



PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO DA VIA PERMANENTE
CONSIDERANDO O IMPACTO DA DINÂMICA DOS TRENS E O CUSTO DO
CICLO DE VIDA DAS INTERVENÇÕES

Isaias Pereira Seraco

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

Orientador: Romulo Dante Orrico Filho

Rio de Janeiro
Março de 2024

PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO DA VIA PERMANENTE
CONSIDERANDO O IMPACTO DA DINÂMICA DOS TRENS E O CUSTO DO
CICLO DE VIDA DAS INTERVENÇÕES

Isaias Pereira Seraco

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

Orientador: Romulo Dante Orrico Filho

Aprovada por: Prof. Romulo Dante Orrico Filho

Prof. Hostilio Xavier Ratton Neto

Prof. Marcelino Aurelio Vieira da Silva

Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes

Prof^ª. Liedi Legi Bariani Bernucci

Prof. Cassio Eduardo Lima de Paiva

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2024

Seraco, Isaias Pereira

Planejamento da manutenção da via permanente considerando o impacto da dinâmica dos trens e o custo do ciclo de vida das intervenções / Isaias Pereira Seraco. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XX, 240 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Romulo Dante Orrico Filho

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 160-169.

1. Ferrovia. 2. Via permanente. 3. Manutenção. 4. Dinâmica veicular. 5. Custo do ciclo de vida. I. Orrico Filho, Romulo Dante. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

A Deus.

À Virgem Maria, sob o título de Nossa Senhora da Penha.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À Virgem Santíssima, a quem mantenho especial devoção sob o título de Nossa Senhora da Penha.

Aos meus pais e meu irmão pelo apoio irrestrito e incentivo.

Ao professor Hostilio Xavier Ratton Neto pela valiosa orientação prestada no desenvolvimento deste trabalho. Agradeço por ter inspirado o tema desta Tese e por ter contribuído para que fosse explorado sob rigor acadêmico e técnico, compartilhando o seu conhecimento sempre com muito entusiasmo e diligência, sem se preocupar com o reconhecimento de outrem, mas voltado ao progresso da temática em questão. Agradeço pela amizade e pela paciência nos contratempos vivenciados ao longo dos anos de trabalho.

Ao professor Romulo Dante Orrico Filho, pela participação na realização desta pesquisa desde sua concepção, ainda na época do Mestrado. Agradeço pela amizade, conhecimento compartilhado e pela parceria, pronta e desinteressada, sem a qual este trabalho não teria se viabilizado.

Ao engenheiro João Bosco de Lima, pela disponibilidade e interesse em contribuir com a elaboração desta pesquisa, compartilhando seu conhecimento sempre com prontidão, atenção e entusiasmo. Este trabalho não seria possível sem a sua colaboração.

Ao engenheiro Daniel Arêas, pela disponibilidade e ajuda prestada, fundamentais na construção desta pesquisa.

Ao Programa de Engenharia de Transportes – PET/COPPE/UFRJ, pelo curso de Doutorado, e ao seu corpo docente pela competência em compartilhar seu conhecimento e fomentar o nosso crescimento pessoal e profissional.

Às secretárias do programa, dona Helena e, especialmente, Jane, pelo serviço competente e eficiente.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de Doutorado.

Aos colegas de curso, conhecidos ao longo do Doutorado, e também desde o Mestrado.

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

PLANEJAMENTO DA MANUTENÇÃO DA VIA PERMANENTE
CONSIDERANDO O IMPACTO DA DINÂMICA DOS TRENS E O CUSTO DO
CICLO DE VIDA DAS INTERVENÇÕES

Isaias Pereira Seraco

Março/2024

Orientador: Romulo Dante Orrico Filho

Programa: Engenharia de Transportes

Este trabalho apresenta um procedimento de planejamento de manutenções da via permanente ferroviária cujo objetivo é auxiliar a definição de políticas de manutenção capazes de garantir a segurança operacional ao menor custo possível. Para tanto, estabelece uma sistemática que prevê as acelerações verticais e horizontais que os veículos adquirem em relação à via em função do intervalo entre manutenções geométricas. Conhecidas as acelerações, o procedimento estima as forças dinâmicas às quais os componentes da superestrutura estariam submetidos e as consequências sobre sua degradação física. A partir desse arcabouço, políticas de intervenção são simuladas e avaliadas no que concerne à sua capacidade de resguardar a segurança operacional sob critérios relativos à geometria da via permanente e à dinâmica veicular, bem como quanto à redução do custo do ciclo de vida do sistema de manutenção pela racionalização da distribuição dos serviços de correção da geometria e renovação em uma perspectiva de longo prazo. A aplicação do procedimento em uma ferrovia brasileira corroborou sua viabilidade e relevância tendo em vista que a política de manutenção definida, além do incremento da segurança operacional, reduziria o custo total de manutenção. Este trabalho apresenta uma contribuição ao aprimoramento das técnicas de planejamento de

manutenções atuais ao introduzir uma sistemática de previsão e avaliação da segurança mediante critério dinâmico, bem como por considerar a influência dos ciclos de manutenção geométrica sobre a frequência de renovação. Também colabora com o desenvolvimento desse eixo temático por meio da apresentação de oportunidades de pesquisas futuras.

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

RAILWAY TRACK MAINTENANCE PLANNING CONSIDERING THE IMPACT
OF TRAIN DYNAMICS AND THE LIFE CYCLE COST OF INTERVENTIONS

Isaias Pereira Seraco

March/2024

Advisor: Romulo Dante Orrico Filho

Department: Transportation Engineering

This work presents a support procedure for railway track maintenance planning whose objective is to support the definition of maintenance policies capable of ensuring operational safety at the lowest possible cost. To this end, it establishes a system that predicts the vertical and horizontal accelerations that vehicles acquire in relation to the track as a function of the interval between geometric maintenance. Once the accelerations are known, the procedure estimates the dynamic load to which the superstructure components would be submitted and the consequences on their physical degradation. Based on this framework, intervention policies are simulated, and their geometric maintenance frequencies are evaluated in terms of their ability to ensure operational safety under geometric and dynamic criteria, as well as regarding the ability to reduce the life cycle cost of the maintenance system by rationalizing the distribution of geometric maintenances and renewals over a long-term management horizon. The application of the procedure on a Brazilian railway confirmed its applicability and relevance, given that the defined maintenance policy, in addition to increasing operational safety, would reduce the total maintenance cost. This work presents a contribution to the improvement of current maintenance planning techniques by introducing a system for predicting and evaluating safety using dynamic criteria, as well as by considering the effect of geometric

maintenance cycles on the frequency of renewal. It also collaborates with the development of this thematic field by presenting opportunities for future research.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo do Trabalho.....	6
1.2 Justificativa.....	7
1.3 Estrutura da Tese	9
2. A VIA PERMANENTE, AS INSPEÇÕES E OS SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO	11
2.1 A Via Permanente: Componentes e Geometria.....	11
2.2 Degradação da Via Permanente.....	14
2.3 Inspeção da Via Permanente	20
2.4 Manutenções na Via Permanente	30
2.5 Conclusões do Capítulo.....	36
3. FORÇAS DINÂMICAS	37
3.1 Forças às Quais a Via Permanente Está Submetida e Sua Relação com a Geometria	37
3.2 Magnitude das Forças Dinâmicas.....	43
3.3 Segurança Operacional.....	49
3.4 Considerações Sobre a Degradação da Via	53
3.5 Prospecção das Forças Sobre a Via	55
3.6 Conclusões do Capítulo.....	58
4. PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÕES	60
4.1 Considerações Iniciais	60
4.2 Modelagem da Degradação Geométrica.....	63
4.3 Modelagem da Degradação Física.....	75
4.4 Custos de Manutenção.....	85
4.5 Conclusões do Capítulo	90

5. PROCEDIMENTO DE PLANEJAMENTO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO	92
5.1 Formulação de Modelos de Degradação Geométrica.....	94
5.2 Formulação de Modelos de Previsão das Acelerações em Função da Condição Geométrica.....	105
5.3 Adaptação dos Modelos de Previsão das Acelerações	111
5.4 Simulação de Padrões de Intervenção e Seleção da Política de Manutenção de Menor Custo.....	113
6. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO	124
6.1 Características do Trecho Ferroviário Analisado	124
6.2 Formulação de Modelos de Degradação Geométrica.....	127
6.3 Formulação de Modelos de Previsão das Acelerações em Função da Condição Geométrica.....	140
6.4 Adaptação dos Modelos de Previsão das Acelerações	142
6.5 Simulação de Padrões de Intervenção e Seleção da Política de Manutenção de Menor Custo.....	143
6.6 Análise dos Resultados.....	150
7. CONCLUSÃO.....	155
7.1 Sugestões de Pesquisas Futuras	157
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	160
ANEXO I.....	170
ANEXO II	171
ANEXO III	175
APÊNDICE I.....	176
APÊNDICE II.....	182
Apêndice II.1 Processo de Seleção de Variáveis Independentes Adotado nas Modelagens M8 e M12	200
Apêndice II.2 Algoritmo empregado no <i>software</i> R para tratamento dos dados, ajuste das curvas de regressão e cálculo dos critérios AIC e BIC.....	202

APÊNDICE III	207
APÊNDICE IV	213
APÊNDICE V	219
APÊNDICE VI	221

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Variação dos custos em função da frequência de manutenção geométrica. ..	3
Figura 1.2: Comportamento do CCV considerando a influência da geometria sobre a vida útil dos componentes.	6
Figura 2.1: Perfil típico de uma via permanente lastrada com destaque para seus componentes.	11
Figura 2.2: Bitola de uma via permanente.....	15
Figura 2.3: Desnívelamento longitudinal.	15
Figura 2.4: Desnívelamento transversal.	16
Figura 2.5: Degradação de superelevação em curvas.....	17
Figura 2.6: Empeno.	17
Figura 2.7: Desalinhamento da via.	18
Figura 2.8: <i>Trolley</i> de inspeção.	21
Figura 2.9: Carro controle utilizado pela FRA.	22
Figura 2.10: Sistema analógico de inspeção geométrica utilizado em socadora automática de via.	22
Figura 2.11: Constituição típica de um acelerômetro.....	23
Figura 2.12: Acelerômetros instalados no interior do veículo.....	24
Figura 2.13: Truque ferroviário instrumentado.	24
Figura 2.14: Roda instrumentada com destaque para o posicionamento dos sensores ..	25
Figura 2.15: Exemplo de relatório gráfico gerado em inspeção geométrica.	26
Figura 2.16: Socadora de via modelo 09-2X SH fabricada pela austríaca Plasser&Theurer.	31
Figura 2.17: Banca de socaria (A) e dispositivo de levante e puxamento (B) utilizados em socadora automática de via.....	31
Figura 2.18: Processo de socaria.	32
Figura 2.19: Desguarnecedora automática de via.....	33
Figura 2.20: Socadora de via com vagão de estabilização dinâmica (DTS)	34
Figura 2.21: Assentamento da grade em função da altura de levante.	34
Figura 2.22: Renovadora automática de via.	35
Figura 3.1: Forças (F.) atuantes na via permanente.....	37
Figura 3.2: Perfil das forças verticais que solicitam a via permanente.	38
Figura 3.3: Espectrograma mostrando diferentes singularidades da via.	39

Figura 3.4: <i>Squat</i> em AMV.	39
Figura 3.5: Movimentos dinâmicos dos veículos ferroviários.	40
Figura 3.6: Movimento de <i>Lacet</i> ou <i>hunting</i> com destaque para as forças (F.) laterais.	41
Figura 3.7: Forças dinâmicas medidas na via permanente em North Queensland.	46
Figura 3.8: Junta defeituosa.	47
Figura 3.9: Forças dinâmicas medidas em região de junta danificada.	47
Figura 3.10: Ondulação em trilho verificada no trecho estudado por Gullers <i>et al.</i> (2008).	48
Figura 3.11: Forças dinâmicas geradas por ondulações na via estudada por Gullers <i>et al.</i> (2008).	48
Figura 3.12: Forças medidas em trecho de alta qualidade.	49
Figura 3.13: Alargamento de bitola por deflexão do trilho.	50
Figura 3.14: Modos de descarrilamento por alívio agudo de forças verticais.	50
Figura 3.15: Escalada do flange em situação de iminente descarrilamento.	50
Figura 3.16: Forças no contato roda – trilho.	51
Figura 3.17: Variação do L/V crítico em função do ângulo e do coeficiente de atrito entre a roda e o trilho.	52
Figura 3.18: Ângulo de ataque da roda em relação ao trilho.	53
Figura 3.19: <i>Strain gauges</i> fixados na lateral externa do trilho.	56
Figura 4.1: Exemplo de distribuição de manutenções resultante do modelo de conserva cíclica.	61
Figura 4.2: Qualidade geométrica resultante de diversas políticas de manutenção.	63
Figura 4.3: Evolução da condição geométrica com destaque para o momento das intervensões de manutenção.	64
Figura 4.4: Degradação geométrica com destaque para o perfil acentuado pós manutenções.	65
Figura 4.5: Segmentos com perfis de degradação diferentes em um mesmo trecho ferroviário.	66
Figura 4.6: Degradação do nivelamento longitudinal em segmentos adjacentes da linha Bordeaux – Sete.	66
Figura 4.7: Curva da banheira.	82
Figura 4.8: Efeito dos ciclos de carregamento e do peso por eixo no abatimento do lastro.	84
Figura 5.1: Etapas do procedimento.	93

Figura 5.2: Fluxograma 1 – Operação de preparação dos dados a serem utilizados no desenvolvimento da primeira etapa do procedimento.	95
Figura 5.3: Fluxograma 2 – Operação para determinação da taxa de degradação dos parâmetros e obtenção dos demais dados necessários ao modelo de degradação geométrica.	99
Figura 5.4: Fluxograma 3 – Operação para determinação do intervalo máximo entre manutenções geométricas para cada parâmetro e segmento analisados.....	102
Figura 5.5: Fluxograma 4 – Operação de preparação dos dados a serem utilizados para obtenção dos modelos de correspondência entre as acelerações e a geometria.	106
Figura 5.6: Fluxograma 5 – Operação para obtenção das equações dos modelos de correspondência entre as acelerações e a geometria.....	108
Figura 5.7: Fluxograma 6 – Operação para adaptação das equações de previsão das acelerações.....	112
Figura 5.8: Fluxograma 7 – Operação para determinação da frequência de manutenção de referência.	114
Figura 5.9: Ajuste do modelo de previsão do fator k_5 para trilhos.	117
Figura 5.10: Ajuste do modelo de previsão do fator k_5 para dormentes.....	119
Figura 6.1: Pacote de acelerômetros utilizado na inspeção dinâmica.	126
Figura 6.2: Planilha com os dados originais provenientes do relatório de inspeção geométrica realizada em 21/04/2017.....	129
Figura 6.3: Planilha com os resultados do cálculo do DP para a inspeção 21/04/2017.	130
Figura 6.4: Porção inicial da planilha relativa ao parâmetro LPROF31.	132
Figura 6.5: Porção central da planilha relativa ao parâmetro LPROF31	133
Figura 6.6: Porção final da planilha relativa ao parâmetro LPROF31	134
Figura 6.7: Porção inicial da planilha Dados C.....	136
Figura 6.8: Porção central da planilha Dados C.....	137
Figura 6.9: Porção final da planilha Dados C.....	138
Figura 6.10: Pasta Dados D.....	141
Figura 6.11: Vida útil dos componentes no Segmento 11.....	153
Figura 6.12: Custo do ciclo de vida do Segmento 11.....	153
Figura Apêndice I.1: Distribuição de tensões em uma viga apoiada em fundação elástica.	177
Figura Apêndice I.2: Diagrama de Goodman modificado para o trilho <i>standard steel</i> ...	178

Figura Apêndice I.3: Diagrama de Goodman modificado para o trilho <i>standard</i>	179
Figura Apêndice I.4: Curva S – N para trilhos em aço <i>standard</i>	180
Figura Apêndice I.5: Curva S – N para diversos tipos de trilho.....	180
Figura Apêndice I.6: Picos de carga vertical roda/trilho em ferrovias americanas.....	181
Figura Apêndice II.1: Dispersão dos dados utilizados na aplicação do procedimento....	190
Figura Apêndice II.2: <i>Boxplot</i> dos dados apresentados na figura anterior.....	191
Figura Apêndice II.3: Dispersão dos dados após retirada de <i>Outliers</i>	192
Figura Apêndice II.4: <i>Boxplot</i> resultante da retirada de <i>Outliers</i>	192
Figura Apêndice IV.1: Operação para determinação das tolerâncias do DP.....	215

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Exemplo de relatório de inspeção geométrica.....	26
Tabela 2: Exemplo de relatório de exceções geométricas.....	26
Tabela 3: Tolerâncias geométricas (em mm) estabelecidas pela ABNT.....	27
Tabela 4: Influência da geometria da via nos movimentos dinâmicos.....	41
Tabela 5: Relação entre os parâmetros geométricos da via e a resposta dinâmica dos veículos.....	43
Tabela 6: Formulações para o cálculo de fatores de impacto dinâmico.....	45
Tabela 7: Exemplo de Ciclos de RT definidos pela RFFSA.....	61
Tabela 8: Valor máximo de J em função da velocidade operacional.....	67
Tabela 9: Parâmetros para avaliação do TGI.....	69
Tabela 10: Modelos mecanicistas para previsão da degradação geométrica.....	70
Tabela 11: Vida útil dos acessórios de fixação.....	81
Tabela 12: Parâmetros da distribuição de Weibull para trilhos.....	83
Tabela 13: Fator função da carga por eixo adotado originalmente na Equação 14.....	116
Tabela 14: Adaptação da Tabela 13.....	117
Tabela 15: Fator k_5 utilizado para cálculo da vida útil de dormentes adotado na Equação 21.....	118
Tabela 16: Adaptação da Tabela 15.....	118
Tabela 17: Parâmetros geométricos inspecionados e características do processo de medição.....	125
Tabela 18: Conformação do relatório de inspeção dinâmica.....	126
Tabela 19: Frequências mínimas de manutenção capazes de assegurar a segurança operacional sob o critério geométrico para os segmentos válidos.....	139
Tabela 20: Custos unitários utilizados para estimar as despesas com manutenção.....	145
Tabela 21: Resultados detalhados do procedimento aplicado aos segmentos 8 e 11...	147
Tabela 22: Resultados do procedimento aplicado ao segmento 16.....	148
Tabela 23: Resultados consolidados obtidos na aplicação do procedimento.....	149
Tabela 24: Definição do fator k_1 função do comprimento do trilho.....	170
Tabela 25: Definição do fator k_7 função do trem-tipo.....	170
Tabela 26: Determinação do fator k_5 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste	171
Tabela 27: Determinação do fator k_2 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste	171
Tabela 28: Determinação do fator k_3 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste	171

Tabela 29: Determinação do fator k_4 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste	172
Tabela 30: Determinação do fator k_5 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste	172
Tabela 31: Determinação do fator k_6 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste	172
Tabela 32: Classificação da via segundo suas condições	173
Tabela 33: Determinação do fator k_7 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste	173
Tabela 34: Determinação do fator k_1 para cálculo da vida útil de dormentes	174
Tabela 35: Determinação do fator k_4 para cálculo da vida útil de dormentes	174
Tabela 36: Determinação do fator k_5 para vida útil de dormentes.....	174
Tabela 37: Custo unitário para serviços de manutenção na via permanente	175
Tabela 38: Estratégia de análise e modelagem de dados para formulação dos modelos de previsão das acelerações	185
Tabela 39: Estratégias de modelagem polinomial adotadas	187
Tabela 40: Relação do parâmetro nivelamento (niv) com a variável explicada (y) em função da estratégia de modelagem empregada	187
Tabela 41: Modelos de regressão testados para formulação da equação ac_V na família M1	188
Tabela 42: Resultados consolidados para obtenção do modelo vertical (ac_V).....	193
Tabela 43: Resultados consolidados para obtenção do modelo horizontal (ac_H)	194
Tabela 44: Resultados para comparação e seleção da estratégia de modelagem de referência	195
Tabela 45: Segurança dinâmica estabelecida pelas equações avaliadas.....	197
Tabela 46: Métricas atualizadas para seleção da família de modelagem de referência	199
Tabela 47: Métricas estatísticas relativas à Equação 53 (modelo ac_V).....	199
Tabela 48: Métricas estatísticas relativas à Equação 52 (modelo ac_H).....	200
Tabela 49: Tolerâncias do DP (mm) calculadas para os segmentos válidos	217
Tabela 50: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6	222
Tabela 51: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	223
Tabela 52: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	224
Tabela 53: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	225

Tabela 54: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	226
Tabela 55: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	227
Tabela 56: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	228
Tabela 57: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	229
Tabela 58: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	230
Tabela 59: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	231
Tabela 60: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	232
Tabela 61: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	233
Tabela 62: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	234
Tabela 63: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	235
Tabela 64: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	236
Tabela 65: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	237
Tabela 66: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	238
Tabela 67: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	239
Tabela 68: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)	240

1. INTRODUÇÃO

A eficiência do transporte ferroviário no que se refere ao atendimento dos clientes e à geração de lucros pela prestação do serviço, fundamenta-se no projeto do sistema, sendo indispensável nesse âmbito que a infraestrutura e o material rodante sejam dimensionados segundo as necessidades então identificadas e previstas para o futuro. Tal dimensionamento refere-se às características do traçado, tipo de via a ser adotada, quantidade e tamanho dos pátios de cruzamento, sinalização, trem típico que tráfegará, tipo de tração, dentre outros aspectos.

Estabelecido o projeto e construída a ferrovia, a efetivação do potencial operacional está condicionada à gestão do serviço e à manutenção dos segmentos que o constituem. Enquanto o gerenciamento operacional busca assegurar o uso eficiente da capacidade de transporte disponível, as atividades de manutenção visam a estabilidade e confiabilidade da operação, garantindo que o material rodante esteja disponível, a sinalização funcione a contento, e a infraestrutura seja capaz de suportar o tráfego.

No que se refere à via permanente, trechos com características planialtimétricas limitadas, tais como rampas íngremes e curvas de pequeno raio, restringem as velocidades operacionais e a própria capacidade de tração. Porém, mesmo em segmentos que não tenham essa limitação física de projeto, se a via estiver em estado deteriorado, tornar-se-á inseguro adotar velocidade e pesos/eixo elevados, conseqüentemente, prejudicando igualmente o desempenho (RODRIGUES, 2001).

Delimita-se assim a relevância dos serviços de manutenção da via, cujo planejamento impõe-se como tarefa fundamental, dado o protagonismo dos serviços na garantia das condições necessárias ao tráfego, bem como em função do vultoso dispêndio financeiro inerente à sua realização, que pode alcançar mais da metade do orçamento geral de manutenções do sistema ferroviário (SANTOS *et al.*, 2015; HIGGINS e LIU, 2017; PEN *et al.*, 2019). Portanto, além de contribuir para efetivação do desempenho operacional, alcançar eficiência na realização das manutenções pode repercutir em maiores lucros, impactando na própria estabilidade financeira das companhias.

