mais detalhada e podem ser abordados em novas pesquisas. Dessa forma, como complemento desta dissertação são sugeridas as seguintes atividades:

- Estimar mais precisamente os parâmetros de entrada no modelo, como a taxa de crescimento do volume de carga, condição inicial do índice de condição do pavimento, definição do intervalo de tempo entre as avaliações de condição do pavimento pelos órgãos competentes e duração das obras de manutenção do pavimento;

- Realizar os testes de avaliação de parâmetros e reprodução de comportamentos a medida que seja possível obter séries históricas dos dados necessários;
- Realizar um estudo sobre a relação entre a vida útil e a condição do pavimento com base em rodovias nacionais, ou seja, como a redução da vida útil e o número de solicitações do eixo padrão impacta no índice de condição do pavimento no país;
- Incluir um módulo no modelo de simulação a respeito dos impactos ambientais ocasionados pela prática do excesso de peso em veículos de carga, como aumento no consumo de combustível, custos de emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa;
- Incluir outros impactos sociais para a melhor estimativa dos reais custos indiretamente arcados pela sociedade devido à prática do excesso de carga;
- Expandir o modelo de simulação para abranger outras categorias veiculares que trafegam na rota em estudo, além dos veículos de rochas ornamentais e avaliar os custos associados sob a variação do excesso de peso em todas as categorias;
- Comparar os resultados obtidos no estudo de caso com o sentido oposto de tráfego analisado e com outras rotas de interesse;
- Comparar os resultados obtidos no estudo de caso com os resultados obtidos pela implementação do modelo em outros aplicativos computacionais de simulação dinâmica; e
- Implementar um modelo de simulação a fim de comparação dos custos sob um cenário de integração logística com utilização de outros modos de transporte mais eficientes, como ferroviário e hidroviário.

Em suma, o modelo de simulação proposto auxilia na compreensão do comportamento dinâmico do sistema de transporte rodoviário de rochas ornamentais sob diferentes políticas de carregamento dos veículos, cujos resultados ajudam na tomada de decisões, em prol da sustentabilidade da atividade transportadora.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBAS, K. A., BELL, M. G. H., 1994, “System Dynamics Applicability to Transportation Modeling”, *Transportation Research Part A*, v. 28, n. 5, pp. 373–390.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. *RNTRC em Números*. 2017a. Disponível em: <<http://portal.antt.gov.br/index.php/content/view/4969.html>>. Acesso em: 14 jul. 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. *Pontos de pesagem e fiscalização em rodovias*. 2017b. Disponível em: <[http://www.antt.gov.br/backend/lixeria/Pontos\\_de\\_pesagem\\_e\\_fiscalizacao\\_em\\_rodovias\\_20170320175121.html](http://www.antt.gov.br/backend/lixeria/Pontos_de_pesagem_e_fiscalizacao_em_rodovias_20170320175121.html)>. Acesso em: 25 jul. 2017.
- ALASAD, R., MOTAWA, I., 2016, “Dynamic demand risk assessment for toll road projects”, *Construction Management and Economics*, v. 33, n. 10, pp. 799-817.
- ALBANO, J. F., 2005, *Efeitos dos excessos de carga sobre a durabilidade de pavimentos*. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- ALBANO, J. F., 2004, “Excessos de carga e pesagem de veículos rodoviários de carga”. In: *Anais da Semana de Engenharia de Produção e Transportes*, Porto Alegre.
- ALBUQUERQUE, M., 2017, *Os sete erros no transporte de rochas pela BR-101 no Espírito Santo*. G1 – ESPÍRITO SANTO. Disponível em: <<https://g1.globo.com/espírito-santo/noticia/os-sete-erros-no-transporte-de-rochas-pela-br-101-no-espírito-santo.ghtml>>. Acesso em: 22 out. 2017.
- ALICE WEB, 2017, *Exportação Municípios 1997-2017*. Disponível em: <<http://aliceweb.mdic.gov.br/>>. Acesso em: 10 dez. 2017.
- ALVEZ, L. B., 2008, *Aplicação da dinâmica de sistemas no planejamento de projetos de desenvolvimento: projetos de habitação social*. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- APCD – Anhui Provincial Communications Department, 2006, *Vehicle Overloading Study in Anhui Province P. R. China: Final Report*. The World Bank, Anhui.