A eficiência pode ser alcançada mediante aprimoramentos tanto na técnica quanto no planejamento. Por técnica designa-se o aparato responsável pela execução dos serviços, que envolve maquinário, pessoal e o próprio conceito e tecnologia empregada. Já o planejamento refere-se à política de manutenção, diretriz gerencial que visa

determinar o tipo, local e a frequência das intervenções de modo que supram as necessidades técnicas e atendam às limitações orçamentárias.

O planejamento das manutenções envolve, em resumo, a gestão de dois serviços: as renovações e as correções geométricas. Por renovação denomina-se a atividade de substituição dos componentes que formam a via permanente, serviço necessário principalmente quando a degradação física de suas estruturas alcançou patamares que comprometem a segurança da operação. Já as manutenções geométricas visam a corrigir a geometria da via, ou seja, a disposição espacial do conjunto dos componentes ao longo do traçado, que é a responsável por permitir que as composições transponham o relevo com segurança e eficiência, e que, com o passar do tempo e da operação, se afasta do perfil ideal.

Essas degradações se desenvolvem de maneira simultânea, contudo, a degradação geométrica ocorre em ritmo mais intenso do que a física, motivo pelo qual, no intervalo entre renovações consecutivas, normalmente são necessárias várias correções de geometria.

A geometria possui relevância na viabilização do desempenho operacional, uma vez que quanto maior a velocidade máxima adotada no trecho ferroviário menor será a amplitude da degradação tolerada. Portanto, maiores padrões de desempenho tendem a requerer intervenções de correção geométrica mais frequentes, logo, mais numerosas ao longo do tempo, o que resulta em programas de manutenção mais onerosos. Forma-se assim, o contexto que o planejamento das políticas de manutenção busca administrar: como manter a qualidade geométrica da via em níveis satisfatórios sem que os custos para tanto comprometam o lucro obtido pelo desempenho que os próprios serviços de manutenção viabilizaram.

Dentre outros fatores, essa problemática envolve a determinação do momento ideal de realização das manutenções, tendo em vista que ações mais ou menos frequentes toleram condições geométricas diferentes, assim como resultam em orçamentos distintos.

A Figura 1.1 apresenta os custos envolvidos nesse processo decisório, além do que ilustra como eles variam em função do padrão de manutenção adotado.

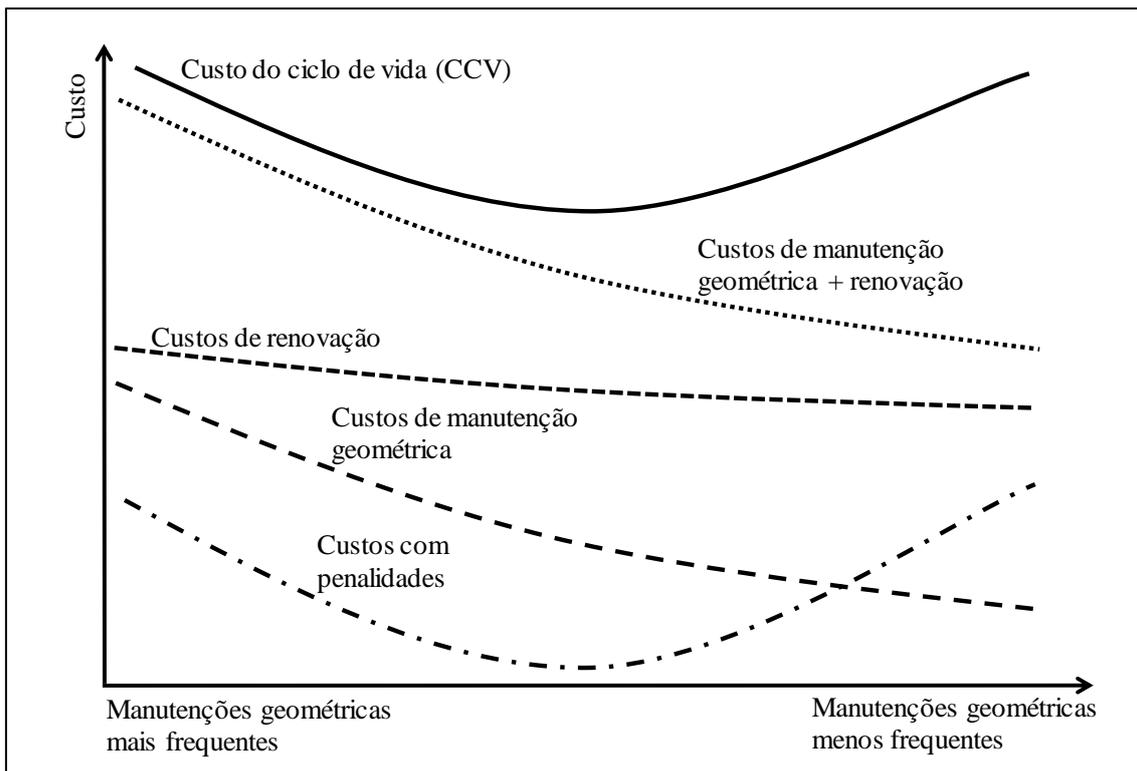


Figura 1.1: Variação dos custos em função da frequência de manutenção geométrica.

Em uma perspectiva de longo prazo, em que é analisada a quantidade de intervenções e os custos totais, quanto maior a frequência de manutenção geométrica, maior será o número de ações realizadas, e, conseqüentemente, maior será o custo direto relativo à sua realização. Nota-se que o custo de renovação também aumenta nessa circunstância em consequência das operações realizadas no lastro, que são atreladas às manutenções geométricas. Durante a conservação da geometria o tráfego ferroviário é interrompido, o que, a depender da frequência dos trens, pode implicar em penalidades financeiras pelo atraso do serviço de transporte.

No extremo oposto, a adoção de padrões de manutenção em baixa frequência pode tolerar uma condição perigosa para o tráfego, ou seja, com alterações de geometria em amplitude maior do que o limite de segurança. Se de fato ocorrerem, tais deformações requereriam medidas imediatas, como manutenções corretivas, reduções compulsórias de velocidade, ou, em casos extremos, até mesmo o fechamento temporário da via. Qualquer uma dessas ações impacta negativamente o nível de serviço prestado, conseqüentemente, gerando prejuízos financeiros (penalidades) que poderiam comprometer a eventual economia que padrões tardios de manutenção obteriam pelo menor número de

intervenções, além do que, a probabilidade de acidentes nessas circunstâncias é maior, com consequências potencialmente extremas, como perdas imateriais.

A eficiência financeira nesse contexto tem sido buscada mediante o emprego da chamada manutenção preditiva, que se caracteriza pela realização de manutenções estritamente quando necessário (RODRIGUES, 2001; VAN DER WESTHUIZEN e GRÄBE, 2013). Em resumo, amparados na modelagem do comportamento futuro da via, os gestores preveem o momento em que a degradação geométrica alcançará as tolerâncias de segurança, o que permite que as manutenções sejam programadas para ocorrer o mais próximo possível desse momento. Como consequência, os serviços não serão antecipados ou postergados, mas realizados em frequência que assegurará que o estado da geometria se manterá dentro dos padrões mínimos preconizados. Dessa forma, a quantidade de intervenções ao longo do tempo será a menor possível, implicando na redução de penalidades, e, em última instância, alcançando o menor custo de ciclo de vida (CCV) do sistema de manutenção (SU *et al.*, 2017; SINGH *et al.*, 2020).

Nesse contexto, as renovações são realizadas apenas quando identificadas degradações que caracterizam o fim da vida útil dos componentes ou então que atingiram patamares que comprometem a segurança do padrão de tráfego vigente.

Alguns autores, contudo, têm indicado que diferentemente do que é realizado nesses modelos de planejamento preditivo, a avaliação da segurança operacional não deve se limitar em comparar a amplitude das deformações geométricas e suas tolerâncias, mas também deve incluir uma análise do efeito da condição geométrica sobre o equilíbrio dinâmico dos veículos em movimento (HIGGINS e LIU, 2017; MORAIS *et al.*, 2019; PEN *et al.*, 2019). Estudos demonstraram que as acelerações que o material rodante adquire em relação à via permanente durante deslocamento podem alcançar patamares significativamente elevados, levando a condições operacionais inseguras mesmo em trechos cuja amplitude das alterações geométricas está abaixo das tolerâncias de segurança (RATTON NETO, 1985; LIMA *et al.*, 2021).

Diversos autores (RATTON NETO, 1985; RODRIGUES, 2001; GULER, 2013; SOL-SÁNCHEZ *et al.*, 2017; LIMA, 2019) indicam que a condição da geometria pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de acelerações em magnitude elevada. Além disso, essa condição de desequilíbrio pode ter implicações na forma como a via se degrada, uma vez que levaria à sobrecargas dinâmicas que resultariam no incremento da degradação física dos componentes da superestrutura (GULER *et al.*,

2011; GULER, 2016; ZAREMBSKI *et al.*, 2016; MOHAMMADIB *et al.*, 2019; VARANDAS *et al.*, 2020).

Essas observações são relevantes sob o ponto de vista financeiro, pois, ao postergar a realização das manutenções geométricas ao limiar de atingimento das tolerâncias de segurança, os métodos de planejamento preditivo atuais podem tolerar alterações de geometria em magnitude que, além de potencialmente insegura sob o ponto de vista da dinâmica veicular, pode diminuir a vida útil dos componentes, conseqüentemente, antecipando suas renovações. Como estes são serviços de frequência inferior às manutenções geométricas, com ciclos de intervenção que podem ultrapassar 20 anos, de imediato o impacto financeiro decorrente dessa circunstância não seria notado. Entretanto, chegado o momento da renovação, antecipá-la poderia comprometer as economias obtidas no curto prazo, dado o custo elevado do processo de substituição dos componentes.

A partir desse entendimento, o comportamento da curva de custos de renovação e, conseqüentemente, do CCV do sistema, mudariam em relação ao que foi apresentado na Figura 1.1. Nesse novo cenário, assumindo que quanto melhor o estado da geometria, maior a vida útil dos componentes, seria possível determinar um ponto de equilíbrio, ideal para realização das intervenções, em que a frequência das manutenções geométricas não seria tão antecipada ao ponto de elevar os correspondentes custos com sua realização, com a renovação do lastro e com penalidades pela interferência no tráfego, mas proporcionaria uma melhora da qualidade da via que estenderia o tempo de serviço dos componentes, resultando na redução dos custos com renovação e do CCV ao menor patamar possível. Esse conceito é expresso pela Figura 1.2.

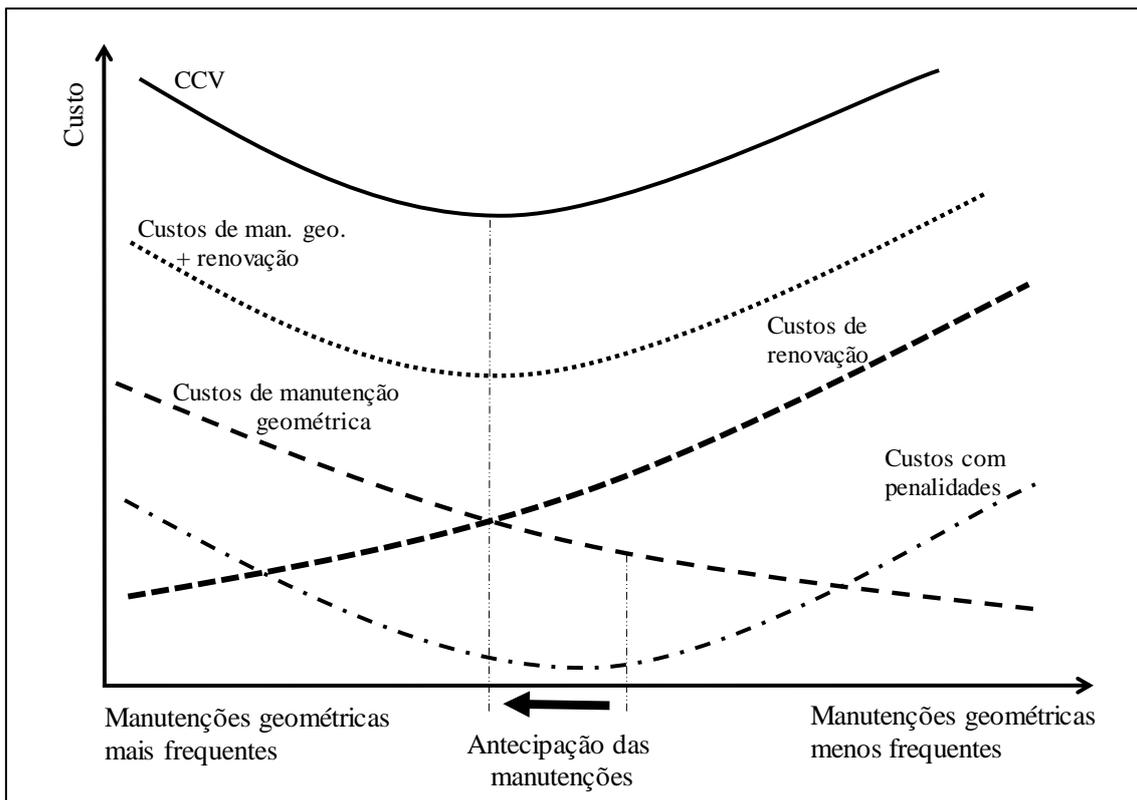


Figura 1.2: Comportamento do CCV considerando a influência da geometria sobre a vida útil dos componentes.

Portanto, evidencia-se a relevância de métodos de planejamento de manutenções que considerem as implicações da frequência de manutenção geométrica sobre a segurança dinâmica, assim como sobre a degradação física dos componentes, visando estabelecer estratégias de intervenção que sejam mais seguras e econômicas.

1.1 Objetivo do Trabalho

O objetivo desta Tese foi desenvolver um procedimento de planejamento de políticas de manutenção para a via permanente ferroviária que determine a frequência de manutenção geométrica que garanta a segurança operacional ao menor custo possível.

Para tanto, este trabalho foi desenvolvido a partir de três objetos de análise:

- i. As acelerações que os veículos ferroviários adquirem em relação à via permanente são função do estado de degradação da geometria, que, por sua vez, depende do intervalo entre as manutenções geométricas: nesse sentido, fez-se necessário estabelecer um modelo de correspondência entre

o estado da geometria e as acelerações, assim como um modelo capaz de prever a degradação geométrica em função do intervalo entre manutenções. A associação entre esses modelos permite prever as acelerações em função da frequência de correção geométrica;

- ii. As forças dinâmicas aplicadas sobre os componentes da via permanente são maiores tanto quanto maiores forem as acelerações dos veículos em relação à própria via. A vida útil dos componentes se altera em função das forças dinâmicas, sendo tanto menores quanto mais severas forem as forças. Tais entendimentos demandaram um modelo capaz de determinar a magnitude das forças dinâmicas aplicadas sobre os componentes da superestrutura que considerasse para tanto as acelerações dos veículos em relação à via permanente. Os resultados da aplicação desse modelo viabilizam a avaliação da segurança dinâmica do deslocamento dos veículos mediante critérios apropriados, bem como são os dados de entrada para outro modelo, concebido para estimar a vida útil dos componentes em função das forças previstas;
- iii. A antecipação das manutenções geométricas pode resultar em um CCV menor do que aquele obtido pelos modelos correntes de planejamento por meio da postergação das renovações: o procedimento proposto requereu uma sistemática que, utilizando os modelos definidos nos tópicos precedentes, estime o CCV de padrões de política de manutenção alternativos visando a identificação daquele de menor custo.

Foi premissa básica desta pesquisa garantir a segurança operacional. Justifica-se assim, o motivo pelo qual o custo alvo do procedimento será o menor possível, pois será o menor custo obtido por meio de um padrão de manutenção que garanta que as prerrogativas de segurança sejam atendidas considerando os critérios de avaliação vigentes e o critério relativo à dinâmica veicular descritos adiante neste trabalho.

1.2 Justificativa

A prática corrente adotada no planejamento das manutenções geométricas da via permanente caracteriza-se pela postergação das intervenções ao limiar das tolerâncias geométricas de segurança, tendo como referência limites máximos estabelecidos

individualmente para as deformações de cada parâmetro, sistemática adotada com o intuito de alcançar reduções orçamentárias pela realização do menor número possível de manutenções deste tipo. Esse entendimento desconsidera os efeitos do conjunto das deformações sobre a dinâmica veicular e suas implicações tanto sobre o equilíbrio do movimento dos veículos, quanto sobre a degradação física e consequente vida útil dos componentes da superestrutura.

Esse é o contexto que motivou o desenvolvimento do procedimento de planejamento proposto neste trabalho, que se diferencia dos métodos correntes ao prever as forças dinâmicas aplicadas pelos veículos sobre a via em função do intervalo entre manutenções geométricas, o que permite avaliar se a frequência de intervenção garante a segurança operacional sob critério relativo à dinâmica veicular; bem como ao medir a influência da condição geométrica sobre vida útil dos componentes, o que torna o ciclo de renovação função da frequência de manutenção geométrica. A modelagem dessas relações e sua sistematização em um método de planejamento que visa reduzir o CCV por meio da postergação das renovações, são características inéditas desta pesquisa, que configuram-se como contribuições ao avanço do tema em questão.

Portando, este trabalho se justifica mediante suas contribuições em dois campos principais, a saber, na determinação de padrões de manutenção mais seguros e ainda de menor custo. Reitera-se que autores destacam a relevância de estudos acerca das relações apresentadas no parágrafo precedente, porém a falta de pesquisas nesse âmbito, sobretudo visando a utilização desses conceitos em um método completo de planejamento, caracteriza-se como importante oportunidade de pesquisa.

O equilíbrio dinâmico também possui implicações positivas tanto sobre a qualidade do serviço prestado, com a melhoria do conforto dos passageiros e aumento da confiabilidade da operação, quanto sobre a vida útil dos veículos, já que submetidos à solicitações mecânicas menos intensas, a degradação de seus componentes tende a ser menor. Embora não integrem o escopo desta pesquisa, esses aspectos representam benefícios potenciais que o procedimento apresenta em outros segmentos que compõem o contexto ferroviário.

Sob perspectiva nacional, as mudanças que o setor ferroviário tem experimentado, impulsionadas pela renovação das concessões de exploração comercial, demandam ferramentas capazes de proporcionar às companhias previsibilidade quanto ao comportamento futuro da via, sobretudo frente às perspectivas de incremento das demandas operacionais que se reverteriam em maiores pressões sobre a infraestrutura,

com maiores velocidades e cargas/eixo, bem como restrições financeiras decorrentes da necessidade de investimentos no sistema. Nesse sentido, ferramentas capazes de assegurar a segurança operacional, transmitindo estabilidade à prestação do serviço, bem como resultarem na mitigação dos orçamentos de manutenção, são relevantes.

Sob o ponto de vista acadêmico evidencia-se a demanda por estudos que explorem este eixo temático, em busca do preenchimento das lacunas de conhecimento destacadas anteriormente. Pela inexistência de trabalhos semelhantes ao ora proposto, este conteúdo é inovador, e seu desenvolvimento se traduz na abertura de um campo de estudo a ser explorado, inclusive, por pesquisas futuras.

1.3 Estrutura da Tese

Este trabalho é composto por oito capítulos, sendo este capítulo de introdução o primeiro. O referencial teórico é apresentado nos três capítulos que se seguem, sendo que o seu conteúdo foi obtido mediante captações de trabalhos realizadas ao longo do desenvolvimento desta Tese, bem como por meio de um levantamento sistemático realizado na base de periódicos *Scopus*. Foi dada preferência a esta base, pois as publicações nela contidas estão em sua versão final. A estruturação desse referencial foi direcionada pelas necessidades identificadas no amadurecimento da proposta e na definição dos objetos de análise. Inicialmente, o Capítulo 2 apresenta o conteúdo básico do tema, com a conceituação e caracterização dos componentes e da geometria da via permanente, sua degradação, e os métodos de inspeção utilizados na prospecção das degradações. Posteriormente, são apresentadas em maior detalhe as características das operações de manutenção geométrica e renovação.

As forças dinâmicas que se desenvolvem pela interação entre os veículos e a via permanente pertencem a um campo temático fundamental ao desenvolvimento deste trabalho, portanto, o Capítulo 3 apresenta as pesquisas direcionadas à compreensão de como a geometria pode induzir acelerações e cargas dinâmicas, sua magnitude, e as consequências sobre a via. Finalmente, o último capítulo do referencial teórico analisou os principais aspectos inerentes ao planejamento de manutenções e à redução de custos nesse contexto, buscando investigar os conceitos e estratégias comumente adotadas, bem como obter informações relevantes que foram aproveitadas nesta pesquisa.

O Capítulo 5 apresenta o procedimento de planejamento de políticas de manutenção proposto.

Visando ilustrar o uso do procedimento, o Capítulo 6 apresenta sua aplicação a dados de uma ferrovia nacional de transporte de passageiros.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões desta Tese, bem como oportunidades de pesquisas futuras pertinentes ao aprimoramento do procedimento e ao desenvolvimento deste campo temático.

Compõem ainda este trabalho, três anexos e seis apêndices.

2. A VIA PERMANENTE, AS INSPEÇÕES E OS SERVIÇOS DE MANUTENÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar os elementos básicos que formam o campo de estudo desta pesquisa. Nesse sentido, o conteúdo apresenta as características da via e de seus componentes; as degradações que acometem a superestrutura; os instrumentos de inspeção que possibilitam que a degradação seja conhecida; e, finalmente, caracteriza os processos de manutenção.

2.1 A Via Permanente: Componentes e Geometria

A via permanente ferroviária constitui-se de dois conjuntos de elementos, a saber, a infraestrutura e a superestrutura. A primeira compreende o complexo de obras destinadas a formar a plataforma da ferrovia, sendo responsável por suportar a superestrutura. É formada pelas terraplanagens, cortes e aterros, bem como pelas obras de arte especiais (túneis, viadutos e pontes). A superestrutura é a responsável por sustentar e guiar os veículos, recebendo os impactos de carregamento provenientes do tráfego e transmitindo-os à infraestrutura. Seus principais elementos constitutivos são os trilhos, dormentes, acessórios de fixação, e lastro (RODRIGUES, 2001; STEFFLER, 2013). A Figura 2.1 ilustra a disposição dos componentes na formação do perfil da superestrutura.

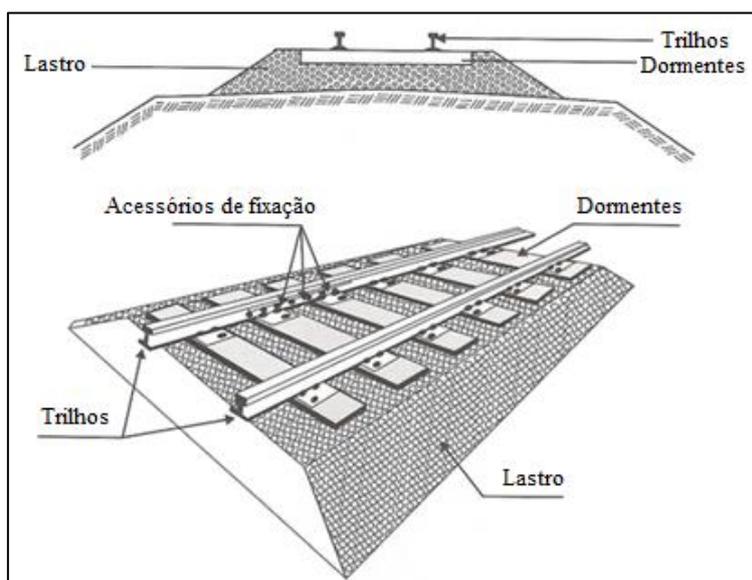


Figura 2.1: Perfil típico de uma via permanente lastrada com destaque para seus componentes.

Fonte: Steffler (2013).

Ainda entre os principais elementos da superestrutura destaca-se o aparelho de mudança de via (AMV), responsável pelo desvio do tráfego entre diferentes vias.

Ao longo deste trabalho, inclusive no capítulo de introdução, para se referir à superestrutura foram utilizados os termos “via permanente” e “via”, mesmo tendo ciência que o conceito técnico de via permanente engloba a infra e a superestrutura. Também foi empregado o termo “grade” como referência ao conjunto formado por trilhos, dormentes e fixações. Essa terminologia foi empregada tendo como fundamento a denominação convencionalmente adotada no meio ferroviário. Isto posto, a seguir são apresentados detalhes relativos às características dos componentes da via permanente.

Os trilhos formam a superfície de deslocamento, sustentação e guia dos veículos, recebendo diretamente as solicitações mecânicas provenientes do tráfego e transmitindo tais tensões aos dormentes. Em ferrovias eletrificadas integram o circuito de transmissão elétrica, sendo responsáveis pelo retorno da corrente para a subestação. Também podem atuar como condutor elétrico para o sistema de sinalização. Nos segmentos em tangente são solicitados principalmente no sentido vertical, fruto da força peso dos veículos, e longitudinal, pelos esforços de tração e frenagem. Nos segmentos em curva, o trilho externo da via guia as rodas dos veículos, resistindo a esforços no sentido transversal devidos à força centrífuga (LICHTBERGER, 2005; COIMBRA, 2008; PAIVA, 2016)

Os dormentes são vigas transversalmente dispostas em relação ao eixo da via, cujas funções são sustentar os trilhos, e distribuir e transmitir as forças oriundas do tráfego ao lastro (LICHTBERGER, 2005). Também desempenham o papel de âncora da grade no lastro. Podem ser fabricados em madeira, concreto, aço ou materiais alternativos como borracha e plástico.

Os acessórios de fixação são um conjunto de peças responsáveis por fixar os trilhos aos dormentes, mantendo a regularidade do paralelismo dos trilhos (bitola), e também garantindo a transferência das cargas aos dormentes. Os sistemas de fixação podem ser rígidos, quando os trilhos são fixos de forma rígida aos dormentes, possibilitando apenas que se movimentem longitudinalmente; ou elásticos, caracterizados por permitir uma movimentação restrita dos trilhos, mantendo, contudo, a bitola e oferecendo resistência aos movimentos longitudinais, sendo capazes, inclusive, de amortecer as vibrações provenientes do tráfego (RODRIGUES, 2001; LICHTBERGER, 2005; COIMBRA, 2008). Devem ser suficientemente robustos para resistir às forças verticais, devido aos movimentos ascendentes e descendentes que a grade adquire em reação

à passagem dos veículos (LICHTBERGER, 2005); longitudinais, decorrentes dos movimentos de aceleração e frenagem; e laterais, no alargamento da bitola e na transposição de curvas. Inclui-se ainda no conjunto dos elementos de fixação, as talas de junção, responsáveis por unir as barras de trilhos em uma mesma fileira, garantindo assim sua continuidade.

Como último elemento, o lastro está distribuído entre a plataforma e a grade. Desempenha diversas funções, dentre as quais a de oferecer uma sustentação elástica aos dormentes, amortecendo as forças provenientes do tráfego e distribuindo-as uniformemente sobre o leito da via. Além disso também é o elemento de ancoragem da grade, resistindo aos movimentos de deslocamento longitudinal e lateral desta. Possibilita também a drenagem da superestrutura e a execução de manutenções destinadas à recomposição da geometria (LICHTBERGER, 2005; COIMBRA, 2008).

O perfil ilustrado na Figura 2.1 é conhecido como superestrutura elástica ou lastrada, devido à utilização do lastro como elemento elástico e de suporte. A via permanente pode ainda ser classificada como rígida, ou em placas, quando o uso do lastro é suprimido, havendo métodos construtivos em que a grade é assentada sobre lajes de concreto, e ainda, modelos em que os trilhos são fixados diretamente sobre vigas longitudinais também de concreto. Esse tipo de superestrutura é utilizada frequentemente em metrô e em sistemas ferroviários com características operacionais específicas, normalmente, altas velocidades.

A via lastrada é a mais utilizada mundialmente, sobretudo devido ao menor custo de construção e à facilidade de manutenção (ZHANG *et al.*, 2019). Por conseguinte, o procedimento de planejamento proposto neste trabalho foi concebido visando sua utilização nesse tipo de superestrutura.

A geometria da via permanente pode ser definida, em sentido amplo, pelas características do traçado estabelecidas em projeto, no que concerne ao seu posicionamento espacial relativo aos eixos horizontal e vertical, bem como à sua seção transversal. O projeto geométrico horizontal refere-se ao estabelecimento da planimetria de toda extensão do trecho ferroviário, compreendendo a especificação e locação de curvas, espirais, AMVs dentre outros itens. Já o projeto vertical refere-se à determinação das características altimétricas da via, estabelecendo o perfil longitudinal adequado à variação vertical do terreno. Já o projeto transversal estabelece as especificações e larguras mínimas das estruturas componentes da seção transversal da via férrea, tais como

bitola, inclinação transversal da plataforma, espessura do lastro sob os dormentes, dentre outros (PAIVA, 2016).

A região superior dos boletos dos trilhos paralelos forma o plano de rolamento dos veículos, portanto, para que o deslocamento do material rodante se processe em segurança dentro dos limites de velocidade preconizados, o posicionamento espacial do conjunto dos componentes da superestrutura, deve estar arranjado de tal modo que sustente ao longo do traçado planos em curva e em tangente segundo as diretrizes estabelecidas no projeto da ferrovia em função do desempenho almejado e do relevo a ser transposto. Movimentações nesses componentes que resultem no afastamento das superfícies dos trilhos de sua posição ideal, introduzem deformações (defeitos) no plano de rolamento que podem induzir desequilíbrios no movimento dos veículos, podendo prejudicar o conforto, o desempenho e até mesmo a segurança da operação. Para designar tal posicionamento relativo, convencionou-se o emprego do termo geometria, portanto, conferindo-lhe um sentido mais restrito do que aquele apresentado no parágrafo precedente. Este trabalho emprega o termo geometria da via permanente segundo esse sentido estrito.

O posicionamento relativo dos componentes é descrito por meio de parâmetros, cujas características são melhor compreendidas quando apresentadas conjuntamente com suas deformações, que caracterizam, portanto, a degradação geométrica.

2.2 Degradação da Via Permanente

Com o passar do tempo e do tráfego, tanto a geometria quanto a estrutura física dos componentes da via permanente se degradam.

A geometria da via é caracterizada por meio de parâmetros que indicam a posição relativa dos componentes no espaço. Por consequência, sua degradação diz respeito ao afastamento desse posicionamento ideal. Esses parâmetros, bem como as características de sua degradação, são apresentados a seguir:

- Bitola: distância AB entre as faces internas de trilhos paralelos, medida a uma distância y da superfície do boleto, como indicado pela Figura 2.2. O valor de y varia em função das normas consideradas, havendo diretrizes que indicam 16, 14 ou ainda 12 mm (RODRIGUES, 2001; STEFFLER, 2013)

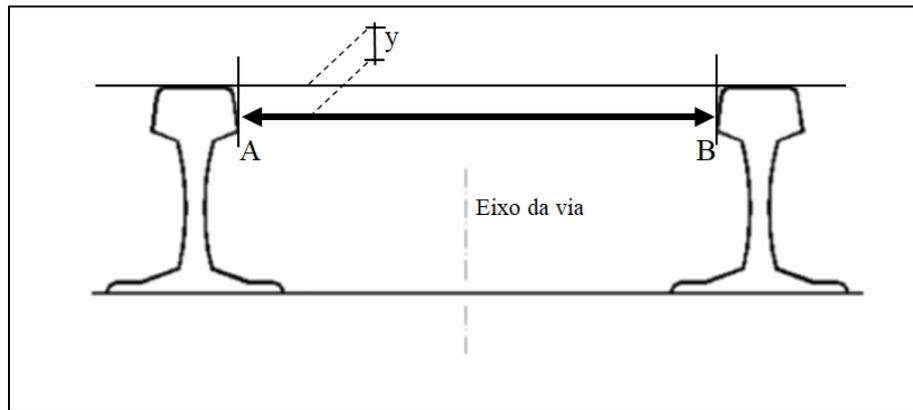


Figura 2.2: Bitola de uma via permanente.

Fonte: Adaptado de Coimbra (2008).

O afastamento da bitola de sua medida ideal pode ser consequência de problemas nos dormentes e nos acessórios de fixação, bem como devido ao desgaste ou empenamento de trilhos, e problemas nas talas de junção;

- Nivelamento longitudinal: refere-se ao nível da superfície de rolamento de um trilho em relação a pontos adjacentes na mesma barra. É definido pela variação vertical y em um ponto C em relação ao nível ideal do trilho estabelecido pela reta AB tangente à superfície de rolamento ideal, como ilustrado na Figura 2.3.

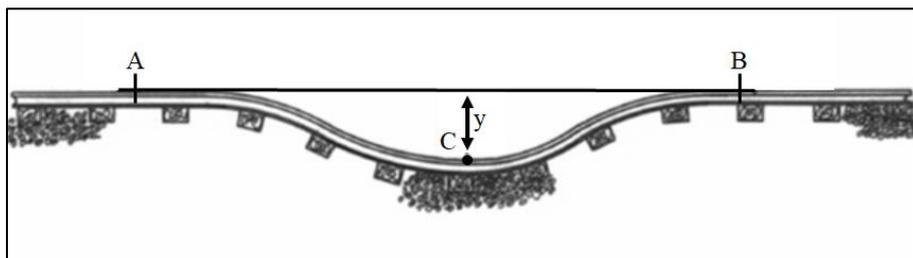


Figura 2.3: Desnivelamento longitudinal.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2001).

Esse parâmetro é medido de forma independente em ambos os trilhos. Desnivelamentos podem ocorrer devido a problemas de drenagem, dormentes defeituosos, recalque do lastro ou da plataforma, e juntas desniveladas;

- Nivelamento transversal: é o nível entre os pontos A e B, localizados na superfície de rolamento de trilhos paralelos, definidos por meio de uma reta perpendicular a eles. É definido pela diferença vertical y entre a superfície de rolamento A' (real) e a superfície A (ideal), como demonstrado pela Figura 2.4.

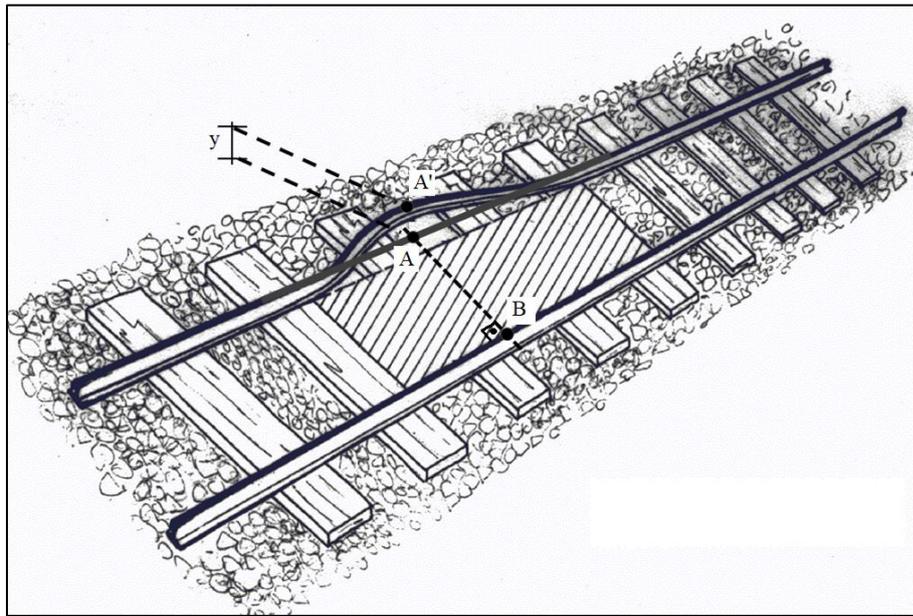


Figura 2.4: Desnivelamento transversal.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2001).

Este tipo de degradação geométrica normalmente é fruto de espaços vazios entre os dormentes e o lastro (RODRIGUES, 2005);

- Superelevação: é a maior altura A do trilho externo em relação ao interno em curvas, propositalmente estabelecida para compensar a força centrífuga e permitir que o veículo transponha a curva com segurança. Alterações de superelevação caracterizam-se pelo afastamento y da superfície de rolamento do trilho externo em relação à posição ideal, como indicado pela Figura 2.5.

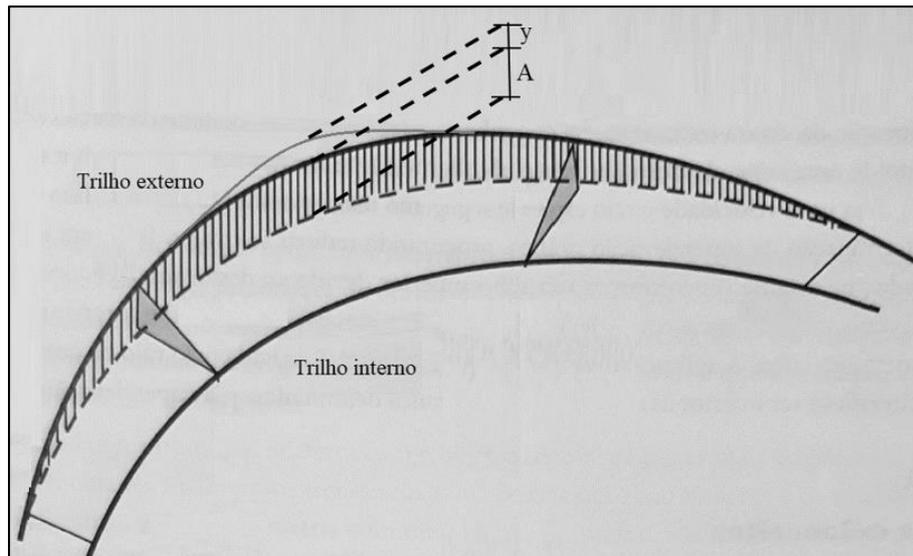


Figura 2.5: Degradação de superelevação em curvas.

Fonte: Adaptado de Steffler (2013).

- Empeno: considerando um plano formado na superfície de rolamento dos trilhos, delimitado pelo retângulo ABCD, o empeno é a diferença entre o desnivelamento transversal y entre B' e B, e o desnivelamento transversal y entre D' e D. A Figura 2.6 apresenta esse conceito.

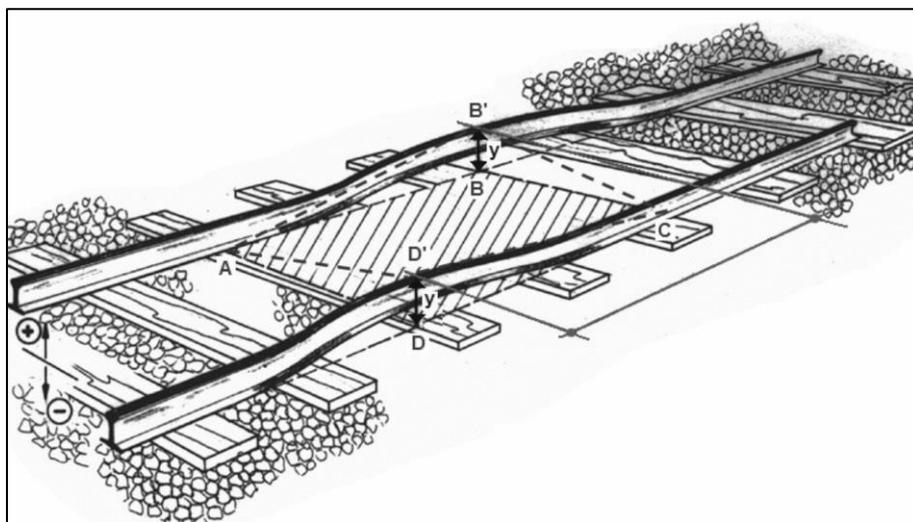


Figura 2.6: Empeno.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2001).

O empeno da via decorre dos mesmos fatores mencionados nos desnivelamentos longitudinal e transversal, sendo observado frequentemente em vias em que os trilhos são unidos por juntas defasadas;

- Torção: trata-se do mesmo tipo de deformação descrita pelo parâmetro empeno, porém seu valor é determinado pela diferença entre o maior e o menor desnivelamentos transversais y encontrados na região delimitada pelo retângulo ABCD (ilustrado na Figura 2.6). Portanto, o empeno é aferido em uma base de medição fixa (vértices do retângulo ABCD), enquanto a torção é baseada em uma região de medição (pontos dentro do retângulo ABCD que resultam na maior deformação);
- Alinhamento: distância, no plano horizontal, entre os trilhos e o eixo da via previsto em projeto. O desalinhamento é determinado pela distância Y que um ponto C na lateral do trilho apresenta em relação ao alinhamento ideal da via delimitado pela reta AB, como mostrado na Figura 2.7.

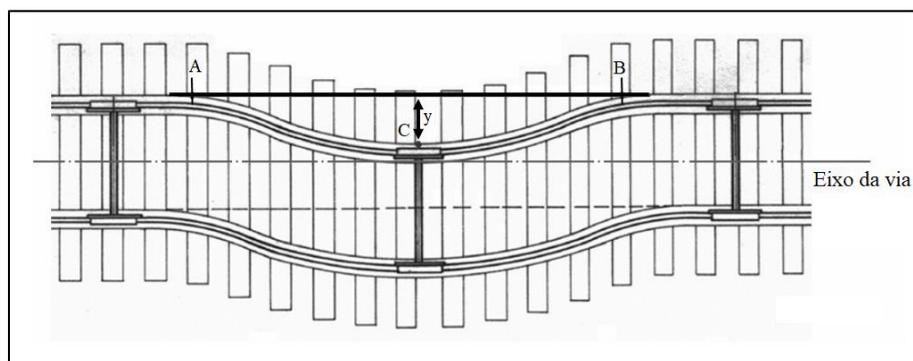


Figura 2.7: Desalinhamento da via.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2001).

Pode ocorrer de forma independente entre os trilhos (por isso é aferido em ambas fileiras), porém a grade como um todo pode se desalinhar, como ilustrado na figura anterior. Ocorre principalmente devido a problemas na fixação, dormentes defeituosos, ombro de lastro insuficiente, e deformações nos trilhos (LIMA, 1998).

Além dos fatores descritos juntamente com a apresentação dos parâmetros, a degradação geométrica também é influenciada pela intensidade do transporte, sendo sua evolução mais acentuada tanto quanto maiores forem as velocidades operacionais, o volume do tráfego e o peso/eixo (LICHTBERGER, 2005), bem como em função de

aspectos ambientais tais como temperatura, precipitação, congelamento do solo, dentre outros. Outro fator significativamente relevante é a movimentação da grade devido à acomodação e degradação do lastro e do leito da via (PRESCOTT e ANDREWS, 2015; BENEDETTO e CIAMPOLI, 2018; NIELSEN e LI, 2018). Em concordância, Sol-Sánchez e D'Angelo (2017) indicam que a perda da qualidade geométrica é fruto da soma de deformações em todas as camadas da via permanente, especialmente aquelas decorrentes da degradação do lastro, que pode responder por cerca de 50 a 70% da alteração vertical sofrida pela grade.

Concomitantemente à degradação geométrica, a estrutura física dos componentes também se degrada.

A degradação do lastro caracteriza-se, principalmente, pelo fraturamento da brita em decorrência da abrasão pela compressão mecânica sofrida durante a passagem dos veículos, bem como em função de aspectos ambientais, e pelo processo de manutenção geométrica (como explicado na Seção 2.4) (GUO *et al.*, 2018; KOOHMISHIA e PALASSIB, 2020; ZHANGA *et al.*, 2020). Além desses fatores, destacam-se o tipo de material utilizado e sua altura sob os dormentes (RODRIGUES, 2001). Como consequência, é gerado material de granulometria fina que progressivamente preenche os vazios naturais do próprio lastro, prejudicando sua capacidade de suportar os dormentes de maneira elástica, comprometendo a drenagem, dentre outros problemas (REZAIE *et al.*, 2012; GUO *et al.*, 2018).

Nos dormentes de concreto a degradação será influenciada principalmente pelo impacto devido às forças de carregamento das rodas dos veículos (MAOUT e KATO, 2016), destacando-se também as características de projeto do componente e a deficiência de sustentação decorrente da degradação do lastro. As degradações nesse caso levam ao desenvolvimento de problemas com diversas características, como fraturas nas arestas dos dormentes, trincas e quebras em sua estrutura. Esses problemas podem estar associados ou não, e, a depender da posição e severidade, podem comprometer completamente a capacidade do item de cumprir sua função. Quanto aos dormentes de madeira, sua degradação está sujeita às condições de sustentação e à ação do tráfego, contudo, soma-se sua susceptibilidade ao clima (umidade, por exemplo) e ao ataque biológico (fungos e insetos) que tem influência direta no apodrecimento e comprometimento das fibras da madeira. Também destaca-se como fator de degradação dos dormentes (de qualquer tipo) o espaçamento entre eles, tendo em vista a influência desse aspecto na distribuição das cargas de carregamento (RODRIGUES, 2001).