- ANTONINO J. P., 2007, *Uso da simulação de sistemas dinâmicos para análise de logística hospitalar: gestão integrada de estoque e capacidade*. 117 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo), Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE DE CARGAS E LOGÍSTICA (NTC&LOGÍSTICA), 2011, *Impacto do estado das rodovias sobre o custo operacional dos caminhões*. Disponível em: <<http://www.ntcelogistica.org.br/tecnico/impactorod.asp>>. Acesso em: 05 ago. 2017.
- BARTHOLOMEU, D. B., 2006, *Quantificação dos impactos econômicos e ambientais decorrentes do estado de conservação das rodovias brasileiras*. 165 f. Tese (Doutorado em Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BAZZAN, A. L. C. “Testando o Efeito de Políticas na Área de Mobilidade Urbana através de Modelagem Baseada em Agentes: Projeto LabTrans”. In: D’AGOSTO, M. A. *et al.* (Org.), *Transportes em Perspectiva: Uma Contribuição dos Pesquisadores Brasileiros para o Futuro dos Transportes*. Rio de Janeiro, Ed. ANPET, 2014.
- BERTUSSI, G. L., ELLERY JUNIOR, R., 2012, “Infraestrutura de transporte e crescimento econômico no Brasil”, *Journal of Transport Literature*, v. 6, n. 4, pp. 101-132.
- BETTEGA, W. P., 2013, *Cálculo do Número N – USACE*. Notas de Aula. Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <[http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/NUMERO%20N%20\(Bettega\).pdf](http://www.dtt.ufpr.br/Pavimentacao/Notas/NUMERO%20N%20(Bettega).pdf)>. Acesso em: 27 dez. 2017.
- BLOWER, D., WOODROOFFE, J., 2012, *Survey of the status of truck safety: Brazil, China, Australia, and The United States*. Transportation Research Institute, The University of Michigan, Michigan: UMTRI, 2012.
- BOCK, A. L., 2016, *Pesagem em movimento de cargas atuantes em rodovias e seu impacto no desempenho de pavimentos da rede temática de asfalto*. 273 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- BORGES, R. C. N., 2012. *Fiscalização de excesso de peso em rodovias*. Brasília: Câmara dos Deputados.

- BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. Institui o Código de Trânsito Brasileiro. *Diário Oficial da União*, Brasília, 1997.
- BRASIL. Lei nº 10.233, de 5 de junho de 2001. Dispõe sobre a reestruturação dos transportes aquaviário e terrestre, cria o Conselho Nacional de Integração de Políticas de Transporte, a Agência Nacional de Transportes Terrestres, a Agência Nacional de Transportes Aquaviários e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2001.
- BRASIL. Lei nº 10.561, de 13 de novembro de 2002. Altera as Leis nºs 10.209, de 23 de março de 2001, e 10.233, de 5 de junho de 2001, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2002.
- BRITO, L. A. T., CERATTI, J. A. P., NÚÑEZ, W. P., BOCK, A., VITORELLO, T., HIRSCH, F., CRONST, F., CEZIMBRA, R., TIEFENSEE, M. D., MATTA, H. A. N., 2013, “Implantação de um sistema de pesagem em movimento em alta velocidade na rodovia BR-290/RS, FreeWay, para estudo de espectro de cargas comerciais rodantes”, *Revista Estrada*, n.18, pp. 22-28.
- BUREAU OF PUBLIC ROADS – BPR, 1964, *Traffic Assignment Manual*. Urban Planning Division, US Department of Commerce, Washington, DC.
- CAMPOREZ, P. *O perigo dos caminhões de granito nas estradas*. GAZETA ONLINE. 2017. Disponível em: <<http://www.gazetaonline.com.br/noticias/economia/2017/02/o-perigo-dos-caminhoes-de-granito-nas-estradas-1014019999.html>>. Acesso em: 11 ago. 2017.
- CASTRO, N., 2013, “Mensuração de externalidades do transporte de carga brasileiro”, *Journal of Transport Literature*, v. 7, n. 1, pp. 163-181.
- CASTRO, N. F., MARCON, D. B., FREIRE, L. C., LIMA, E. F., ALMEIDA, P. F. “Impacto do APL de Rochas Ornamentais do Espírito Santo nas Comunidades”. In: FERNANDES, F. R. C.; ENRÍQUEZ, M. A. R. S.; ALAMINO, R. C. J. (Org.). *Recursos Minerais & Sustentabilidade Territorial: arranjos produtivos locais*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2011.
- CENTROROCHAS – Centro Brasileiro dos Exportadores de Rochas Ornamentais, 2015, *Informativo das Exportações de Rochas*. Disponível em: <<http://www.centrorochas.org.br/>>. Acesso em: 11 ago. 2017.
- CHAIM, R. M., 2011, *Modelagem, Simulação e Dinâmica de Sistemas*. Curso de Especialização em Gestão da Segurança da Informação e Comunicações – CEGSIC. 2011. Disponível em:



<[http://home.ufam.edu.br/regina\\_silva/CEGSIC/Textos%20Base/Modelagem\\_Simulacao\\_e\\_Dinamica\\_de\\_Sistemas\\_CEGSIC\\_2009\\_2011.pdf](http://home.ufam.edu.br/regina_silva/CEGSIC/Textos%20Base/Modelagem_Simulacao_e_Dinamica_de_Sistemas_CEGSIC_2009_2011.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2017.

- CHASEY, A. D., GARZA, J. M., DREW, D. R., 2002, “Using Simulation to Understand the Impact of Deferred Maintenance”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, v. 17, pp. 269–279.
- CHIODI FILHO, C., 2009a, *Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2008*. São Paulo: ABIROCHAS.
- CHIODI FILHO, C., 2009b, *Situação mundial e posição brasileira no setor de rochas ornamentais em 2008*. São Paulo: ABIROCHAS.
- CHOOPOJCHAROEN, T., MAGZARI, A., 2012, *Mathematics behind System Dynamics*. 102 f. Qualifying Project Report (Degree of Bachelor of Science) – Faculty of Worcester Polytechnic Institute, Worcester, Massachusetts.
- CHOU, C. J., 1996, “Effect of overloaded heavy vehicles on pavement and bridge design”, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1539, pp. 58-65.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES, 1998, *Fair payment for infrastructure use: a phased approach to a common transport infrastructure charging framework in the EU*. White Paper.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT, CENTRO DE ESTUDOS EM LOGÍSTICA – CEL, 2002, *Transporte de Cargas no Brasil: ameaças e oportunidades para o desenvolvimento do país*. Rio de Janeiro.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT, 2017, *Investimento federal em rodovias não chega a 0,5% do PIB*. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imprensa/noticia/investimento-federal-em-rodovias-produto-interno-bruto>>. Acesso em: 15 jan. 2018.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE – CNT, 2016, *Pesquisa CNT de Rodovias*, Relatório Gerencial, 20ª ed.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN, 2000, Resolução nº 104 de 21 de dezembro de 1999. Dispõe sobre tolerância máxima de peso bruto de veículos. *Diário Oficial da União*, Brasília.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN, 2006a, Resolução nº 210 de 13 de novembro de 2006. Estabelece os limites de peso e dimensões para veículos

que transitem por vias terrestres e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN, 2006b, Resolução nº 211 de 13 de novembro de 2006. Requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga – CVC, a que se referem os arts. 97, 99 e 314 do Código de Trânsito Brasileiro-CTB. *Diário Oficial da União*, Brasília.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN, 2007, Resolução nº 258 de 30 de novembro de 2007. Regulamenta os artigos 231, X e 323 do Código de Trânsito Brasileiro, fixa metodologia de aferição de peso de veículos, estabelece percentuais de tolerância e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN, 2010, Resolução nº 354 de 24 de junho de 2010. Estabelece requisitos de segurança para o transporte de blocos e chapas serradas de rochas ornamentais. *Diário Oficial da União*, Brasília.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN, 2015, Resolução nº 526 de 29 de abril de 2015. Referenda a Deliberação nº 142 de 17 de abril de 2015 que dispõe sobre a alteração da Resolução CONTRAN nº 211, de 13 de novembro de 2006, e da Resolução CONTRAN nº 258, de 30 de novembro de 2007 e revoga a Resolução CONTRAN nº 489 de 05 de junho de 2014. *Diário Oficial da União*, Brasília.