O comprometimento estrutural dos trilhos ocorre mediante o desenvolvimento de desgaste superficial e fadiga do material. O desgaste refere-se à perda de material devido à abrasão com as rodas dos veículos. Esse processo leva à perda progressiva de material na superfície de rolamento, como também na lateral interna do boleto, sobretudo em curvas, sendo essa última potencialmente perigosa porque gera um perfil que pode facilitar a escalada do flange da roda sobre o trilho, o que pode resultar em descarrilamentos. A ação repetitiva das cargas impostas pelas rodas em tensões acima do limite elástico do material, leva ao desenvolvimento de fadiga, que pode ser descrita como o progressivo comprometimento do aço mediante deformações plásticas de sua estrutura. Em consequência pode ocorrer deformações do perfil do boleto, trincas, ondulações e escamações da superfície de rolamento (conhecidas como RCF – *rolling contact fatigue*), bem como trincas e quebras da estrutura do trilho como um todo. Como fatores de influência para o desenvolvimento desse tipo de degradação destacam-se o perfil do trilho adotado, comprimento da barra, características metalográficas (RODRIGUES, 2001), clima e sustentação proporcionada pela super e infraestrutura (DATSYSHYN *et al.*, 2019), regiões críticas como pontos de solda, juntas com tala e AMVs, e a intensidade e volume das cargas aplicadas pelos veículos.

A avaliação das degradações geométricas e físicas normalmente é feita considerando tolerâncias, valores predeterminados que indicam qual a severidade da deterioração. Portanto, sublinha-se a necessidade dos gestores de conhecer o estado de degradação como subsídio para o planejamento e a própria execução das manutenções. Na próxima seção os serviços de inspeção destinados à obtenção desses dados são apresentados.

2.3 Inspeção da Via Permanente

As inspeções têm por objetivo tornar conhecido o estado de conservação da via permanente. Caracterizam-se pelo emprego de técnicas de prospecção que variam em suas concepções e tecnologias, mas que, em resumo, destinam-se a medir a amplitude das degradações geométricas ou físicas, estabelecendo um retrato da condição funcional da superestrutura no momento da inspeção.

Quanto à condição geométrica, cada um dos parâmetros descritos na subseção anterior é aferido ao longo do trecho ferroviário. Para tanto podem ser empregadas técnicas manuais ou automáticas dependendo da disponibilidade de equipamento e

também da extensão da área a ser inspecionada. Paiva (2016) discrimina as inspeções em objetiva pontual e contínua, sendo a abrangência da primeira restrita a locais específicos, de pequena extensão e que merecem atenção diferenciada devido a particularidades, como intensidade de tráfego mais elevada. A objetiva contínua é a mais comum, quando as prospecções são realizadas de maneira contínua ao longo de todo trecho ferroviário.

As inspeções geométricas manuais são realizadas por meio de equipamentos de pequeno porte que realizam a leitura de um ou poucos parâmetros. Podem ser empregados *trolleys* especiais (Figura 2.8), réguas de medição de bitola e superelevação, medições pelo método corda e flecha, ou mesmo utilizando técnicas de levantamento topográfico (FERREIRA, 2010; LIMA, 2019). Esse modelo apresenta baixa produtividade, sendo, portanto, mais adequado às ações pontuais.



Figura 2.8: *Trolley* de inspeção.

Fonte: Ferreira (2010).

A sistemática mais consolidada para inspeções contínuas baseia-se no uso de veículos de inspeção (CHIACHÍO *et al.*, 2019; SAUNI *et al.*, 2020). Também conhecidos como carros controle, são equipamentos especialmente projetados para essa finalidade, autopropulsados e que realizam as medições durante deslocamento. São capazes de medir todos os parâmetros geométricos com precisão elevada (chegando a milésimos de milímetro) e ainda mediante a aplicação ou não de cargas sobre os trilhos. A distância entre os pontos de medição durante o deslocamento varia em função do equipamento e das configurações adotadas pelos inspetores, porém existem veículos que são capazes de realizar medições em intervalos de 10 cm. Na Figura 2.9 é apresentado de forma ilustrativa, o carro controle utilizado pela agência americana *Federal Railroad Administration* (FRA).



Figura 2.9: Carro controle utilizado pela FRA.

Fonte: Lichtberger (2005).

A depender do modelo de veículo bem como do parâmetro medido, os instrumentos empregados para realização das medições podem variar. Existem sistemas baseados no uso de sensores analógicos (sistema ilustrado na Figura 2.10) em que rodízios com eixos telescópicos são apoiados nos trilhos e ligados a transdutores que convertem os movimentos mecânicos em sinais elétricos a serem processados posteriormente (FERREIRA, 2010).

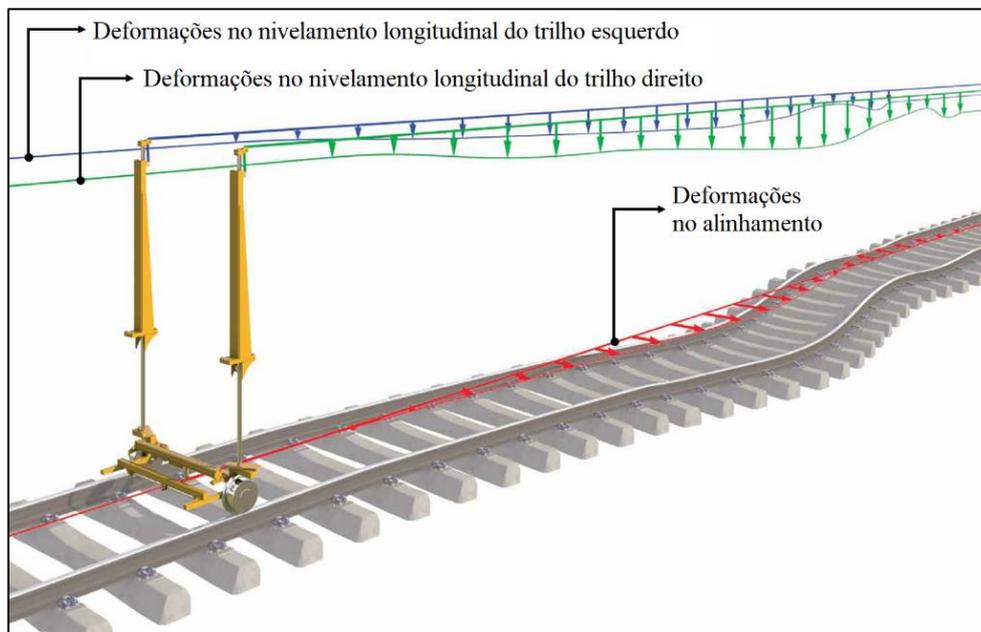


Figura 2.10: Sistema analógico de inspeção geométrica utilizado em socadora automática de via.

Fonte: Plasser do Brasil (2023a).

Apesar de ainda serem empregados, sobretudo nos veículos de manutenção geométrica (socadora), é cada vez maior a utilização de instrumentos de inspeção em que não há contato com a via, baseados no uso de sensores ópticos, *lasers*, acelerômetros e giroscópios.

As inspeções dinâmicas também são uma alternativa de inspeção muito utilizada, estando baseada na avaliação dos movimentos que o material rodante apresenta em relação à via durante deslocamento (SAUNI *et al.*, 2020). Para tanto, são utilizados acelerômetros, que podem ser definidos como sensores de posição, atitude ou movimento cujas referências são completamente internas, podendo ser concebido como um sistema massa-mola-amortecedor cujo deslocamento é medido em relação a um sistema de coordenadas fixas ao dispositivo de instrumentação (LIMA, 2019). A Figura 2.11 ilustra o conceito geral de um acelerômetro. São calibrados de forma a medir 1,0 g quando estacionários na superfície da Terra, com seus eixos de sensibilidade paralelos à linha de prumo (vertical) local (LIMA, 2019). Como unidade de medida têm-se tanto o g (gravidade), quanto o m/s^2 ($1g \cong 9,81 m/s^2$).

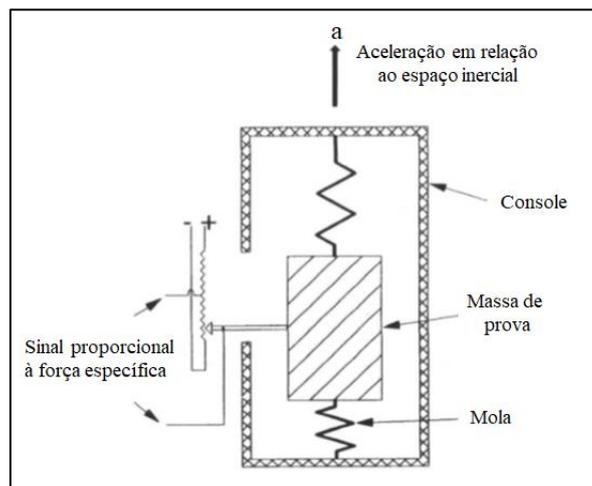


Figura 2.11: Constituição típica de um acelerômetro.

Fonte: Lima (2019).

Alguns modelos de carro controle possuem de fábrica acelerometria embarcada. Contudo, esses veículos exigem investimento elevado e, além disso, a capacidade de inspeção está limitada à frota de veículos de inspeção. Assim, como alternativa, veículos comuns (carros, vagões, locomotivas) podem ser instrumentados para esse mesmo propósito de inspeção. Esse modelo, além da economia financeira e flexibilidade de

cobertura da rede, proporciona leituras mais fiéis à realidade operacional do trecho, tendo em vista que as medições serão feitas a partir das reações dos veículos de interesse.

Nessa modalidade, normalmente é utilizada uma combinação de sensores formada por acelerômetros, sistemas de GPS para localização das medições, e sensores de velocidade. Quanto à instalação, existem diferentes arranjos, com sensores posicionados no interior dos veículos, na estrutura dos truques e até mesmo nos *axle-boxes* (mancais de rolamento localizados nas pontas dos eixos dos rodeiros). A Figura 2.12 apresenta um aparato de medição montado no interior do veículo. Já a Figura 2.13 apresenta um truque instrumentado. Existem ainda, os rodeiros instrumentados, ilustrados pela Figura 2.14, cuja utilização, contudo, é mais complexa dada a dificuldade para instrumentação e mesmo o seu elevado custo.



Figura 2.12: Acelerômetros instalados no interior do veículo. À esquerda, sensores posicionados no assento dos passageiros; à direita, acelerômetros no piso do veículo.

Fonte: Sadegui *et al.* (2017).

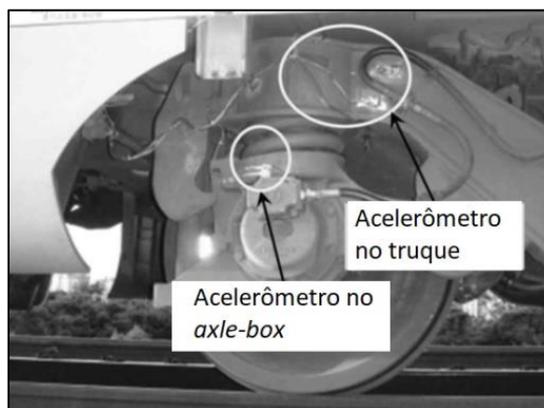


Figura 2.13: Truque ferroviário instrumentado.

Fonte: Lee *et al.* (2011).

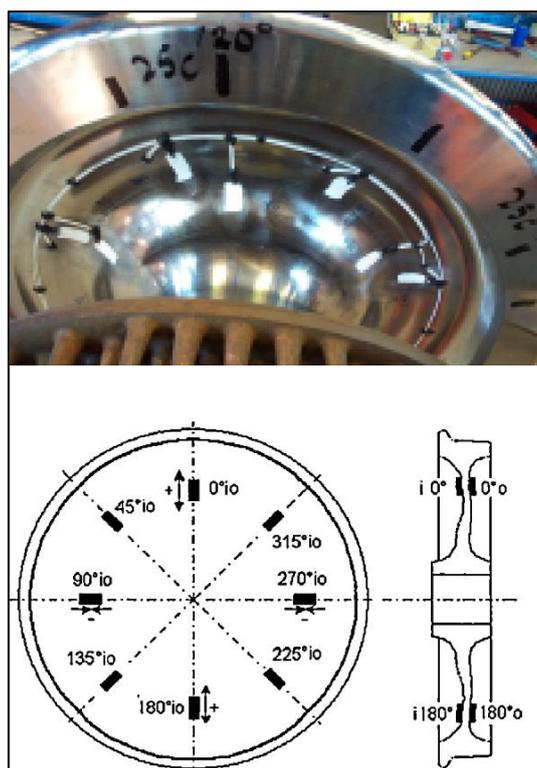


Figura 2.14: Roda instrumentada com destaque para o posicionamento dos sensores.

Fonte: Gullers *et al.* (2008).

Independentemente do sistema de aquisição empregado, todas as medições são referenciadas geograficamente, seja em relação aos marcos quilométricos da ferrovia, seja por meio de coordenadas geográficas, sendo possível também a identificação de pontos notórios da via, tais como túneis, pontes, passagens de nível, dentre outros. Os dados obtidos são processados por computadores no interior dos veículos e disponibilizados aos inspetores em tempo real, normalmente, sob a forma gráfica, como ilustrado pelo relatório de inspeção geométrica apresentado na Figura 2.15. Também são gerados o relatório de inspeção, planilha que apresenta os valores em verdadeira grandeza das leituras de cada ponto de medição, bem como o relatório de exceção, que apresenta pontos de defeitos de geometria que requerem atenção imediata. A Tabela 1 apresenta exemplo de relatório de inspeção, e a Tabela 2 exemplifica um relatório de exceção.

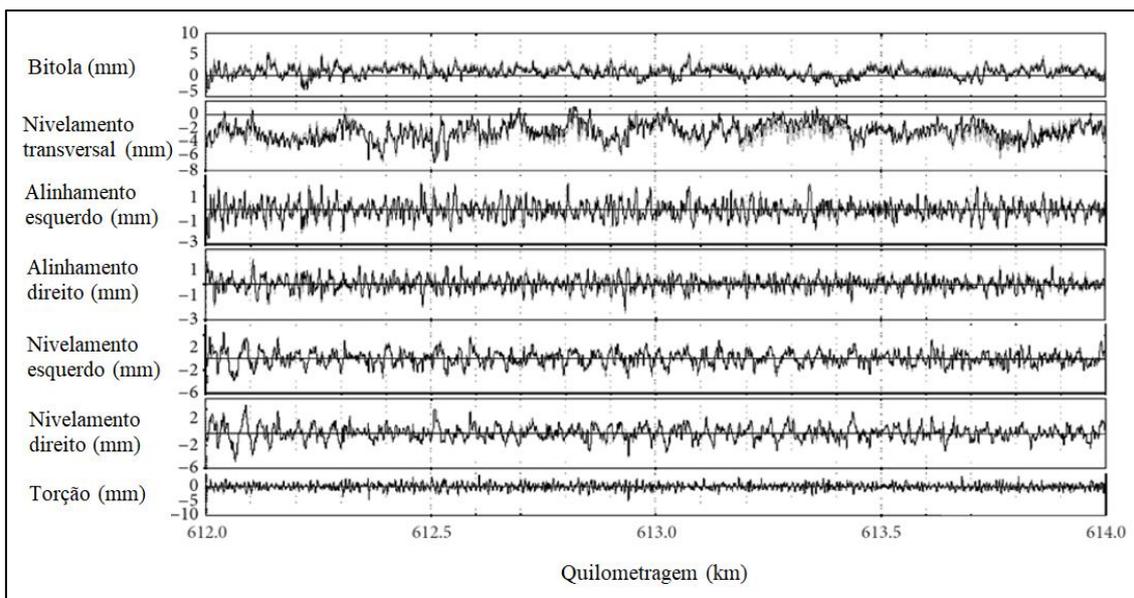


Figura 2.15: Exemplo de relatório gráfico gerado em inspeção geométrica.

Fonte: Adaptado de Xu *et al.* (2015).

Tabela 1: Exemplo de relatório de inspeção geométrica

Ramal	Linha	Km	Metro	Curva (C)/ Tangente (T)	Bitola	Empeno	Superel.	Alinh. dir.	Alinh. esq.	Niv. dir.	Niv. esq.
LT	1	43	27,0	C	9,90	3,56	3,48	-0,78	-1,13	0,55	1,33
LT	1	43	27,5	C	9,90	1,53	3,91	-0,27	-0,90	0,51	1,06
LT	1	43	28,0	C	9,98	-1,17	4,81	0,59	-0,08	-0,59	1,13
LT	1	43	28,5	C	10,09	-1,13	4,93	-0,04	-0,66	-0,78	-0,23
LT	1	43	29,0	C	10,05	-0,16	3,36	0,31	-0,55	-0,82	-0,66
LT	1	43	29,5	C	10,05	-1,64	1,88	-0,04	-1,06	-1,37	-2,27
LT	1	43	30,0	C	10,09	-3,95	2,39	-0,63	-1,68	-2,15	-2,70
LT	1	43	30,5	C	10,09	-3,95	2,19	-0,86	-1,41	-2,31	-3,17
LT	1	43	31,0	C	10,80	0,08	1,17	-1,49	-1,13	-1,64	-3,25
LT	1	43	31,5	C	11,19	2,70	-0,20	-0,59	0,12	-1,17	-3,99
LT	1	43	32,0	C	11,66	2,19	0,04	-0,86	0,27	-0,55	-1,56

Fonte: Rodrigues (2001).

Tabela 2: Exemplo de relatório de exceções geométricas

Via	Localização		Comprimento do defeito (m)	Parâmetro	Amplitude do defeito (mm)
	Do km,m	Até km,m			
2	22,193	22,194	2	nivelamento direito	-5
2	22,249	22,250	2	Nivelamento esquerdo	-5
2	22,249	22,250	1	Nivelamento direito	-5
2	22,656	22,657	1	Nivelamento direito	-4
2	23,176	23,177	1	Alinhamento esquerdo	7
2	23,343	23,345	2	Superelevação	-6

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2017).

A degradação de um parâmetro geométrico indica a diferença entre o valor do parâmetro medido na via e sua medida prevista em projeto. Quando a diferença ultrapassa limites predeterminados em função dos padrões de segurança, desempenho e conforto almejados pela empresa ferroviária, tais deformações são consideradas defeitos.

As tolerâncias de segurança e conforto utilizadas para avaliação da condição geométrica e definição do limite de intervenção, variam em função das velocidades máximas autorizadas no trecho ferroviário, sendo que quanto maior a velocidade operacional, maior será a requisição por qualidade e, portanto, menor será a amplitude das deformações tolerada. Caso as degradações ultrapassem as tolerâncias, considera-se que o tráfego está em risco iminente de acidente, requerendo ações imediatas, como manutenções corretivas, restrições de velocidade no local do defeito, ou o fechamento da via. Existem diversas normas que regram essa questão, com as tolerâncias definidas em função das velocidades máximas autorizadas, como a norma europeia EN 13848-5 (2008), a americana CFR (*Code of Federal Regulations*) 49 (parte 213, subparte C, de 2023), e a brasileira ABNT NBR 16387:2020, cujos valores de referência são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Tolerâncias geométricas (em mm) estabelecidas pela ABNT

Parâmetro geométrico	Velocidades máximas autorizadas (km/h)					
	0 - 15	16 - 40	41 - 64	65 - 95	96 - 128	
Bitola	Limite de bitola aberta	1635	1632	1632	1625	1613
	Limite de bitola fechada	1587	1587	1587	1587	1587
	Varição rápida de bitola em 5 m	34	31	23	18	13
Nivelamento transversal	Varição em tangente ou curva circular (empeno)	76	51	44	32	25
	Varição a cada 10 m na espiral de entrada ou de saída de curvas (torção)	51	44	32	25	19
	Desnívelamento máximo (em qualquer ponto na tangente)	76	51	45	32	25
	Desnívelamento periódico ou sequencial na superelevação (curva ou tangente - 3 pontos)	NA	31	31	31	31

(continuação)

Parâmetro geométrico	Velocidades máximas autorizadas (km/h)					
	0 - 15	16 - 40	41 - 64	65 - 95	96 - 128	
Alinhamento	Desalinhamento de curva em 10 m (variação máxima de flecha horizontal em relação à medida das flechas - corda de 10 m)	NA	NA	31	25	12
	Defeito de alinhamento em tangente (variação máxima de flecha horizontal em relação à tangente - corda de 20 m)	128	76	44	36	19
	Desalinhamento de curva em 20 m (variação máxima de flecha horizontal em relação à medida das flechas, 1/2 da corda de 20 m)	127	76	44	38	15
Curvatura	Excesso de superelevação na tangente ou na curva circular (em relação ao nível zero ou à superelevação X projetada para a curva circular)	X + 76	X + 51	X + 45	X + 32	X + 25
	Excesso de superelevação na espiral (diferença entre a superelevação projetada e a superelevação existente na espiral)	44	38	31	19	12
	Deficiência máxima de superelevação (diferença entre a superelevação existente e a projetada na curva circular)	110	110	110	110	110
	Variação do grau de curvatura (na circular ou espiral)	25,4/3m	25,4/3m	25,4/3m	25,4/5m	25,4/5m
Nivelamento longitudinal	Desnívelamento máximo do perfil longitudinal (flecha no topo do trilho, no 1/2 da corda de 20 m)	76	70	57	51	32
	Varição máxima do nivelamento longitudinal em 10 m (Variação de cota do trilho na extremidade da corda de 10 m)	89	76	51	38	25

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020).

A condição estrutural dos componentes deve igualmente ser conhecida, sendo que o modelo mais tradicional de inspeção para tanto é a visual, em que inspetores caminham pelos trechos ferroviários realizando medições específicas, tais como aferindo o desgaste do boleto, observando a ausência de elementos da grade, quebras e trincas de componentes, o estado de contaminação do lastro, a situação do sistema de drenagem, dentre outros. Trata-se de modalidade muito empregada, sobretudo devido à complexidade que envolve a análise desses elementos, de características tão particulares. Contudo, assim como no controle da geometria, também para a inspeção física existem veículos de inspeção automática, que empregam tecnologias como ultrassom, *lasers* e sistemas de processamento de imagens digitais (LIU e MARKINE, 2020).

A condição dos componentes também pode ser inferida pelos dados de inspeção geométrica, sobretudo no que se refere ao lastro, já que sendo esse componente o responsável direto pela sustentação da grade, sua degradação pode implicar num ritmo de degradação geométrica acentuado (LICHTBERGER, 2005).

A frequência das inspeções está condicionada às características da ferrovia, sendo mais frequente tanto quanto mais intenso for o tráfego em termos de velocidade e volume transportado, bem como quanto mais arriscada for a operação, seja devido às características da via, seja em função do tipo de produto transportado (cargas perigosas, serviço de passageiros, etc). A FRA, por exemplo, orienta os esforços de inspeção segundo a seguinte frequência – adaptado de Ribeiro (2017):

- Se o volume transportado anualmente exceder 40 MTBT (milhões de toneladas brutas transportadas) na linha principal para ferrovias classificadas (segundo FRA) como classe 5 (velocidade máxima para transporte de carga de 129 km/h; velocidade máxima para transporte de passageiro de 147 km/h) e classe 4 (carga: 97 km/h; passageiro: 127 km/h) e na linha principal com serviço de passageiros frequente como classe 3 (carga: 64 km/h; passageiro: 97 km/h), deve ser feita ao menos duas inspeções automáticas anualmente, com no mínimo 160 dias de intervalo entre elas;
- MTBT/ano < 40 para classes 5 e 4 na linha principal e classe 3 na linha principal com serviço de passageiros frequente, deve ser feita ao menos uma inspeção automática anualmente;
- Para classes 3, 4 e 5 na linha principal com serviço exclusivo de passageiros, uma inspeção automatizada ou a pé deve ser conduzida anualmente;

- Vias com dormentes de concreto devem ser inspecionadas duas vezes ao ano.