CORBETT, T. N., 2003, *Introdução à Dinâmica de Sistemas*. São Paulo. Disponível em: <<http://www.corbett.pro.br/artigos.asp>>. Acesso 09 ago. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER., 2006, *Projeto de Pavimentação*.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-ES 173/86., 1986, *Método de Nível e Mira para Calibração de Sistemas Medidores de Irregularidade Tipo Resposta*.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-PRO 164/94, 1994, *Calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade de superfície de pavimento*.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – DNER-TER 02/79, 1979, *Normas Rodoviárias: Conservação, Restauração e Melhoramentos*.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2003, *Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos* – Procedimento.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2006a, *Manual de Estudos de Tráfego*. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 723, Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2006b, *Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos*, 2. ed., Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2006c, *Plano Diretor Nacional Estratégico de Pesagem*, Coordenação Geral de Operações Rodoviárias.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2007, *Terminologias rodoviárias usualmente utilizadas*. Brasília.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2012, *Quadro de Fabricantes de Veículos*. Brasília.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2016, *Postos de Pesagem*, Disponível em:  
<<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviarias/pesagem>>. Acesso em:  
26 jul. 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2017a, Nota Técnica Nº 002/2017/DE. *Detalhamento Técnico-científico da primeira versão da metodologia estabelecida para estimativa de volume médio diário anual – VMDA em toda a malha rodoviária pavimentada federal*. Disponível em: <<http://servicos.dnit.gov.br/dadospnet/Modelagem>>. Acesso em:  
10 dez. 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES –  
DNIT, 2017b, *Custos Médios Gerenciais*. Disponível em:  
<<http://www.dnit.gov.br/custos-e-pagamentos/custo-medio-gerencial/ANEXOIXCUSTOMDIOGERENCIALNOVEMBRO2016.pdf>>.  
Acesso em: 26 dez. 2017.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO – DENATRAN, 2009, Portaria nº 63, de 31 de março de 2009. Homologa os veículos e as combinações de veículos de transporte de carga e de passageiros, com seus respectivos limites de

comprimento, Peso Bruto Total - PBT e Peso Bruto Total Combinado - PBTC.  
*Denatran*, Brasília.

- DERANI, C., 2008, *Direito ambiental econômico*. São Paulo, Saraiva.
- DIAZ, R., BEHR, J. G., NG, M., 2016, “Quantifying the economic and demographic impact of transportation infrastructure investments: A simulation study”. *Simulation*, v. 92, n. 4, pp. 377-393.
- ECO-101, 2017, *Mapa Interativo – Pedágios*. Disponível em: <<http://www.eco101.com.br/Mapa-Interativo>>. Acesso em: 25 dez. 2017.
- ELLER, R. A. G., SOUZA JUNIOR, W. C., CURI, M. L. C., 2011, “Custos do transporte de carga no Brasil: rodoviário versus ferroviário”, *Revista de Literatura dos Transportes*, v. 5, n. 1, pp. 50-64.
- ERHART, S., PALMEIRA, E. M., 2006, “Análise do Setor de Transportes”, *Observatório de la Economía Latinoamericana: Revista académica de economía*, n. 71, pp. 1-6.
- ESPÍRITO SANTO EM AÇÃO, 2009, *Rochas*. Disponível em: <[http://www.es-acao.org.br/index.php?id=/arranjos\\_produtivos/rochas/index.php](http://www.es-acao.org.br/index.php?id=/arranjos_produtivos/rochas/index.php)>. Acesso em: 09 ago. 2017.
- FALLAH-FINI, S., RAHMANDAD, H., TRIANTIS, K., GARZA, J. M., 2010, “Optimizing highway maintenance operations: dynamic considerations”, *System Dynamics Review*, v. 26, n. 3, pp. 216–238.
- FERNANDES, A. C., 2003, *Scorecard Dinâmico: em Direção à Integração da Dinâmica de Sistemas com o Balanced Scorecard*. 320 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- FIGLIOLLO, D., FERMI, F., BIELANSKA, D., 2010, “The ASTRA model for strategic assessment of transport policies”, *System Dynamics Review*, v. 26, n. 3, pp. 283–290.
- FORRESTER, J. W., 1961, *Industrial Dynamics*. Cambridge, U.K.: Productivity Press.
- FORRESTER, J. W., 1993, *Road Maps 2: A Guide to Learning System Dynamics*, System Dynamics in Education Project, Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <<http://static.clexchange.org/ftp/documents/roadmaps/RM2/D-4502-9.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

- FORRESTER, J. W., SENGE, P. M., 1980, “Tests for building confidence in system dynamics models”. In: LEGASTO JÚNIOR, A. A., FORRESTER, J. W., LYNEIS, J. M. (org.), *System Dynamics*. New York: North-Holland.
- FRIEDMAN, S., 2006, “Is counter-productive policy creating serious consequences? The case of highway maintenance”, *System Dynamics Review*, v. 22, pp. 371–394.
- GEORGIADIS, P., VLACHOS, D., 2004, “The effect of environmental parameters on product recovery”, *European Journal of Operational Research*, v. 157, n. 2, pp. 449-464.
- GHISOLFI, V., RIBEIRO, G. M. R., CHAVES, G. L. D., BALISTA, W. C., 2016, “Dinâmica de Sistemas aplicada à Engenharia de Transportes”. In: *Anais do Congresso Rio de Transportes*, pp. 270-283, Rio de Janeiro, RDT.
- GIRO DAS ESTRADAS, 2003, “Excesso de peso prejudica a todos”, *Publicação periódica da concessionária Nova Dutra S.A.*, São Paulo, SP.
- GONÇALVES, L., 2010, *Operação Carga Pesada apreende 23 caminhões, na Serra, por irregularidades*. GAZETA ONLINE. Disponível em: <[http://gazetaonline.globo.com/\\_conteudo/2010/08/660444-operacao+carga+pesada+apreende+23+caminhoes+na+serra+por+irregularidades.html](http://gazetaonline.globo.com/_conteudo/2010/08/660444-operacao+carga+pesada+apreende+23+caminhoes+na+serra+por+irregularidades.html)>. Acesso em: 11 ago. 2017.
- HANG, W., LI, X., 2010, “Application of system dynamics for evaluating truck weight regulations”, *Transport Policy*, v. 17, pp. 240-250.
- HEIDER, M., MAIA, C. M., 2014, *Rochas Ornamentais e de Revestimento*. Sumário Mineral, Brasília: DNPM.
- HONG, J., CHU, Z., WANG, Q., 2011, “Transport infrastructure and regional economic growth: evidence from China”, *Transportation*, v. 38, n. 5, pp. 737–752.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE, 2017, *Séries Históricas*. Disponível em: <[https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc\\_ipca/defaultseriesHist.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm)>. Acesso em: 25 dez. 2017.
- ILOS – Especialistas em Logística e Supply Chain, 2017, *Custos Logísticos no Brasil*. Disponível em: <<http://www.ilos.com.br/web/analise-de-mercado/relatorios-de-pesquisa/custos-logisticos-no-brasil/#>>. Acesso em: 16 out. 2017.
- INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO EDUCACIONAL E INDUSTRIAL DO ESPÍRITO SANTO – IDEIES, 2015, *Análise de Competitividade da Indústria de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo*. Vitória, Espírito Santo.

- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, 2010, *Infraestrutura Econômica no Brasil: diagnósticos e perspectivas para 2025*. Livro 6, v. 1. Brasília: Ipea.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, 2015, *Acidentes de trânsito nas rodovias federais brasileiras: caracterização, tendências e custos para a sociedade*. Relatório de pesquisa. Brasília: Ipea.
- ISEE SYSTEMS, 2017, *Products*. Disponível em: < <https://www.iseesystems.com/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- JUNQUEIRA, A., 2017, *Flagrante: carretas de granito insistem em driblar a polícia no ES*. GAZETA ONLINE. Disponível em: <<https://www.gazetaonline.com.br/noticias/cidades/2017/06/flagrante-carretas-de-granito-insistem-em-driblar-a-policia-no-es-1014072050.html>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- KARNOPP, D. C., MARGOLIS, D. L., ROSENBERG, R. C., 2012, *System Dynamics: Modeling, Simulation, and Control of Mechatronic Systems*. 5. ed. New York: John Wiley & Sons.
- KNOP, I. O., 2009, *Infraestrutura para simulação de processos de software baseada em metamodelos de Dinâmica de Sistemas*. 119 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG.
- LACERDA, S. M., 2005, *O Financiamento da Infraestrutura Rodoviária através de Contribuintes e Usuários*. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 21, pp. 141-159.
- LI, Y., TAYLOR, T. R. B., 2014, “Modeling the Impact of Design Rework on Transportation Infrastructure Construction Project Performance”, *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 140, n. 9, pp. 1-8.
- LIU, P., MU, D., 2015, “Evaluating Sustainability of Truck Weight Regulations: A System Dynamics View”, *Journal of Industrial Engineering and Management*, v. 8, n. 5, pp. 1711-1730.
- LIU, P., MU, D., GONG, D., 2017, “Eliminating overload trucking via a modal shift to achieve intercity freight sustainability: a system dynamics approach”, *Sustainability*, v. 9, n. 3, pp. 1–24.
- LYNEIS, J., 2000, “System dynamics for market forecasting and structural analysis”, *System Dynamics Review*, v. 16, n. 1, pp. 3-25.

- MAANI, K., CAVANA, R. Y., 2004, *Systems Thinking and Modeling: understanding Chance and Complexity*. New Zeland, Pearson Education.
- MACÊDO, C. S., NASCIMENTO, J. C., KUWAHARA, N., 2010, “Estudo comparativo da análise hierárquica com multiobjectivo para seleção de projetos públicos de investimento em infraestrutura de transporte”, *Transportes*, v. 18, n. 2, pp. 46-52.
- MACHADO, V., 2017, *Balanças da BR-101 não estão em operação no ES, diz PRF*. G1 - ESPÍRITO SANTO. Disponível em: <<https://g1.globo.com/espírito-santo/noticia/balancas-da-br-101-nao-estao-em-operacao-no-es-diz-prf.ghtml>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- MANATAKI, I. E., ZOGRAFOS, K. G., 2009, “A generic system dynamics based tool for airport terminal performance analysis”, *Transportation Research Part C*, v. 17, pp. 428-443.
- MARQUES, G. L. O., 2006, *Pavimentação*. Notas de Aula. Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais.
- MARTIN, L. A., 1997, *The First Step*. MIT System Dynamics in Education Project, Massachusetts Institute of Technology. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/15-988-system-dynamics-self-study-fall-1998-spring-1999/readings/step.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2017.
- MENDES, M. A. S., 2009, *Uma contribuição ao estudo do acondicionamento e no transporte de rochas ornamentais no sudeste do Brasil*. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MENEZES, R. G., SAMPAIO, P. R. A., 2012, *Rochas Ornamentais no Noroeste do Estado do Espírito Santo*. Rio de Janeiro: CPRM.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL – MTPA, 2012, *Projeto de Reavaliação de Estimativas e Metas do PNLT*, Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLT – Relatório Final.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES PORTOS E AVIAÇÃO CIVIL – MTPA, UFRJ – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2016, *Centro de Integração Logística – Desenvolvimento da Metodologia de Localização de CILs*.