Em resumo, os dados de inspeção formam o arcabouço de planejamento das manutenções, indicando locais com degradações graves que requerem intervenções corretivas imediatas, e pontos a receberem manutenções no futuro. Na próxima seção os serviços de manutenção serão apresentados em detalhes.

2.4 Manutenções na Via Permanente

As manutenções a serem executadas na via permanente são classificadas em manutenções geométricas, renovações e remodelações.

A manutenção geométrica, também conhecida como conserva geométrica, visa corrigir os defeitos de geometria por meio do reposicionamento dos componentes. Busca-se em cada intervenção alcançar um nível de acabamento em que a posição dos itens esteja o mais próximo possível daquela definida em projeto. Trata-se do serviço de menor vida útil.

As renovações destinam-se à substituição dos componentes cujo estado de degradação física alcançou patamares que caracterizam o fim de suas vidas úteis segundo as características operacionais do trecho ferroviário em questão. Também são realizadas quando o estado de degradação, sobretudo em relação ao lastro, prejudica a retenção da geometria. Pode variar quanto ao número de componentes substituídos, existindo modalidades em que todos os itens são trocados ao mesmo tempo, ou então sob a forma de substituições independentes, quando cada componente é substituído de maneira isolada tendo como referência sua própria vida útil. As renovações, principalmente no modelo de substituição conjunta, são capazes de restabelecer a qualidade da via à padrões semelhantes àquele de sua construção.

A remodelação visa substituir os componentes por modelos mais robustos ou modernos. Trata-se, portanto, de um serviço de aprimoramento das características e qualidade da via, que pode ser motivado pelo incremento da demanda de transporte ou pela requisição por maior segurança operacional. Por conseguinte, esse tipo de intervenção não necessariamente irá ocorrer em uma ferrovia, estando condicionado às necessidades eventuais.

Embora existam alternativas manuais, o método mais utilizado mundialmente desde 1960 para corrigir a geometria é a socaria automática de via (SASIDHARAN *et*

al., 2020), realizada por meio de um veículo específico e de grande porte, como aquele ilustrado na Figura 2.16. Nesta operação, inicialmente um dispositivo de levante e puxamento (apresentado na Figura 2.17 B) pinça os trilhos e eleva a grade até uma determinada posição que permite que a alteração geométrica seja corrigida. Em seguida, a banca de socaria (vista na Figura 2.17 A) introduz no lastro as ferramentas de socaria, que mediante vibração e movimento de compressão, comprimem a brita sob o dormente (processo ilustrado na Figura 2.18). Quando a grade é solta pelo equipamento, esta permanecerá, em alguma medida, na posição definida pelo levante, sustentada pelo lastro compactado abaixo dos dormentes.



Figura 2.16: Socadora de via modelo 09-2X SH fabricada pela austríaca Plasser&Theurer.

Fonte: Plasser do Brasil (2023a).

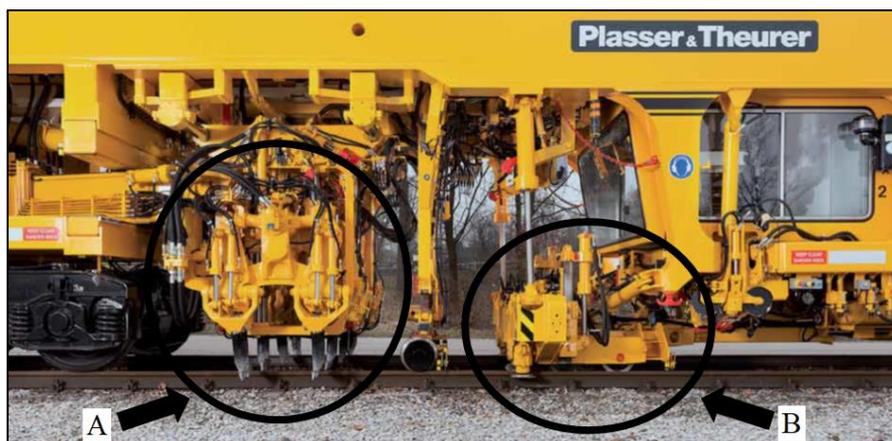


Figura 2.17: Banca de socaria (A) e dispositivo de levante e puxamento (B) utilizados em socadora automática de via.

Fonte: Adaptado de Plasser do Brasil (2023a).

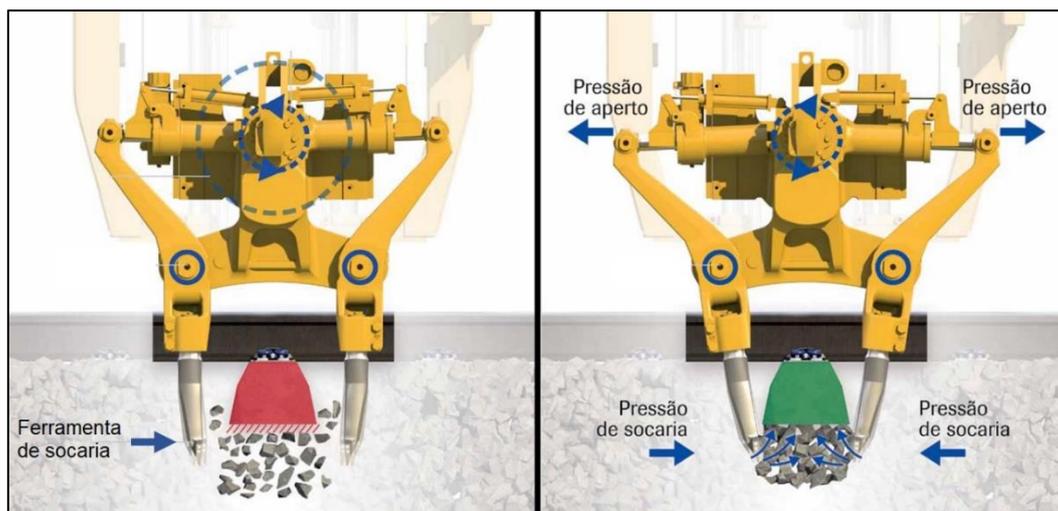


Figura 2.18: Processo de socaria. À esquerda introdução das ferramentas de socaria no lastro, e à direita compressão da brita sob o dormente.

Fonte: Adaptado de Plasser do Brasil (2023a).

Em conjunto com a socadora, um segundo veículo, denominado regulador de lastro, reconstitui o perfil da camada de brita ao longo do traçado que foi perdido em decorrência das vibrações geradas pelo tráfego e pela própria socaria.

Apesar de eficaz, a introdução das ferramentas de socaria e a vibração empregada no processo leva ao afrouxamento da camada de lastro que estava compactada, fazendo com que após o serviço ocorra uma degradação acentuada da geometria até que o arranjo da brita se estabilize (SOL-SÁNCHEZ *et al.*, 2017), além disso, por envolver o emprego de vibração e elevadas forças mecânicas, também resulta no fraturamento de parcela do material do lastro, podendo produzir mais de 4 kg de finos/dormente/socaria (SOL-SÁNCHEZ e D'ANGELO, 2017). Como consequência, os efeitos benéficos das correções geométricas são reduzidos progressivamente, e para que a frequência dessas intervenções e os correspondentes custos não se elevem muito, faz-se necessário realizar a renovação completa da brita ou então a limpeza do lastro por meio de processo denominado desguarnecimento (SOLEIMANMEIGOUNI *et al.*, 2016).

O desguarnecimento consiste na retirada do lastro da via, seu peneiramento para retirada de finos (material de granulometria inferior à recomendada), devolução à via da brita que atende à especificação, e descarga de lastro complementar para compensar o volume perdido pela degradação. Embora haja registro de sua realização manualmente, existem diversas alternativas mecanizadas. O modelo de maior produtividade está baseado no uso de equipamento de grande dimensão, normalmente autopropulsado, que

realiza o desguarnecimento durante deslocamento, com a retirada da brita por meio de sistema de correntes especiais, realização do peneiramento automaticamente, devolução do material à via atrás do ponto de retirada, e deposição do rejeito em vagões ou na lateral da via. A figura 2.19 apresenta de forma ilustrativa uma desguarnecedora automática deste tipo.



Figura 2.19: Desguarnecedora automática de via. À esquerda é apresentado o ponto de retirada do lastro e descarga da brita peneirada, destacando-se a grade suspensa no meio deste processo. À direita destaca-se a dimensão do equipamento.

Fonte: Plasser&Theurer (2023a).

Existem práticas para postergar a necessidade de desguarnecimento. Uma delas, com registro, inclusive, de sua adoção no Brasil (RODRIGUES, 1983), é a descarga de lastro complementar em cada serviço de socaria, que acrescenta brita nova na via visando compensar a degradação de parcela do material.

Existem ainda outros procedimentos que buscam amenizar os danos causados pela socaria. O *stoneblowing*, por exemplo, consiste na aplicação de brita em granulometria que varia entre 14 a 20 mm no espaço formado entre a superfície do lastro e a face inferior dos dormentes quando a grade é levantada até a posição geométrica adequada, o que evita que o lastro compactado seja afrouxado pela banca de socaria (SOL-SÁNCHEZ *et al.*, 2017). Destaca-se ainda o equipamento conhecido como *dynamic track stabilization* (DTS), que emprega processo vibratório durante a socaria tradicional possibilitando a acomodação controlada do lastro, evitando a elevada compactação que ocorre durante a passagem das primeiras composições ferroviárias após a execução do serviço (SOL-SÁNCHEZ e D'ANGELO, 2017). A Figura 2.20 apresenta o DTS presente em uma socadora automática de via.

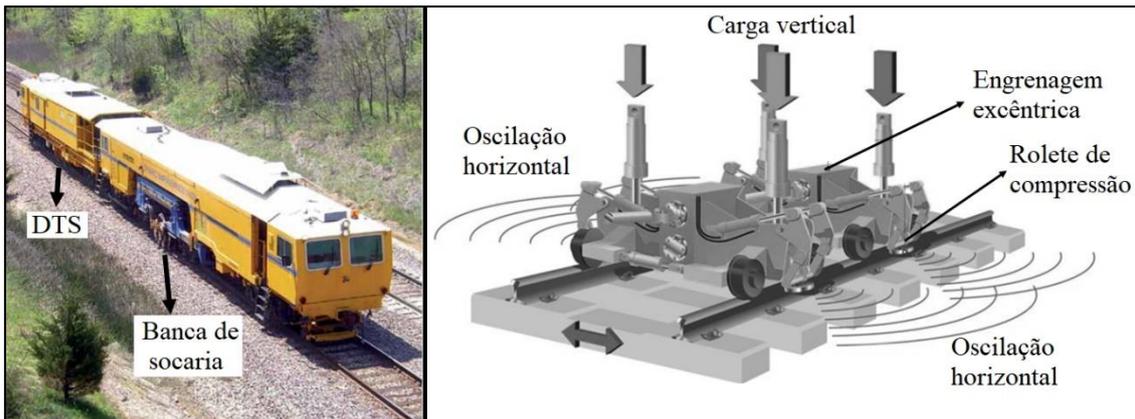


Figura 2.20: À esquerda – socadora de via com vagão de estabilização dinâmica (DTS). À direita – equipamento DTS.

Fonte: adaptado de Plasser do Brasil (2023a) e Plasser do Brasil (2023b).

Nesse contexto, destaca-se o fenômeno conhecido como memória da via, em que a geometria após a socaria tende a retornar à posição inicial. Este comportamento pode ser observado particularmente quando na socaria são aplicados levantes de pequena dimensão. Se a altura de elevação da grade é inferior a 20 mm, não ocorre a introdução de novos grãos de brita na área de influência das ferramentas de socaria. A Figura 2.21 demonstra que o levante tem efeito permanente durante a socaria se os valores forem maiores que 15 a 20 mm. Isso significa que se a via for levantada 15 mm, ela assentará 15 mm com o tempo. Se, em vez disso, a via sofrer levante de 40 mm, a via ainda continuará a sofrer acomodação em torno de 15 mm, porém os 25 mm remanescentes permanecerão como uma correção mais duradoura (LICHTBERGER, 2005).

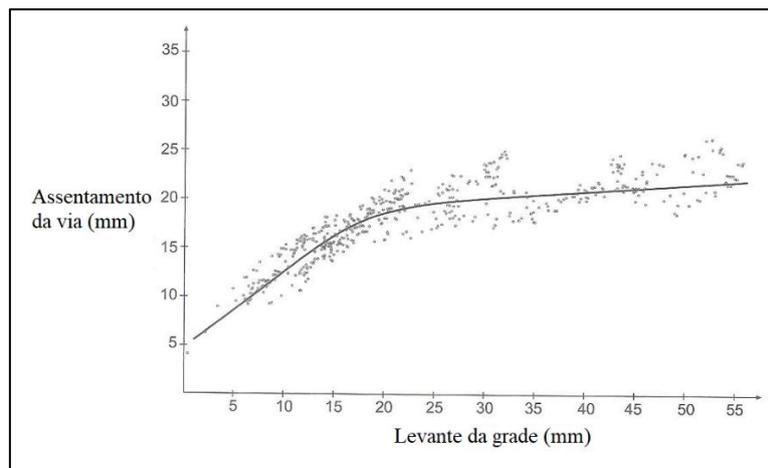


Figura 2.21: Assentamento da grade em função da altura de levante.

Fonte: Lichtberger (2005).

A renovação da via consiste na substituição dos componentes, sendo esta operação tão mais complexa quanto maior o conjunto dos componentes a serem substituídos. O que determina o tipo de abordagem nesse caso são as estratégias administrativas adotadas pelas empresas, bem como a vida útil de cada componente, já que diferenças consideráveis entre os itens tornam antieconômica a substituição de todos ao mesmo tempo pelo desperdício da serventia potencial dos componentes.

As alternativas tecnológicas para execução das renovações são variadas, sendo muito utilizadas operações completamente manuais para substituição de dormentes de madeira, substituição ou reaperto do sistema de fixação dos dormentes e das talas de junção e solda entre barras de trilhos na via. Sistemas automatizados também estão disponíveis para realização de praticamente todas as operações que envolvem a substituição de trilhos, dormentes, fixações e lastro, isoladamente ou em conjunto. A Figura 2.22 apresenta equipamento que realiza a renovação conjunta da grade com desguarnecimento de parte do lastro.



Figura 2.22: Renovadora automática de via. À esquerda – imagem que demonstra as dimensões do equipamento. À direita – ponto de renovação onde é visto o assentamento de novos dormentes e as barras de trilho nova e velha emparelhadas.

Fonte: Plasser&Theurer (2023b).

Os serviços de renovação, principalmente quando feita a substituição conjunta de componentes, possuem influência sobre o comportamento da via ao longo do tempo. Segundo Rodrigues (2001) e Lichtberger (2005) o perfil de degradação geométrica está diretamente atrelado à qualidade inicial alcançada durante a instalação da via, sendo que a taxa de evolução das deformações tende a ser menor quando a qualidade inicial é maior. O serviço de socaria busca alcançar a máxima qualidade geométrica possível, sem, contudo, ser capaz de alterar a taxa de deterioração geométrica. Portanto, se no momento da renovação/remodelação, e até mesmo no desguarnecimento do lastro, a qualidade

alcançada não for elevada, essa seção da via apresentará uma espécie de comportamento “congenito”, que não será alterado mesmo por uma ótima socaria. Nesse sentido, vias com elevada qualidade podem ter ciclos de manutenção mais longos, conseqüentemente, sendo mais econômicas (LICHTBERGER, 2005).

2.5 Conclusões do Capítulo

A disposição dos componentes que formam a superestrutura possibilita um plano de rolamento estável e ao mesmo tempo flexível, permitindo o amortecimento das forças. O lastro tem especial relevância nesse contexto já que é o elemento elástico do sistema, e sua degradação física tem implicações sobre a degradação geométrica.

O planejamento das manutenções está amparado na prospecção de suas condições, bem como na comparação das deformações às tolerâncias de referência. A instrumentação de veículos de circulação comum mediante uso de acelerômetros, é opção viável para aferição das condições da via e da segurança operacional, sobretudo devido à facilidade de instalação e custo reduzido.

Praticamente todas as manutenções podem ser feitas de forma automática por meio de equipamentos dedicados, o que possibilita produtividade elevada, mas também envolve o deslocamento das máquinas pela via o que pode prejudicar o tráfego, gerando penalidades financeiras pelo atraso na circulação dos trens.

A via permanente forma o plano de rolamento dos veículos, assim torna-se relevante analisar como suas características e degradação podem afetar o comportamento do veículo durante deslocamento, tendo em vista as possíveis implicações sobre o equilíbrio dinâmico e sobre a forma como a própria via é solicitada. Esses aspectos foram explorados no próximo capítulo.

3. FORÇAS DINÂMICAS

Esse capítulo se propôs a reunir conceitos sobre a dinâmica veicular que permitam confirmar a adequabilidade da abordagem adotada para avaliação da segurança operacional sob critério dinâmico, bem como a relação entre a geometria e a degradação física dos componentes da via permanente.

3.1 Forças às Quais a Via Permanente Está Submetida e Sua Relação com a Geometria

A via permanente está submetida a forças que podem se desenvolver em três direções em relação ao seu eixo, como mostrado na Figura 3.1.

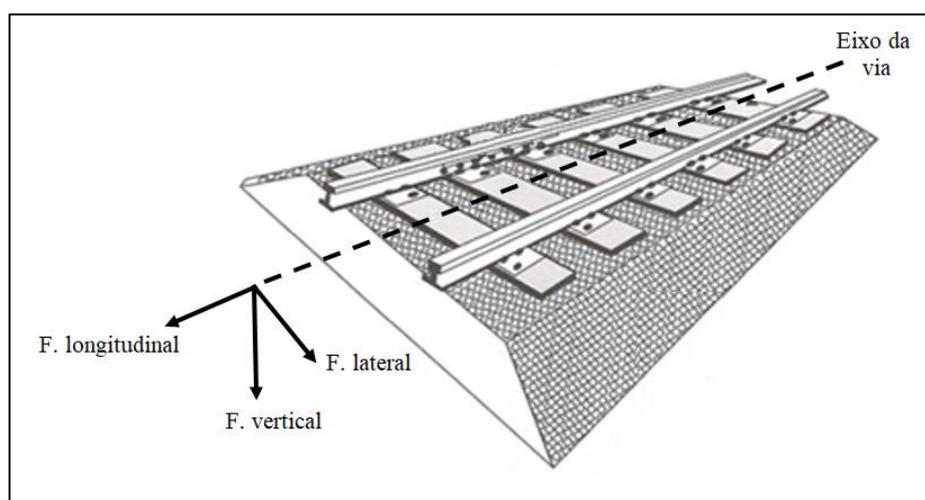


Figura 3.1: Forças (F.) atuantes na via permanente.

Fonte: Adaptado de Steffler (2013).

No sentido longitudinal desenvolvem-se tensões oriundas das frenagens e acelerações dos veículos, pelas deformações em forma de onda geradas pela passagem dos rodeiros (*rail creeping*), e devido às alterações dimensionais dos trilhos em consequência da variação térmica. As forças laterais se desenvolvem, sobretudo, nas curvas, representadas pela força centrífuga que incide nos trilhos externos nessa seção planimétrica. Finalmente, a via permanente é solicitada verticalmente pela carga (força peso) dos veículos (LICHTBERGER, 2005; SEMPREBONE, 2006; PAIVA, 2016).

Estando o material rodante estacionado, apenas a componente vertical desse conjunto de forças faz-se presente, sendo sua magnitude sobre o trilho igual à metade do

peso estático por eixo. Os esforços para movimentação dos veículos e a interação com a via, principalmente nas curvas, além de originar as forças laterais e longitudinais, induzem o incremento das cargas verticais, que passam a ser denominadas forças (ou cargas) dinâmicas (SEMPREBONE, 2006), e cuja magnitude é influenciada pelas características do veículo e de sua operação, pelo peso por eixo, aspectos do sistema de suspensão, base rígida e *design* do truque, velocidade operacional, e pelas características da via, como superelevação prática e raio de curvas (LICHTBERGER, 2005; PAIVA, 2016).

Por serem, em sua maioria, fatores constantes, cujos valores são estabelecidos mediante as demandas operacionais e de projeto do trecho ferroviário, em condições ideais as forças dinâmicas apresentariam magnitude aproximadamente constante durante o deslocamento dos veículos, desenvolvendo-se sob um regime conhecido como quase-estático (KAEWUNRUEN e REMENNIKOV, 2010). Entretanto, a presença de irregularidades na interação entre os veículos e a via resulta em desequilíbrio dessas forças. A Figura 3.2 ilustra os três perfis descritos.

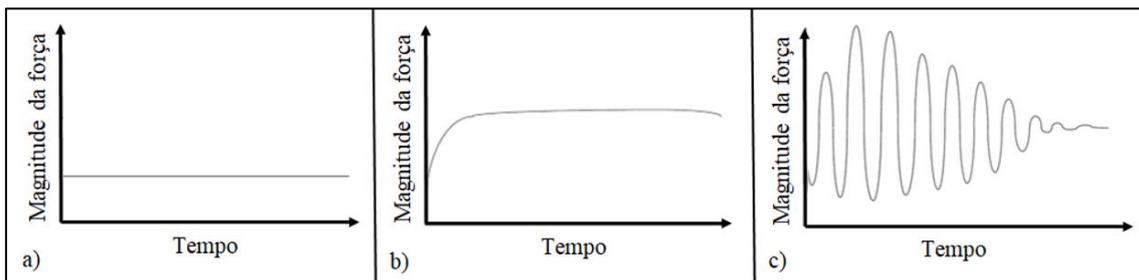


Figura 3.2: Perfil das forças verticais que solicitam a via permanente: (a) estáticas, (b) dinâmicas ou quase-estáticas, e (c) dinâmicas desequilibradas.

Fonte: Adaptado de Remennikov e Kaewunruen (2008).

Dentre os fatores de indução de desequilíbrios podem ser citados aspectos de excitação externa, como condições aerodinâmicas e a incidência de vento na lateral dos veículos (CONSOLI, 2007; PAIVA, 2016). Contudo, destacam-se aspectos diretamente relacionados à interface roda – trilho, tais como alterações na rigidez estrutural da via, observadas, por exemplo, em regiões de transição de pontes e túneis, que resultam em diferentes padrões de deformação dos trilhos sob carga (NIMBALKAR *et al.*, 2012); partes planas (*flats*) e calosidades em rodas; juntas e soldas desniveladas ou com protuberâncias na face superior do boleto; ondulações nos trilhos decorrentes de fadiga

ou desgaste (CONSOLI, 2007; NIMBALKAR *et al.*, 2012; KAEWUNRUEN *et al.*, 2018).