- Revisão e ajustes na base de dados georreferenciada do PNLT para aplicação da metodologia de localização de CILs. Etapa 5, Apêndice I. Tomo II.
- MORECROFT, J. D. W., 2015, *Strategic Modelling and Business Dynamics: a feedback systems approach*. 2. ed. Cornwall: John Wiley & Sons.
- MULA, J., CAMPUZANO-BOLARIN, F., DÍAZ-MADROÑERO, M., CARPIO, K. M., 2013, “A system dynamics model for the supply chain procurement transport problem: comparing spreadsheets, fuzzy programming and simulation approaches”, *International Journal of Production Research*, v. 51, n. 13, pp. 4087-4104.
- NAIM, M. M., TOWILL, D. R., 1994, “Establishing a Framework for Effective Materials Logistics Management”, *The International Journal of Logistics Management*, v. 5, n. 1, pp. 81-88.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE – OMS, 2015, *Relatório global sobre o estado da segurança viária*. Disponível em: <[http://www.who.int/violence\\_injury\\_prevention/road\\_safety\\_status/2015/Summary\\_GSRRS2015\\_POR.pdf](http://www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015/Summary_GSRRS2015_POR.pdf)>. Acesso em: 26 nov. 2017.
- ORTÚZAR, J. D., WILLUMSEN, L. G., 2001, *Modelling Transport*. 3. ed. New York: John Wiley & Sons.
- OZBAY K., OZMEN-ERTEKIN, D., BERECHMAN, J., 2007, “Contribution of transportation investments to county output”, *Transport Policy*, v. 14, n. 4, pp. 317–329.
- PARAÍSO, M. R., 2006, “A burocracia como entrave no processo de exportação de rochas ornamentais através dos portos do estado do Espírito Santo”. In: *Concurso Nacional Do Arranjo Produtivo de Rochas Ornamentais de Cachoeiro de Itapemirim*, pp.39- 40, Vila Velha, Espírito Santo.
- PINTO, S., PREUSSLER, E., 2001, *Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis*. Rio de Janeiro, RJ.
- PIRES, G. M., SPECHT, L. P., PINHEIRO, R. J. B., PEREIRA, D. S., RENZ, E. M., 2016, “Comportamento mecânico de material fresado após processo de estabilização granulométrica e química por meio da incorporação de cimento e cinza de casca de arroz moída”, *Revista Matéria*, v. 21, n. 2, pp. 365-384.
- POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL – PRF, 2017, *Acidentes*. Disponível em: <<https://www.prf.gov.br/portal/dados-abertos/acidentes>>. Acesso em: 9 jan. 2018.



- PORTAL TEMPO NOVO, 2017, *Carretas com pedras fogem de balança e prejudicam morador*. Disponível em: <<https://www.portaltempoново.com.br/carretas-com-pedras-fogem-de-balanca-e-prejudicam-morador/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- POWERSIM SOFTWARE, 2017, *Powersim Studio*. Disponível em: <<http://www.powersim.com/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- PWC – PricewaterhouseCoopers, 2009, *Meeting the 2050 Freight Challenge*, Sydney, Disponível em: <<http://infrastructure.org.au/wp-content/uploads/2017/06/Freight-2050-Final-Multi-Colour.pdf>>. Acesso em: 07 ago. 2017.
- RADZICKI, M. J., TAYLOR, R. A., 1997, *Introduction to System Dynamics: a systems approach to understanding complex policy issues*. Department of Energy, U.S. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/DL-IntroSysDyn/inside.htm>>. Acesso em: 21 ago. 2017.
- REINALDE, C. F., VICENTINI, L., PEREIRA, M. B. C., YONENAGA, W., 2005, “Dinâmica de Sistemas: uma abordagem computacional para visualizar problemas complexos”. In: *Anais do Congresso Brasileiro de Sistemas*, Ribeirão Preto: FEA-RP.
- RIZZO, D. M., MOUSER, P. J., WHITNEY, D. H., MARK, C. D., MAGAREY, R. D., VOINOV, A. A., 2006, “The comparison of four dynamic systems-based software packages: translation and sensitivity analysis”, *Environmental Modelling & Software*, v. 21, pp. 1491-1502.
- SALEH, M., OLIVA, R., KAMPMANN, C. E., DAVIDSEN, P. I., 2010, “A comprehensive analytical approach for policy analysis of system dynamics models”, *European Journal of Operational Research*, v. 203, pp. 673-683.
- SANTOS, E. M., 2010, “The economics of regulating road transport”, *Transportes* (resenha), pp. 87-93.
- SARDOU FILHO, R., MATOS, G. M. M., MENDES, V. A., IZA, E. R. H. F., 2013, *Atlas de Rochas Ornamentais do Estado do Espírito Santo*. Brasília: CPRM.
- SCHADE, B., SCHADE, W., 2005, “Evaluating Economic Feasibility and Technical Progress of Environmentally Sustainable Transport Scenarios by a Backcasting Approach with ESCOT”, *Transport Reviews*, v. 25, n. 6, pp. 647–668.
- SENGE, P. M., 1990, *A Quinta Disciplina: arte, teoria e prática da organização de aprendizagem*. São Paulo, Best Seller.
- SENGE, P., 2000, *Schools that learn: a Fifth Discipline Fieldbook for Educators, Parents, and Everyone who cares about education*. New York, Doubleday.