Por meio da Figura 3.3, Salvador *et al.* (2016) mostram como irregularidades e até características construtivas da própria via se traduzem em vibrações nos veículos, e, com a Figura 3.4, esses mesmos autores ilustram a sensibilidade do contexto, apresentando o *squat* (depressão na superfície superior do bolete) que originou as vibrações destacadas na figura precedente.

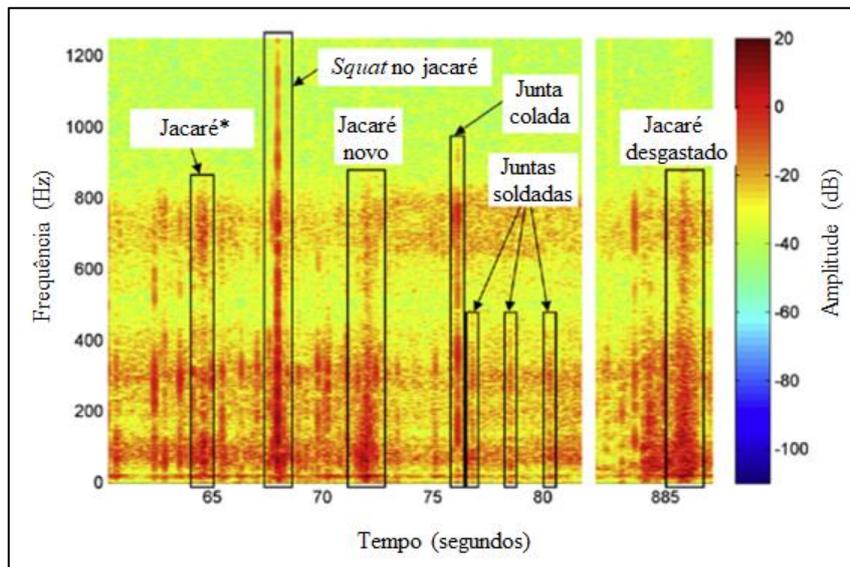


Figura 3.3: Espectrograma mostrando diferentes singularidades da via. Velocidade de 35 km/h.

* Jacaré: termo comumente empregado para designar a peça constituinte do AMV responsável pelo cruzamento de trilhos.

Fonte: Salvador *et al.* (2016).

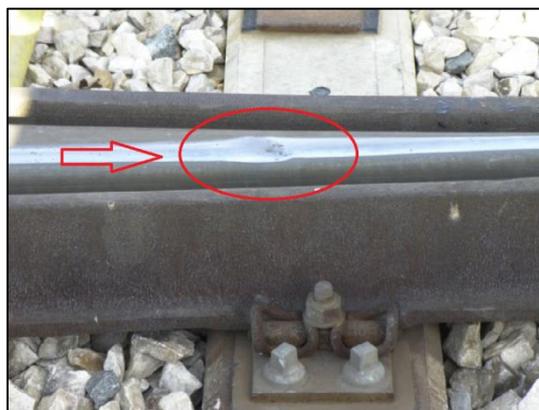


Figura 3.4: *Squat* em AMV.

Fonte: Salvador *et al.* (2016).

O deslocamento da roda com velocidade v (m/s) sobre irregularidade no trilho com perfil senoidal de comprimento de onda λ (m), gera aceleração do veículo em relação à via permanente, com frequência de excitação f (Hz), obtida pela Equação 1 (REMENNIKOV e KAEWUNRUEN, 2008).

$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

Consoli (2007), Nimbalkar *et al.* (2012) e Kaewunruen *et al.* (2018) destacam que o estado no qual se encontra a geometria da via permanente também possui implicações sobre o equilíbrio dos veículos durante deslocamento, tendo em vista que o processo de degradação geométrica resulta na deformação do plano de rolamento. Nesse tocante, Weston *et al.* (2015) destaca que as acelerações que os veículos adquirem em relação à via permanente são proporcionais ao quadrado da velocidade longitudinal, proporcional à amplitude da deformação geométrica e inversamente proporcional ao quadrado do comprimento da onda formada pela deformação.

Os principais movimentos anômalos desenvolvidos pelos veículos em função da condição geométrica são descritos na Figura 3.5.

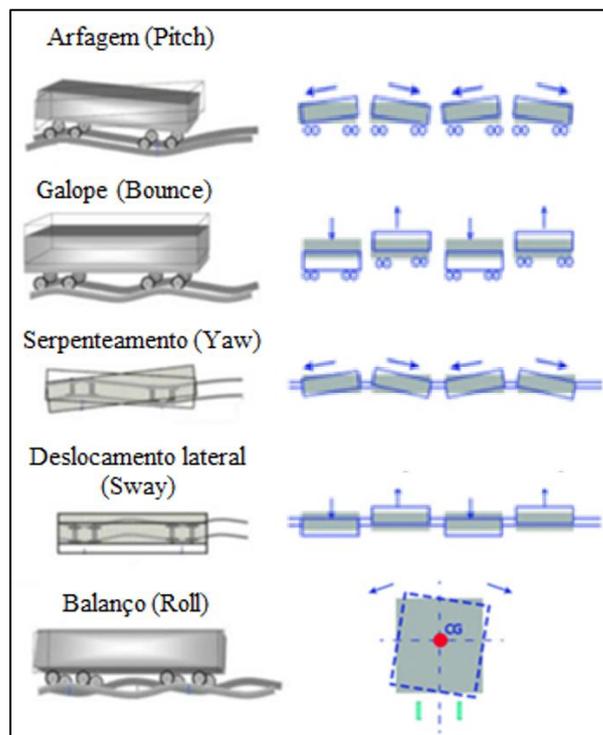


Figura 3.5: Movimentos dinâmicos dos veículos ferroviários.

Fonte: Adaptado de Iwnicki (2006) *apud* Lima (2019).

A Tabela 4 apresenta a relação entre os movimentos apresentados e o parâmetro geométrico mais preponderante para o seu desenvolvimento.

Tabela 4: Influência da geometria da via nos movimentos dinâmicos

Movimento	Descrição	Parâmetro geométrico condicionante
Arfagem (<i>Pitch</i>)	Alternância entre a sobrecarga e o alívio das extremidades da caixa do veículo.	Nivelamento Longitudinal
Galope (<i>Bounce</i>)	As molas dos truques dianteiro e traseiro são comprimidas ao mesmo tempo ocasionando trepidação e sobrecarga em todos os eixos.	Nivelamento Longitudinal
Serpenteamento (<i>Yaw</i>)	As extremidades da caixa se locomovem opostas transversalmente eventualmente ocasionando o choque entre o friso das rodas e os trilhos.	Alinhamento
Deslocamento lateral (<i>Sway</i>)	movimentação da caixa do veículo em sentido perpendicular à via.	Alinhamento
Balanço (<i>Roll</i>)	Movimento no sentido perpendicular à via, sobrecarregando ora as rodas de um lado do veículo, ora as rodas do outro lado.	Nivelamento Longitudinal

Fonte: Iwnicki (2006) *apud* Lima (2019).

Soma-se a estes o movimento de *lacet* (ou *hunting*), cujas características são descritas na Figura 3.6.

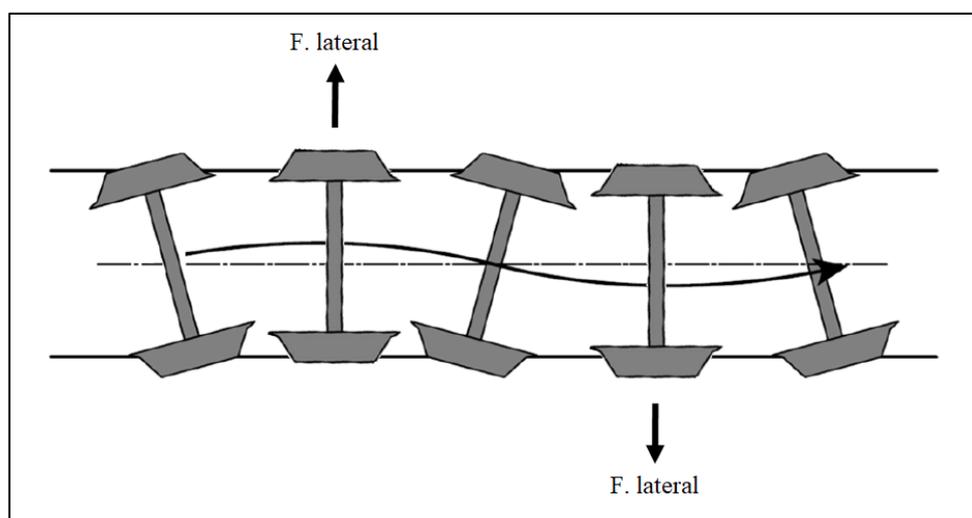


Figura 3.6: Movimento de *Lacet* ou *hunting* com destaque para as forças (F.) laterais.

Fonte: Modificado a partir de Di Luccio (2016) e Lima (2019).

Segundo Ferreira (2010), a experiência indica que todos os parâmetros geométricos possuem influência sobre o comportamento do veículo sobre a via, sobretudo quando existem defeitos geométricos combinados.

Ratton Neto (1985) analisou o efeito da degradação geométrica sobre as acelerações que o material rodante adquire em relação à via permanente. Seus estudos indicam que a dinâmica veicular é função do conjunto das deformações, sendo que o desequilíbrio do veículo durante deslocamento não é causado por defeitos isolados dos parâmetros geométricos, mas trata-se de uma reação do veículo às alterações dos diversos parâmetros geométricos que coexistem em um mesmo ponto.

Empregando técnicas de regressão, o referido autor formulou modelos de correspondência entre a geometria e as acelerações do veículo em relação à via, tendo considerado que as acelerações verticais são função da amplitude, em valores absolutos, das deformações dos parâmetros nivelamento longitudinal, torção e nivelamento transversal, além da velocidade de deslocamento dos veículos, e as acelerações horizontais são função do alinhamento, torção, nivelamento transversal, e da velocidade operacional. Os modelos em questão fazem parte de um método de planejamento de manutenções cujos resultados de sua aplicação demonstraram que à medida que a amplitude da degradação dos parâmetros aumentou em consequência da diminuição da frequência de manutenções, as acelerações resultantes dos veículos também aumentaram.

Lima (2019) analisou a necessidade de complementar o planejamento de manutenções geométricas com dados de inspeções dinâmicas. A partir de um estudo empírico, o autor observou que veículos desenvolveram acelerações em relação à via em patamares inseguros em seções ferroviárias que não apresentavam parâmetros geométricos com deformações em amplitude acima das tolerâncias de segurança. O referido autor concluiu que tais movimentos foram uma consequência do conjunto das deformações dos diversos parâmetros geométricos.

Tayal (2013) afirma que o equilíbrio dos veículos durante deslocamento também é afetado pela homogeneidade das deformações geométricas ao longo do trecho ferroviário. Segundo o autor, se a amplitude das deformações de um parâmetro geométrico variar ao longo de pontos sucessivos da via, a qualidade de deslocamento será prejudicada em decorrência dessa heterogeneidade, levando ao desequilíbrio do veículo. Por outro lado, se a deformação do parâmetro geométrico se apresentar de forma uniforme ao longo de pontos sucessivos, mesmo que em maior amplitude do que na situação anterior, o deslocamento do veículo ocorrerá de maneira mais equilibrada.

A Tabela 5 apresenta a relação entre a resposta dinâmica dos veículos e os parâmetros geométricos responsáveis por induzi-la.

Tabela 5: Relação entre os parâmetros geométricos da via e a resposta dinâmica dos veículos

Resposta dinâmica do veículo	Parâmetro geométrico				
	Bitola	Nivelamento longitudinal	Nivelamento transversal	Alinhamento	Empeno
Forças laterais	x		x	x	x
Forças verticais		x	x	x	x
Aceleração lateral			x	x	x
Aceleração vertical		x			
Forças laterais e verticais combinadas	x	x	x	x	x

Fonte: EN 13848 (2003) *apud* Ferreira (2010).

Os movimentos anômalos (desequilibrados) dos veículos, que se traduzem em vibrações e acelerações, levam à alteração do padrão de carregamento da via ao longo do tempo, e assim, ao invés de forças aproximadamente constantes, ocorrem sobrecargas e alívios das forças dinâmicas (LICHBERGER, 2005; SPIROIU, 2016). As movimentações verticais induzidas pelos desnivelamentos geométricos geram sobrepressões no trilho mais baixo e subpressões no trilho mais alto, enquanto que os movimentos laterais causados, sobretudo, pelos desalinhamentos e o *Hunting*, promovem o desenvolvimento de sobrecargas transversais (STEFFLER, 2013). A próxima seção descreve a magnitude dessas forças.

3.2 Magnitude das Forças Dinâmicas

O incremento das forças estáticas dando origem às dinâmicas há muito é conhecido e estudado, sobretudo devido à sua relevância no projeto da via permanente, já que, por resultarem em solicitações mecânicas mais severas do que as cargas estáticas, requerem que a infra e a superestrutura sejam dimensionadas para suportá-las (REMENNIKOV e KAEWUNRUEN, 2008).

Normalmente a magnitude das forças dinâmicas é estimada por meio de um fator de majoração aplicado à carga estática, como representado pela Equação 2.

$$P_D = \phi P_0 \quad (2)$$

Onde

P_D é o peso/eixo de projeto;

P_0 é o peso/eixo estático do veículo mais pesado previsto;

ϕ é o fator de impacto dinâmico ($> 1,0$).

Diversos autores apresentaram equações para estimação do fator de impacto. Schramm, por exemplo, desenvolveu a Equação 3, em que ϕ é determinado em função da velocidade de operação dos veículos (V em km/h) no trecho ferroviário sob análise (SEMPREBONE, 2006).

$$\phi = 1 + \frac{4,5V^2}{100.000} - \frac{1,5V^3}{10.000.000} \quad (3)$$

Eisenmann, por outro lado, recomenda a Equação 4 (RATTON NETO, 2017a):

$$\phi = 1 + t s \quad (4)$$

Onde

t é o coeficiente de confiabilidade relativo ao risco operacional e que varia conforme:

$t = 1$ para confiabilidade de 68,3%;

$t = 2$ para confiabilidade de 95,4%;

$t = 3$ para confiabilidade de 99,7%;

s é o coeficiente de qualidade da via, que pode assumir:

$s = 0,1\sigma$ para superestrutura excelente;

$s = 0,2\sigma$ para superestrutura razoável;

$s = 0,3\sigma$ para superestrutura ruim;

Sendo que para velocidades $V \leq 60$ km/h recomenda-se $\sigma = 1$ e em velocidades $60 \text{ km/h} \leq V \leq 140$ km/h é recomendado $\sigma = 1 + (V - 60)/140$.

Dado o número e variedade, a Tabela 6 compila outras equações destinadas à obtenção de coeficientes de majoração dinâmica.

Tabela 6: Formulações para o cálculo de fatores de impacto dinâmico

Modelo	Fator dinâmico	Variáveis
Talbot	$\phi = 1 + \frac{5,21V}{D}$	V : Velocidade (km/h); D : Diâmetro da roda (mm);
Talbot ₂	$\phi^* = 1 + 0,0062(V - 8)$ $\phi^{**} = 1 + 0,0062(V - 8)f_i$	U : Módulo de via (MPa); η : Dependente da velocidade do veículo;
Ferrovias indianas	$\phi = 1 + \frac{V}{58,14U^{0,5}}$	α : Dependente da classe da ferrovia, da suspensão e da velocidade;
Ferrovias indianas ₂	$\phi = 1 + \left(\frac{0,017V}{\sqrt{u}}\right)$	β : Dependente do peso/roda em curvas;
Ferrovias inglesas	$\phi = 1 + \frac{8,784(\alpha_1 + \alpha_2)V \left[\frac{D_j + P_u}{g}\right]^{0,5}}{P_s}$	γ : Dependente da velocidade, idade da via, possibilidade de dormente sem apoio, design do veículo, condições de manutenção da locomotiva;
África do Sul	$\phi = 1 + 4,92 \frac{V}{D}$	$\alpha_1 + \alpha_2$: ângulo total do desnivelamento de juntas (rad);
Clarke	$\phi = 1 + \frac{19,65V}{D\sqrt{U}}$	D_j : Rigidez da via nas juntas (kN/mm);
WMMTA	$\phi = 1 + (1 + 3,86 \cdot 10^{-5}V^2)^{\frac{2}{3}}$	P_s : Peso/roda estático (kN);
Sadegui	$\phi = 1,098 + 8 \cdot 10^{-4}V + 10^{-6}V^2$	P_u : peso não suspenso de uma roda (kN); g : aceleração da gravidade (m/s ²);
China	$\phi = (1 + \eta + \beta)f (V \leq 200)$ $\phi = 2,5 (200 < V \leq 250)$ $\phi = 3,0 (250 < V)$	f : coeficiente de força transversal dependente do raio da curva; D_1 : Diâmetro da roda (em cm);
AREA (Driessen)	$\phi = 1 + \frac{V^2}{30.000}$	D_2 : Diâmetro da roda (em polegadas);
AREA	$\phi = 1 + \left(\frac{33V}{100D_2}\right)$	a : Coeficiente que varia em função da rigidez da via: <ul style="list-style-type: none"> $a = 1,3 (V \leq 140 \text{ km/h})$; $a = 1,2 (140 \text{ km/h} < V \leq 200 \text{ km/h})$;
AREMA	$\phi = 1,237 \left(\frac{V}{D_2}\right)^{0,243}$	b : Coeficiente que varia em função do desempenho dos veículos: <ul style="list-style-type: none"> $b = 2$ (locomotivas com $V \leq 140 \text{ km/h}$); $b = 1,5$ (locomotivas com $140 \text{ km/h} < V \leq 200 \text{ km/h}$);
AAR	$\phi = 1 + 0,209 \frac{V}{D_1}$	
RFFSA	$\phi = 1 + \frac{V^2}{60.000}$	
ORE	$\phi = 1 + \alpha + \beta + \gamma$	* Aplicável apenas à material rodante com rodas de 33 polegadas de diâmetro;
ORE D-71	$\phi = 1 + a b \left[0,1 + 0,017 \left(\frac{V}{100}\right)^3\right] + 0,4 \left(\frac{V}{100}\right)^3$	** Para rodas com diâmetro maior que 33 polegadas considera-se o fator f_i obtido entre a área de contato da roda de 33 polegadas e a área da roda com diâmetro diferente; u : módulo de elasticidade da via (MN/mm ²).

Fonte: adaptado de Semprebone (2006), Silva Filho (2013), Rattón Neto (2017a) e Ruilin *et al.* (2017).

Esses modelos são apresentados na literatura como ferramentas para o estabelecimento da carga máxima a ser adotada no dimensionamento da via permanente, contudo, a maioria deles (com exceção dos modelos de Eisenmann e ORE), não consideram fatores relativos à condição de conservação da via. Ratton Neto (1985), Pombo *et al.* (2011) e Lima (2019) frisam que a condição geométrica pode provocar o surgimento de forças dinâmicas elevadas, que podem, inclusive, ultrapassar os limites previstos em projeto.

Ruilin *et al.* (2017) mediram forças dinâmicas resultantes da passagem de composições ferroviárias em uma linha australiana em North Queensland, com peso/eixo estático máximo de 28 toneladas (aproximadamente 140 kN/roda). A Figura 3.7 compila os resultados obtidos pelos autores.

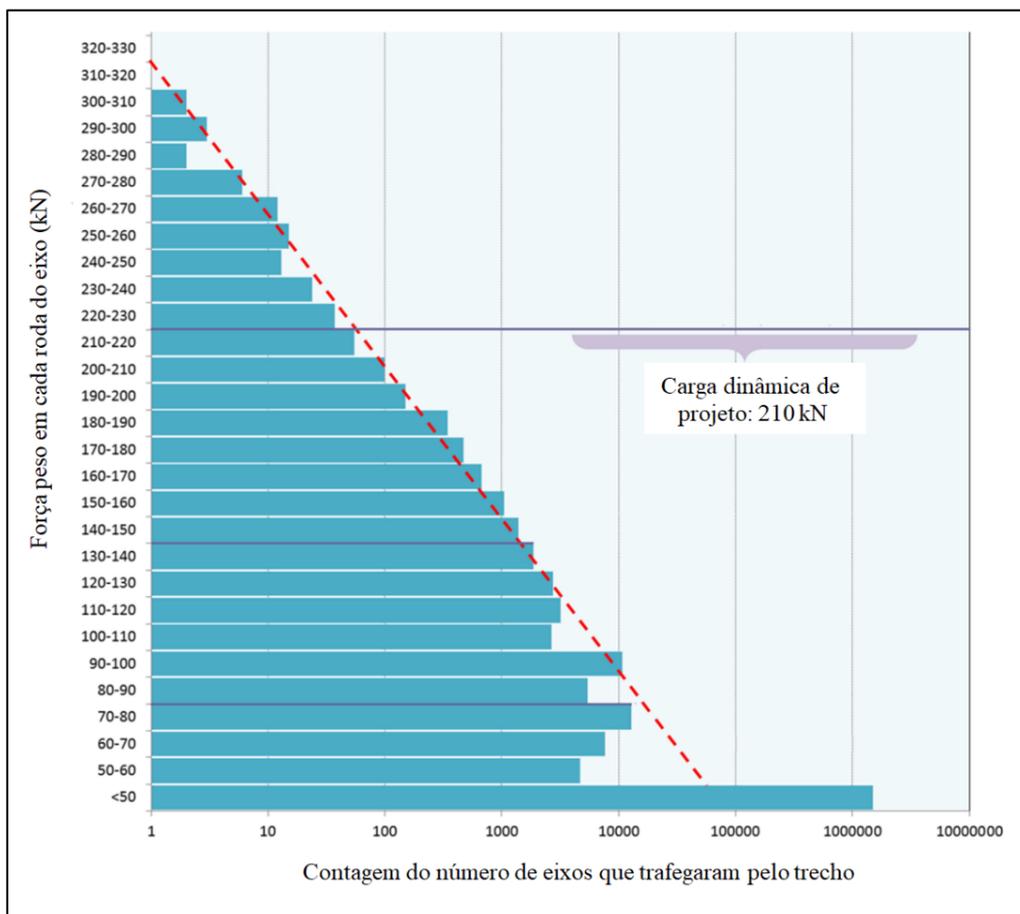


Figura 3.7: Forças dinâmicas medidas na via permanente em North Queensland.

Fonte: Ruilin *et al.* (2017).