- SEPPELT, R., RICHTER, O., 2005, “It was an artifact not the result: a note on systems dynamic model development tools”, *Environmental Modelling & Software*, v. 20, pp. 1543-1548.
- SHEPHERD, S. P., 2014, “A review of system dynamics models applied in transportation”, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, v. 2, n. 2, pp. 83-105.
- SILVA, J. A., YAMAMOTO, B. M., NUNES, K. T. M., BARBOSA, E. A., AMARAL, L. L., COSTA, C. A. S., 2016, “Excesso de cargas nas estradas”, *Revista Conexão Eletrônica*, v. 13, n. 1, pp. 2220-2230.
- SONCIM, S. P., FERNANDES JÚNIOR, J. L., CAMPOS, L. E. P., 2013, “Modelo de desempenho de irregularidade longitudinal desenvolvido com base em dados da rede de rodovias em tratamento superficial duplo do Estado da Bahia”, *Transportes*, v. 21, n. 3, pp. 22-30.
- STERMAN, J., 2000, *Business Dynamics: System Thinking and Modelling for a Complex World*. New York, USA: McGraw-Hill.
- SUN, L., LIU, X., 1995, “General deterioration equation for pavement performance”, *Journal of Tongji University*, v. 23, n. 5, pp. 512-518.
- TENGBE, J. B., 2001, “System dynamics modeling in resource management: a sustainable development approach to resource extraction in Sierra Leone”. In: *Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society*, Palermo, Itália.
- THE WORLD BANK, 2016, *Connecting to Compete 2016: Trade Logistics in the Global Economy, The Logistics Performance Index and its Indicators*. Washington: The World Bank.
- TIZZOT, R. W., 2004, *Rodovias sem conservação, prejuízos para o setor*. Financial and Institutional Reform of Road Conservation in Latin America and the Caribbean Technical Cooperation Program of the Federal Republic of Germany. Documentos: Reforma financeira e institucional da conservação viária. Disponível em: <<http://www.zietlow.com/docs/pordocs.htm>>. Acesso em 05 ago. 2017.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB, 2010, *Highway Capacity Manual 2010*. National Research Council., Washington D.C., EUA.
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD – TRB, 2014, *Highway Safety Manual: User Guide*. The National Academies, Washington D.C., EUA.
- VENTANA SYSTEMS, INC., 2017, *Vensim Simulation Software*. Disponível em: <<http://www.vensim.com/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.

- VOLINO, P., MAGNENAT-THALMANN, N., 2001, “Comparing Efficiency of Integration Methods for Cloth Simulation”. In: *Proceedings of the Computer Graphics International*, pp. 265-272, Hong Kong.
- WEISBROD, G., 2008, “Models to predict the economic development impact of transportation projects: historical experience and new applications”, *The Annals of Regional Science*, v. 42, n. 3, pp. 519–543.
- WIDMER, J. A., 2002, “Compatibilidade de Tráfego de bitrens de 25 m com a infraestrutura viária brasileira”. In: *2º Colóquio Internacional de Suspensões e 1º Colóquio de Implementos Rodoviários da SAE-Brasil*, Caxias do Sul.
- WIKNER, J., TOWILL, D. R., NAIM, M. M., 1991, “Smoothing supply chain dynamics”, *International Journal of Production Economics*, v. 22, n. 3, pp. 231-248.
- WORLD ECONOMIC FORUM. *The Global Competitiveness Report 2016–2017*. 2016. Disponível em: <<https://www.weforum.org/reports/the-global-competitiveness-report-2016-2017-1>>. Acesso em: 9 jan. 2018.
- YULIAWATI, E., HADIWARDYO, S. P., SUSANTONO, B., TJAHJONO, T., 2015, “System Dynamics Model for Airport Characterization in Hub-and-Spoke Networks”, *International Journal of Technology*, v. 5, pp. 733-742.
- ZAGONEL, A. A., CORBET, T. F., 2006, “Levels of Confidence in System Dynamics Modeling: A Pragmatic Approach to Assessment of Dynamic Models”. In: *Proceedings of the International Conference of the System Dynamics Society*, pp. 1-19, Nijmegen, The Netherlands.