A figura indica prevalência de forças que não ultrapassaram 140 kN/roda, oriundas, provavelmente, de veículos com cargas mais leves ou vazios. Também foi

significativa a quantidade de solicitações abaixo do limite dinâmico previsto em projeto. Contudo, destacam-se as ocorrências em magnitude mais elevada, sendo que o pico atingindo foi de 310 kN, valor cerca de 47% maior do que a carga máxima prevista. Também foram registrados diversos carregamentos em magnitude intermediária entre o pico e o valor de 210 kN, o que demonstra que a via foi solicitada agudamente por diversas vezes.

Anormalidades geradoras de impactos dinâmicos podem estar presentes tanto nas rodas quanto na via. Nas rodas, os defeitos de maior relevância são os *flats* (GULLERS *et al.*, 2008; NGAMKHANDONG *et al.*, 2018) e o desgaste natural da superfície de rolamento (ZHAI *et al.*, 2015).

No que concerne à via, a primeira irregularidade de relevância é a presença de defeitos na superfície de rolamento dos trilhos. Em medições realizadas na linha sueca que liga Estocolmo a Gotemburgo, Gullers *et al.* (2008) monitoraram uma junta comum com talas que apresentava deformação superficial causada por fadiga. As características do defeito e as forças dinâmicas por ele induzidas são apresentadas nas Figuras 3.8 e 3.9, respectivamente.



Figura 3.8: Junta defeituosa.

Fonte: Gullers *et al.* (2008).

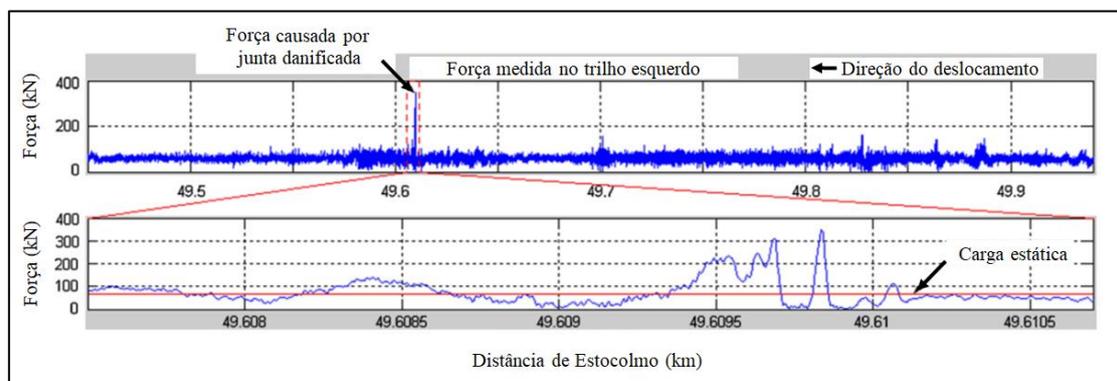


Figura 3.9: Forças dinâmicas medidas em região de junta danificada.

Fonte: Gullers *et al.* (2008).

Sobre a deformação as forças se reduzem a zero, o que denota perda de contato entre a roda e o trilho. Em seguida ocorre o pico de carregamento que atinge cerca de 350 kN, sendo que nesse trecho a força estática era de 60 kN. Posteriormente, o fenômeno se repete, com o registro de mais uma perda de contato seguida por sobrecarga. Finalmente, ocorre oscilação das forças em amplitude decrescente, indicando a estabilização do sistema. Esse tipo de comportamento também é descrito por Remennikov e Kaewunruen (2008) que, por meio de simulação, estimaram pico de força de aproximadamente 400 kN em decorrência de junta desnivelada, com veículos trafegando em velocidade de 250 km/h e força estática de cerca de 80 kN. Molodova e Dollevoet (2011) monitoraram uma solda defeituosa caracterizada por desnível com extensão de aproximadamente um metro e profundidade máxima de 0,45 mm, que levou ao desenvolvimento de acelerações do veículo em relação à via de cerca de 70 m/s².

Ondulações (ou corrugações) nos trilhos são defeitos que geram alto impacto dinâmico (REMENNIKOV e KAEWUNRUEN, 2008). Na linha ferroviária estudada por Gullers *et al.* (2008), foi monitorado um segmento com ondulações de dimensões variando entre 3 e 8 cm de comprimento (Figura 3.10). A Figura 3.11 apresenta as forças medidas nesse local que alcançaram picos de, aproximadamente, 150 kN.



Figura 3.10: Ondulação em trilho verificada no trecho estudado por Gullers *et al.* (2008).

Fonte: Gullers *et al.* (2008).

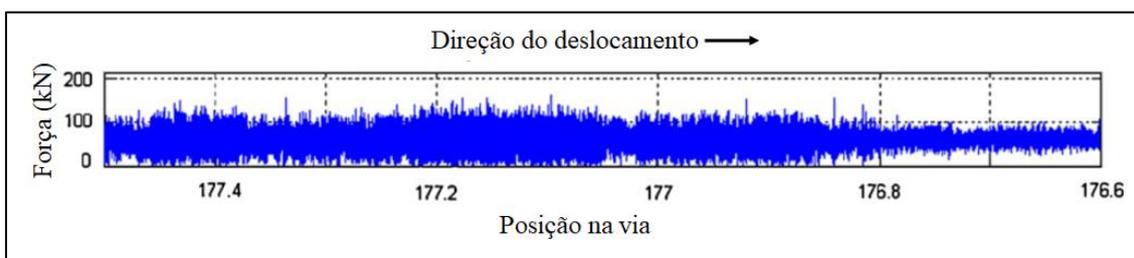


Figura 3.11: Forças dinâmicas geradas por ondulações na via estudada por Gullers *et al.* (2008).

Fonte: Gullers *et al.* (2008).

Remennikov e Kaewunruen (2008) apresentam resultados de medições da dinâmica veicular feitas em um trecho da ferrovia Shinkansen (japonesa), em que foi observado, em consequência de corrugações nos trilhos, acelerações com pico de 54,3g que resultou em força dinâmica de cerca de 535kN. Esses autores também apresentam resultados de simulações feitas em ondulações com padrão senoidal, com 250 mm de comprimento e 0,8 mm de profundidade, que demonstram incrementos dinâmicos significativos, com forças estáticas da ordem de 150 kN saltando para cerca de 400 kN.

Por fim, como critério de comparação, Gullers *et al.* (2008) apresentam as forças geradas em uma seção de via de alta qualidade no trecho ferroviário por eles estudado. Os valores apresentados na Figura 3.12 indicam pequena variação das forças, de amplitude não superior a ± 20 kN em torno da força estática de 60 kN/roda.

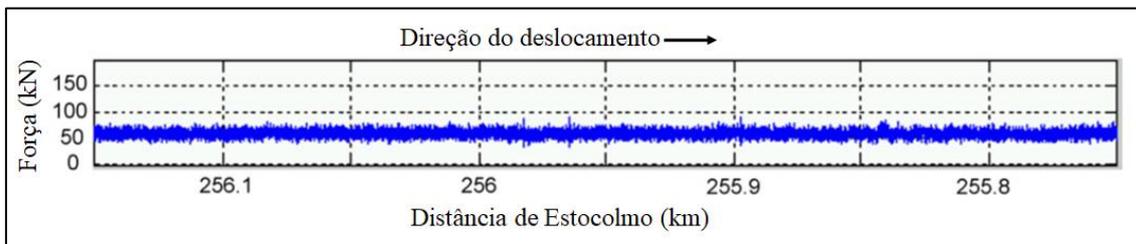


Figura 3.12: Forças medidas em trecho de alta qualidade.

Fonte: Gullers *et al.* (2008).

3.3 Segurança Operacional

Existem quatro situações potencialmente perigosas para a segurança operacional cuja ocorrência está condicionada ao desequilíbrio das forças atuantes no veículo e sobre a via.

A primeira delas diz respeito ao alargamento da bitola mediante deflexão dos trilhos (Figura 3.13), que pode ocorrer mediante aplicação de força lateral acima do limite de resistência das fixações. A separação entre a caixa do veículo e o truque, e a perda de contato entre a roda, ou o rodeiro, e os trilhos, são movimentos que podem estar associados à alívios severos da força vertical (Figura 3.14). A escalada do flange sobre a lateral do boleto, eventualmente resultando na subida completa da roda sobre o trilho (Figura 3.15) e seu direcionamento para o lado externo na via, materializando o descarrilamento, é o quarto modo de acidente.

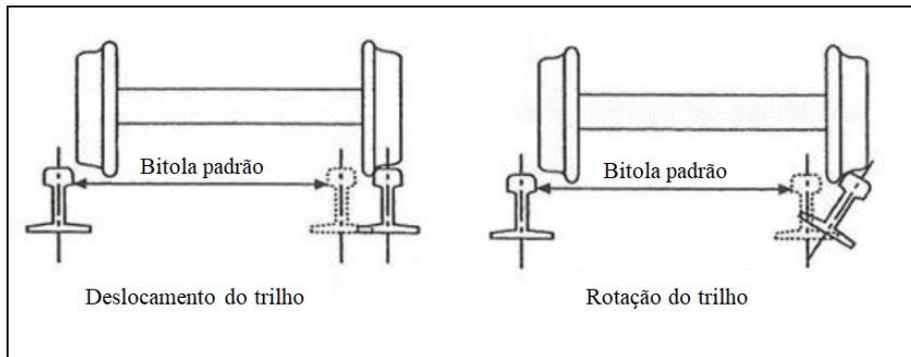


Figura 3.13: Alargamento de bitola por deflexão do trilho.

Fonte: Adaptado de Di Luccio (2016).

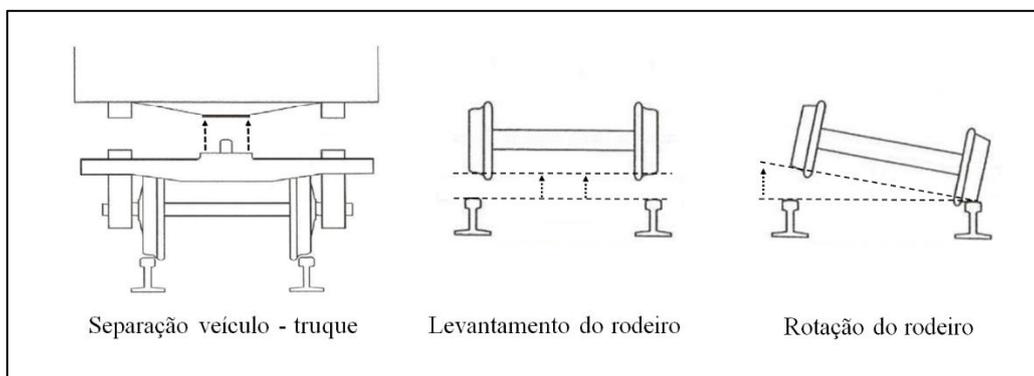


Figura 3.14: Modos de descarrilamento por alívio agudo de forças verticais.

Fonte: Adaptado de Di Luccio (2016).

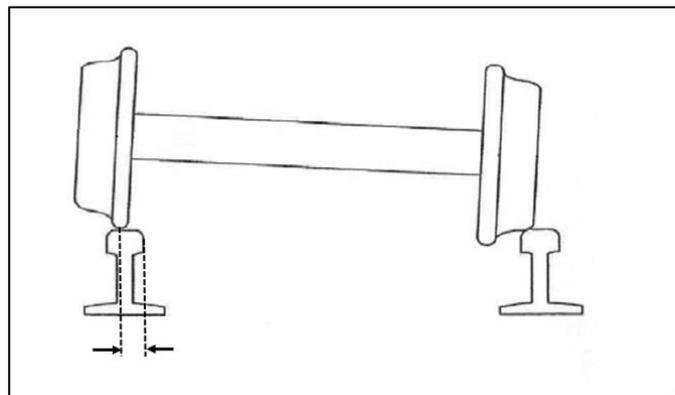


Figura 3.15: Escalada do flange em situação de iminente descarrilamento.

Fonte: Adaptado de Di Luccio (2016).

Desde o Século XIX se tem clareza que as forças relativas dos veículos em relação à via são perigosas caso adquiram determinadas características. Um dos modelos de avaliação da segurança operacional mais consolidado nesse âmbito é o definido por Nadal, baseado na avaliação das forças laterais (L) e cargas verticais (V) aplicadas pela

roda sobre o trilho, identificadas na Figura 3.16. Seu desenvolvimento se dá mediante uso da Equação 5, que estabelece valor limite para a iminente subida do flange sobre o boleto, chamado L/V crítico (RATTON NETO, 1985; COSTA, 2016; LIMA, 2019).

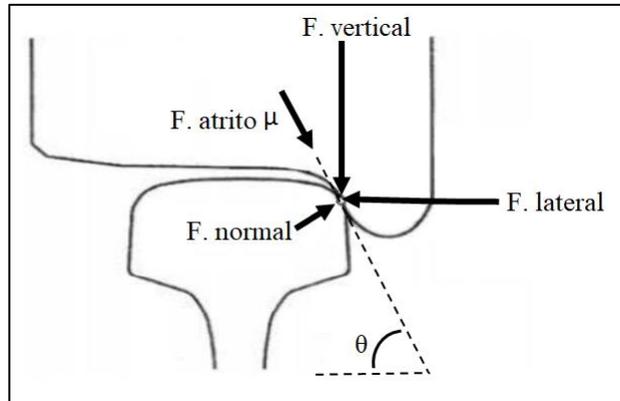


Figura 3.16: Forças no contato roda – trilho.

Fonte: Adaptado de Lima (2019).

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan\theta - \mu}{1 + \mu \tan\theta} \quad (5)$$

Onde

L é a força lateral no friso da roda;

V é a carga vertical atuante na roda;

θ é o ângulo da face de contato entre a roda e o trilho;

μ é o coeficiente de atrito entre a lateral do trilho e o friso da roda.

O gráfico a seguir (Figura 3.17) exemplifica alguns valores que a relação L/V pode adquirir em função da variação do ângulo de contato entre a roda e o trilho (θ), e para coeficientes de atrito entre 0,1 e 1,0.

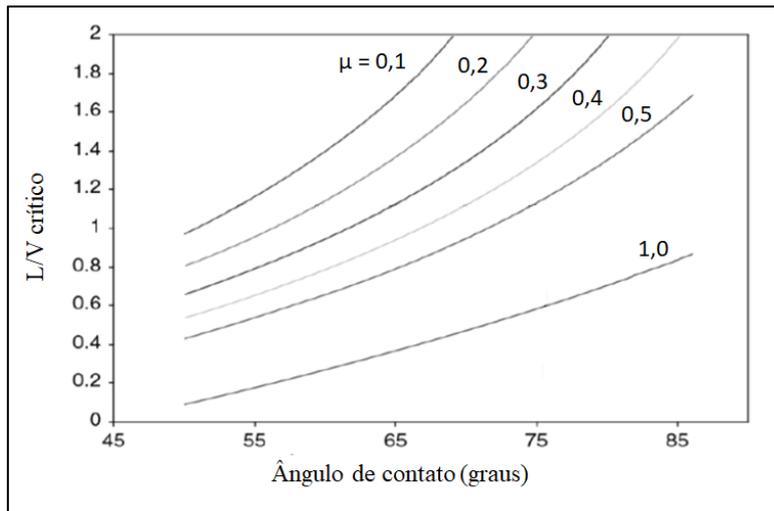


Figura 3.17: Variação do L/V crítico em função do ângulo e do coeficiente de atrito entre a roda e o trilho.

Fonte: Lima (2019).

O descarrilamento por escalada do flange se desenvolve, normalmente, quando a roda está sob influência de elevada força lateral em combinação com reduções das cargas verticais (LIMA, 2019).

A elevação do limite L/V crítico pode ser obtida mediante lubrificação da parte interna do boleto (face de bitola), que proporciona redução do coeficiente de atrito, bem como pela manutenção dos perfis do boleto e da roda, pois o seu desgaste leva à redução do ângulo de contato, o que implica na redução dos limites L/V (COSTA, 2016).

Fatores não observados por Nadal influenciam a relação L/V, tais como o ângulo de ataque da roda em relação ao trilho (descrito na Figura 3.18), a elasticidade da via e a própria suspensão dos veículos. Autores como Barbosa (2005) e Heumann – vistos em Costa (2016) – propuseram métodos alternativos para determinação do L/V crítico que consideram alguns desses aspectos. Contudo, como destaca Santos (2015) e Costa (2016), o método proposto por Nadal retorna valores mais conservadores, repercutindo maior segurança e confiabilidade nas decisões, o que, em conjunto com a simplicidade de uso, pode justificar sua ampla adoção no meio ferroviário (DIANA *et al.*, 2012; HUANG, 2021).

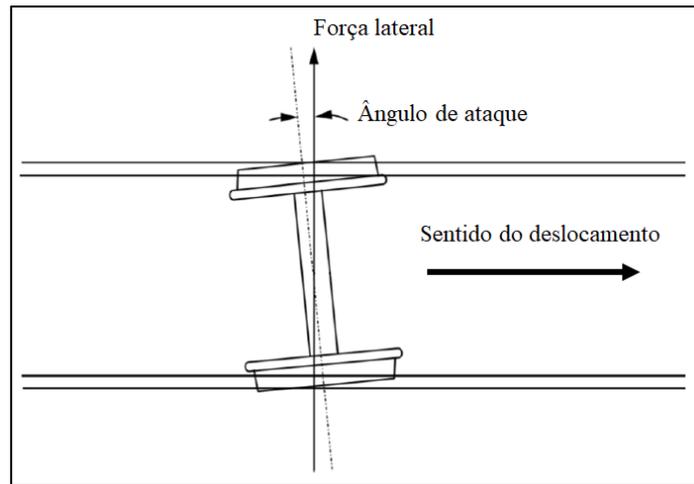


Figura 3.18: Ângulo de ataque da roda em relação ao trilho.

Fonte: Adaptado de Iwnicki (2006) *apud* Lima (2019).

Em complemento, a AAR (*Association of American Railroads*) orienta a análise da segurança operacional por meio dos seguintes critérios (SANTOS, 2015; COSTA, 2016; DI LUCCIO, 2016):

- L/V máximo em uma roda = 1: razão determinada em uma roda individual;
- L/V máximo em um rodeiro = 1,5: soma dos valores absolutos das razões L/V das rodas de um mesmo eixo tomadas no mesmo instante;
- L/V máximo na lateral do truque = 0,6: razão entre o somatório das forças laterais das rodas de um lado do truque, e o somatório das forças verticais das rodas do mesmo lado;
- Mínima carga vertical = 10%: porcentagem da carga estática;
- Tempo de permanência em estado de instabilidade = 50 ms.

3.4 Considerações Sobre a Degradação da Via

Lichtberger (2005) afirma que as forças dinâmicas, particularmente as mais agudas, danificam de forma severa a via permanente. Esse mesmo autor repercute que o ritmo de degradação geométrica é proporcional às forças aplicadas sobre a via, com um expoente de ordem 3, sendo que os intervalos entre as manutenções geométricas diminuem em cerca de 30% em consequência de um aumento de forças de 10%.

Alterações nas forças de carregamento em reação a deformações na via influenciam a degradação do lastro, cujos efeitos se manifestam na acomodação da grade.

Essa degradação é tanto maior quanto menor for o comprimento de onda dos defeitos, ou seja, quanto mais agudas forem as forças dinâmicas (LICHTBERGER, 2005).

Como descrito previamente, e reiterado por Paiva (2016), o projeto ferroviário é guiado por uma carga diretriz, que estabelece a força máxima a ser suportada pela via. Portanto, se durante o tráfego, por questões dinâmicas, as forças ultrapassarem este valor, as estruturas não estarão dimensionadas para suportá-las completamente, o que permite inferir que a degradação física dos componentes pode ser afetada.

Nessa perspectiva, Zarembski *et al.* (2016) se propuseram a analisar se a presença de defeitos geométricos teria influência sobre o desenvolvimento de defeitos em trilhos, tendo como motivação o entendimento que as alterações geométricas induzem sobrecargas dinâmicas potencialmente relevantes na geração de fadiga nesse componente. Com esse propósito, foram examinados dados provenientes de inspeções geométricas realizadas ao longo de cinco anos, e relatórios de defeitos em trilhos ocorridos ao longo de três anos em trechos que totalizaram mais de 37.000 km de uma ferrovia americana Classe 1.

As análises empreendidas pelos autores mediante uso de regressões, demonstraram relação estatisticamente significativa entre problemas geométricos e defeitos em trilhos. Cerca de 11% dos defeitos verificados (todos os tipos de defeitos) ocorreram em locais que possuíam alterações geométricas acima das tolerâncias. Destes, 38% (4,2% do total) foram precedidos por dois ou mais defeitos geométricos. Nas curvas, 21% dos problemas em trilhos ocorreram em locais que também possuíam defeitos de geometria, sendo que 46% deles foram precedidos por dois ou mais problemas geométricos.

A análise de vida útil indicou que na presença de exceções geométricas os trilhos desenvolveram defeitos 30% mais rápido em relação ao tempo até a falha no mesmo local, porém sem a presença de defeitos geométricos.

Segundo os autores, os parâmetros mais relevantes no contexto analisado, foram:

- Para tangente: superelevação, empeno medido em base de 62 pés, nivelamento transversal e bitola;
- Para curva: empeno medido em base de 31 pés, superelevação, alinhamento e nivelamento transversal.

Esses resultados demonstram objetivamente que as forças na interface roda – trilho, influenciadas pelas deformações geométricas, podem impactar na degradação dos trilhos. Essa conclusão pode ser estendida para os demais componentes, tendo em vista que as sobrecargas sobre os trilhos necessariamente serão dissipadas proporcionalmente pela superestrutura, ou seja, também sobrecarregando seus componentes em alguma medida. Remennikov e Kaewunruen (2008) concordam com esse entendimento, indicando que forças dinâmicas elevadas tem grande influência na degradação de dormentes e do lastro.

3.5 Prospecção das Forças Sobre a Via

Dentre as técnicas empregadas para medir as forças sobre a via, a instrumentação da superestrutura é comumente adotada para pesar o material rodante, assim como para propósitos de avaliação da segurança operacional. Emprega, normalmente, o uso de extensômetros (*strain gauge*), dispositivo constituído por um circuito elétrico resistivo, mecanicamente deformável, cuja resistência elétrica varia em função da deformação sofrida. A partir dos dados de variação da resistência, e das constantes de deformação do extensômetro e do material instrumentado, é possível estimar a força responsável pela deformação medida (GUADAGNINI *et al.*, 2011; COSTA, 2016).

A Figura 3.19 ilustra a utilização desse equipamento, apresentando um local instrumentado destinado à verificação da segurança operacional. Cada uma das fileiras de trilhos recebeu, em pontos paralelos, um conjunto de medição formado por oito extensômetros, sendo que para as forças laterais foram empregados quatro extensômetros fixados diretamente na alma do trilho, sendo dois na parte interna e dois na externa. Quanto às forças verticais, foram utilizados extensômetros fixados no patim, dois de cada lado do mesmo trilho.

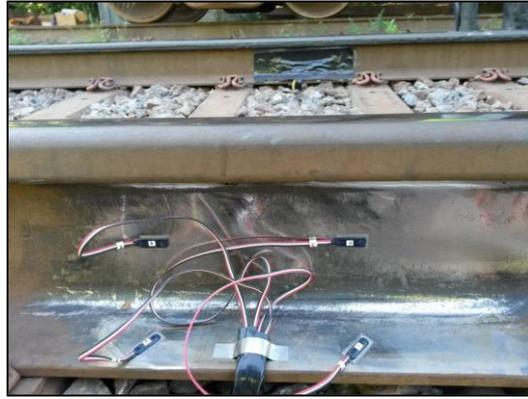


Figura 3.19: *Strain gauges* fixados na lateral externa do trilho. No trilho oposto nota-se o ponto de medição paralelo com os extensômetros protegidos por manta de cor preta.

Fonte: Costa (2016).

Considerando que a força é uma grandeza física proveniente do produto entre a massa do objeto e sua aceleração, as forças dinâmicas dos veículos ferroviários podem ser estimadas mediante uso das leituras inerciais tomadas durante as inspeções dinâmicas. Em relação ao modelo anterior, este método apresenta a vantagem de não ser fixo, permitindo, por consequência, que as condições de carregamento de todo o trecho inspecionado sejam determinadas.

Com o propósito de estimar as forças, a instrumentação dos *axle-boxes* é a modalidade capaz de resultar em valores mais precisos, já que nessa posição as acelerações registradas não sofrem interferência de filtros mecânicos, devido às suspensões, sobretudo. Quando os sensores são posicionados na estrutura do truque ou no interior dos veículos, o cálculo das forças a partir das acelerações medidas torna-se mais complexo, requerendo que seja considerado o efeito das suspensões.

A utilização de equipamentos no interior da caixa do veículo simplifica o processo de aquisição de dados, tornando-o menos oneroso. Em função disso, tem sido empregada, principalmente, quando o objetivo é medir o conforto dos passageiros e avaliar a relação L/V.

As Equações 6 e 7, desenvolvidas pela *Japan Railway Technical Service* (Jarts), apresentadas em Rattón Neto (1985), destinam-se ao cálculo das forças verticais e laterais a partir de medidas das acelerações feitas dentro dos veículos. Esses modelos são relevantes no âmbito desta pesquisa, pois, além de ilustrar as características de formulações que viabilizam o uso de acelerações medidas acima das suspensões primária e secundária, são equações que foram desenvolvidas a partir da análise do material rodante de uma ferrovia de passageiros nacional.

$$P = \frac{P_e}{2} \left(1 \pm \frac{e \cdot l_V \cdot \alpha_V}{\eta_V} \right) \quad (6)$$

Onde

P é carga dinâmica por roda;

P_e é a carga estática por eixo;

e é a relação entre a carga por eixo devida à caixa do veículo e a carga total por eixo estática, definida por $e = (p_t - 15,8n) / p_t$, sendo:

p_t = peso total do veículo;

n = número de truques do veículo;

α_V é a aceleração de vibração vertical medida na caixa do veículo, em g;

l_V é a relação entre a amplitude parcial e a amplitude total da aceleração de vibração vertical ($l_V = 0,55$);

η_V é a relação entre a parcela de redução da carga por roda devida à caixa do veículo e a redução total da carga por roda ($\eta_V = 0,59$).

$$L = \frac{P_e \cdot e \cdot l_H \cdot \alpha_H}{\eta_H} \quad (7)$$

Onde

L é a carga lateral;

P_e é a carga estática por eixo;

e é a relação entre a carga por eixo estática devida à caixa do veículo e a carga total por eixo estática;

l_H é a relação entre a amplitude parcial e a amplitude total da aceleração de vibração horizontal ($l_H = 0,57$);

α_H é a aceleração de vibração horizontal medida na caixa do veículo, em g;

η_H é a relação entre a parcela de força lateral devida à caixa do veículo e a força lateral total roda – trilho ($\eta_H = 0,75\eta_V \therefore 0,44$).

Normalmente a área de contato entre a roda e o trilho na qual se aplicam as forças em questão é descrita por meio da teoria de contato elíptico de Hertz (SUN e DHANASEKAR, 2002; POMBO e AMBRÓSIO, 2008; LIU *et al.*, 2016). Existem diferentes equações para o cálculo das tensões nessa área. No entanto, não foram consideradas nesta pesquisa tendo em vista que estariam mais ligadas à forma do que à intensidade das tensões sobre o trilho.

3.6 Conclusões do Capítulo

A primeira subseção do referencial apresentado neste capítulo permitiu concluir que a geometria é capaz de desequilibrar o deslocamento dos veículos. Essa afirmação se baseia na descrição apresentada na Figura 3.5, e no conteúdo das Tabelas 4 e 5, além de observações convergentes de autores que se debruçaram sobre o assunto (RATTON NETO, 1985; RODRIGUES, 2001; FERREIRA, 2010; GULER, 2013; SOL-SÁNCHEZ *et al.*, 2017; LIMA, 2019).

A partir de Rattton Neto (1985), Tayal (2013) e Lima (2019) conclui-se que a influência da geometria sobre a dinâmica veicular não se deve à defeitos isolados de parâmetros específicos, mas à forma como as deformações do conjunto de parâmetros se apresenta na via. Rattton Neto (1985) frisa os efeitos da associação entre as deformações dos parâmetros, enquanto Tayal (2013) destaca a relevância de sua distribuição ao longo da via. Portanto, ao prever o comportamento dinâmico dos veículos, faz-se relevante considerar a condição ou estado geral no qual se encontra a geometria, no que se refere tanto à coexistência das deformações dos parâmetros, quanto à sua distribuição (homogeneidade) ao longo da via.

No referencial pesquisado, Rattton Neto (1985) foi o único autor que formulou equações destinadas à previsão da condição dinâmica em função do estado da geometria. Os resultados da aplicação dos modelos em questão são relevantes neste contexto, pois ao demonstrar que as acelerações são função da degradação geométrica, corrobora o entendimento de que manutenções geométricas menos frequentes resultam em condições dinâmicas mais severas.

O conteúdo da segunda seção deste capítulo indica que o desequilíbrio veicular decorrente da condição geométrica pode resultar em sobrecargas das forças aplicadas pelos veículos sobre a via. Como fator adicional a corroborar essa afirmação, destaca-se a sensibilidade do contexto, identificada nos trabalhos de Gullers *et al.* (2008),

Remennikov e Kaewunruen (2008) e Molodova e Dollevoet (2011) mediante comparação entre a severidade das sobrecargas dinâmicas e as respectivas irregularidades geradoras. Embora os defeitos apresentados por esses autores não sejam propriamente alterações geométricas, por se tratarem, em sua maioria, de depressões de profundidade pequena e, sendo as deformações geométricas de maior profundidade, pode-se supor que as alterações da geometria podem gerar sobrecargas semelhantes, principalmente se forem deformações em maior amplitude e ainda sob forma de ondas de pequeno comprimento. Mesmo não tratando de alterações geométricas literais, os trabalhos em questão foram apresentados, pois foram as únicas pesquisas que forneceram informações objetivas que relacionaram as forças dinâmicas com as irregularidades que as induziram.

Como demonstrado por Ruilin *et al.* (2017), a magnitude das forças dinâmicas pode alcançar patamares maiores do que aqueles previstos em projeto, o que sustenta a inferência de que os componentes submetidos a tais solicitações podem apresentar taxas de degradação física acentuadas. Nesse sentido, e considerando os trabalhos de Lichtberger (2005), Remennikov e Kaewunruen (2008) e Zarembski *et al.* (2016), pode-se afirmar que a geometria tem influência sobre a degradação dos componentes por meio das forças dinâmicas.

A ampla adoção do critério de Nadal, conforme afirmações de Diana *et al.* (2012), Santos (2015) e Huang (2021), indica ser a escalada do flange da roda sobre o boleto do trilho a causa mais comum de descarrilamento por desequilíbrio de forças dinâmicas. Tendo em vista sua simplicidade de uso, aceitação, resultados conservadores, logo, limites L/V confiáveis, a avaliação da segurança operacional a partir desse método torna-se adequada.

Finalmente, dados provenientes de inspeções dinâmicas, tomados, inclusive, dentro dos veículos, são uma opção viável para estimar as forças aplicadas sobre a via.

A influência da condição geométrica sobre a dinâmica veicular e a vida útil dos componentes pode afetar os planos de manutenção da via permanente, tendo em vista os potenciais desdobramentos sobre a segurança dinâmica, a necessidade de renovações e os custos totais de longo prazo. Assim, o próximo capítulo analisou as características dos métodos correntes de planejamento sob essa perspectiva.

4. PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÕES

Este capítulo destinou-se à análise dos métodos de planejamento de manutenções da via permanente, sobretudo no que se refere à descrição e previsão da condição geométrica e da degradação física dos componentes, assim como os aspectos financeiros relativos à sua gestão.

4.1 Considerações Iniciais

Conforme repercutido por RATTON NETO (1985), política de manutenção é a diretriz gerencial responsável por estabelecer uma sistemática de intervenções que resulte em ações de manutenções geométricas e renovações que sejam suficientemente capazes de atender aos requisitos de segurança e desempenho inerentes ao padrão operacional almejado, e ao mesmo tempo observe as limitações orçamentárias.

Nessa perspectiva, RODRIGUES (2001) destaca que as estratégias de intervenção adotadas para execução de manutenções na via permanente podem ser discriminadas em três abordagens:

- Conservação eventual;
- Conservação cíclica;
- Conservação baseada na condição da via.

A conservação eventual caracteriza-se pela execução de intervenções corretivas visando solucionar defeitos já existentes na via.

Na conservação cíclica as intervenções são realizadas em intervalos fixos, estabelecidos a partir da experiência dos gestores e levando em consideração o volume transportado no período, com as atividades organizadas segundo dois grupos:

- Revisão total (RT): substituição de componentes e correção geométrica do trecho ferroviário a ser mantido, de modo a alcançar qualidade que permita que o mesmo suporte o tráfego até que se complete o próximo ciclo de RT. Como exemplo de períodos de ciclo, a Tabela 7 apresenta as diretrizes estabelecidas pela Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA);

Tabela 7: Exemplo de Ciclos de RT definidos pela RFFSA

Densidade do tráfego (T - Tonelagem bruta diária)	Ciclos	
	Dormente de madeira	Dormente de concreto
T > 120.000		
120.000 > T > 70.000	3 anos	
70.000 > T > 40.000		
40.000 > T > 25.000		6 anos
25.000 > T > 12.500	4 anos	
12.500 > T > 6.000		
6.000 > T > 3.000	5 anos	8 anos
3.000 > T > 1.500		
T < 1.500		

Fonte: RFFSA (1978) *apud* Rodrigues (2001).

- Fora de revisão total (FRT): são realizadas intervenções que garantam as condições mínimas para que o tráfego se desenvolva com segurança até que se complete o ciclo de RT.

A Figura 4.1 ilustra a distribuição das intervenções ao longo do tempo resultante desse modelo administrativo.

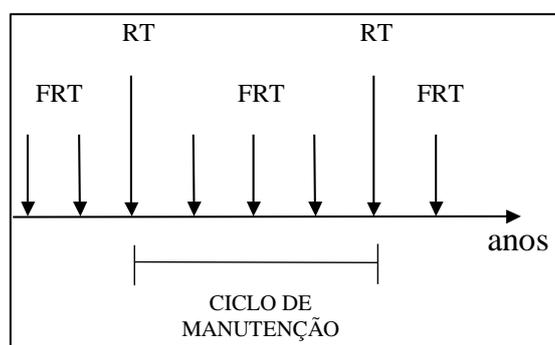


Figura 4.1: Exemplo de distribuição de manutenções resultante do modelo de conserva cíclica.

Fonte: Rodrigues (2001).

Na conservação baseada na condição, o trecho ferroviário é dividido em segmentos de mesma extensão e o estado de degradação é acompanhado sistematicamente, mediante inspeção da amplitude das deformações geométricas e a atribuição de índices que traduzem o estado geral da geometria de cada segmento. A comparação entre os valores dos índices e as tolerâncias de referência, estabelece a ordem de prioridade de atendimento que orientará a organização das atividades de manutenção.

A estratégia de intervenção eventual pode resultar em custos maiores em decorrência de manutenções corretivas numerosas e imprevistas, enquanto que a

conservação cíclica gera custos extras em função de manutenções desnecessárias, antecipadas em demasia (PRATICÒ e GIUNTA, 2018). Em ambas, o risco operacional devido ao aparecimento de defeitos é significativo, de maneira mais marcante na primeira, pois os serviços são realizados somente quando as irregularidades ultrapassam as tolerâncias, mas também presente na segunda, porque a via não se degrada de maneira uniforme ao longo de sua extensão, havendo segmentos que eventualmente apresentam taxas de degradação mais acentuadas do que outros. Por consequência, essas técnicas administrativas estão em desuso nos eixos ferroviários de maior envergadura, ficando relegadas a trechos com tráfego eventual ou linhas com baixo requisito de qualidade.

Portanto, a sistemática mais eficiente de gestão sob os pontos de vista técnico e financeiro é a baseada na condição da via, cuja programação das intervenções está estruturada sob enfoque preditivo. As técnicas atuais de planejamento procuram estabelecer essa previsibilidade fundamentadas na análise do comportamento de longo prazo da via permanente.

Para tanto, existe aparato tecnológico e conceitual que permite descrever o comportamento da via e prever sua evolução ao longo do tempo. Por consequência, os resultados técnicos e financeiros de políticas de manutenção alternativas podem ser estimados e comparados, viabilizando a identificação da estratégia que melhor atenda às necessidades de cada companhia ferroviária, diminuindo, portanto, os riscos inerentes à tomada de decisão.

A Figura 4.2 ilustra como diferentes estratégias de intervenção podem ser adotadas para garantir um determinado padrão operacional, delimitado pela qualidade geométrica mínima em função da velocidade diretriz do trecho ferroviário. Sob enfoque financeiro, por se tratar de um ambiente de negócios, é recomendada a adoção daquele que resulte no menor custo.

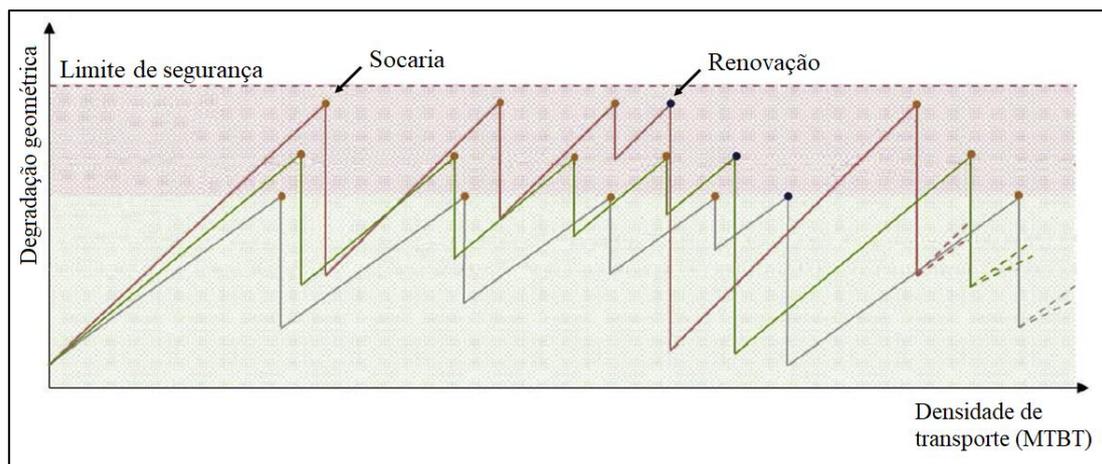


Figura 4.2: Qualidade geométrica resultante de diversas políticas de manutenção.

Fonte: Adaptado de Litherland e Andrews (2019).

Essa figura delinea o contexto que envolve a determinação das políticas de manutenção ao indicar a necessidade de previsão do comportamento futuro da via de modo a viabilizar a previsão do atingimento das tolerâncias e a avaliação se o ciclo de intervenção considerado mantém a qualidade da via dentro de padrões aceitáveis, indicando a necessidade de estimar os custos das estratégias concorrentes.

Por consequência, ficam delimitados os dois campos básicos de conhecimento a serem considerados no planejamento de políticas de manutenção mais econômicas: a previsão da deterioração da via e a contabilização dos custos das estratégias de manutenção.

As próximas subseções apresentam conteúdo relativo aos campos de conhecimento destacados.

4.2 Modelagem da Degradação Geométrica

O comportamento da geometria ao longo do tempo pode ser descrito conforme ilustrado pela Figura 4.3.

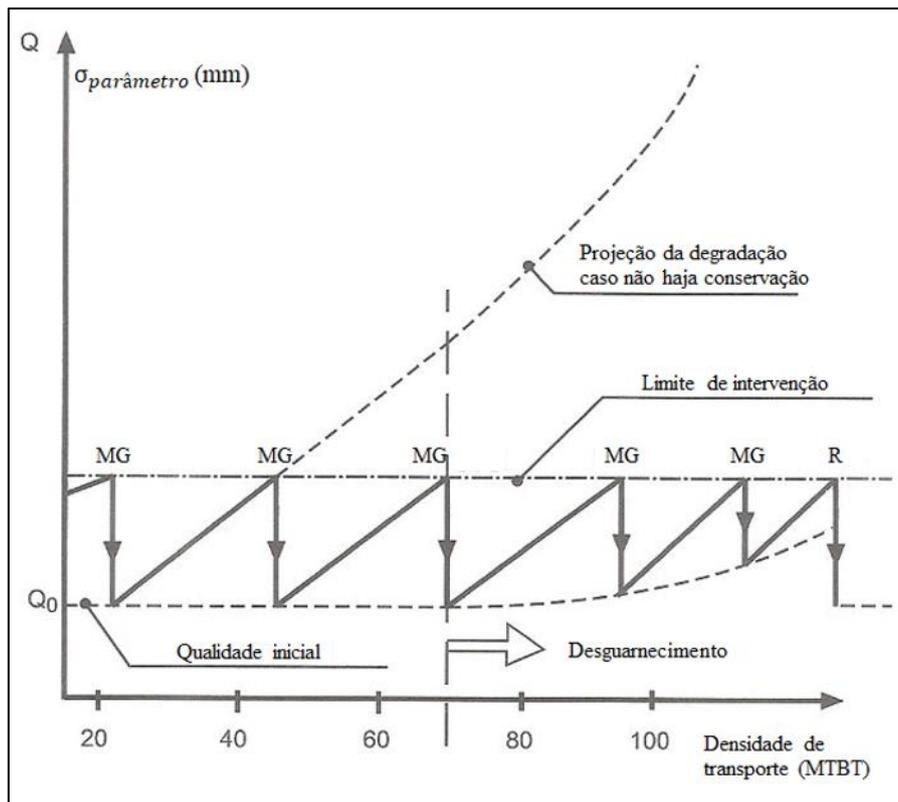


Figura 4.3: Evolução da condição geométrica com destaque para o momento das intervenções de manutenção.

Fonte: Adaptado de Lichtberger (2005).

Nessa figura o estado de degradação da geometria (Q) é expresso pelo desvio padrão das leituras das deformações de um parâmetro geométrico qualquer, medidas em uma seção de via ferroviária hipotética, sendo que a degradação está relativizada à passagem do tráfego (MTBT). Assim, a condição inicial Q_0 , resultante de um serviço de remodelação, renovação (R) ou manutenção geométrica (MG), logo após a intervenção começa a se degradar, ou seja, a amplitude das deformações começa a aumentar. Na maior parte do tempo a degradação ocorre de maneira linear até que seja atingido o limite de intervenção, que pode ser uma tolerância que assegure a segurança, o conforto dos passageiros, ou o desempenho operacional. Então, são realizadas manutenções geométricas visando restabelecer a qualidade inicial.

Ao longo do tempo (MTBT) a capacidade de retenção da geometria diminui, fazendo com que a durabilidade das correções seja cada vez menor, ao mesmo tempo que a capacidade das manutenções de restituir a qualidade também diminui, culminando na necessidade de renovação (LICHTBERGER, 2005). Este comportamento ocorre principalmente em função da degradação do lastro, sobretudo se o desguarnecimento do

material for postergado, bem como em decorrência de eventuais problemas na plataforma da via que resultem, por exemplo, no bombeamento (subida) de material fino proveniente dessas camadas de fundação para o interior do lastro (LICHTBERGER, 2005).

Analisando o perfil da degradação apresentado da Figura 4.3 a partir de uma perspectiva de maior escala, como apresentado na Figura 4.4, logo após as intervenções (de qualquer tipo), a geometria se deteriora em ritmo acentuado. Esse comportamento tem duração relativamente curta, normalmente variando entre 0,5 a 2 MTBT, e deve-se ao processo de rearranjo e acomodação da camada de lastro que foi afrouxada e reposicionada durante a manutenção. Após esse período de estabilização, a deterioração passa a ocorrer de maneira mais lenta, sob padrão linear (LICHTBERGER, 2005).

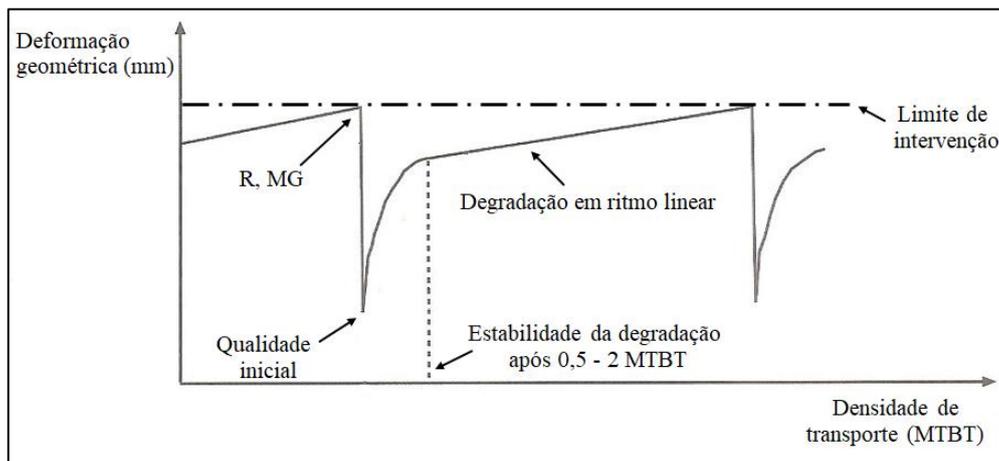


Figura 4.4: Degradação geométrica com destaque para o perfil acentuado pós manutenções.

Fonte: Adaptado de Lichtberger (2005).

Passado o período de estabilização, a taxa de deterioração geométrica corresponde ao coeficiente angular da reta de degradação, sendo que quanto mais plano o gradiente, maiores serão os intervalos entre intervenções.

Diferentes segmentos do mesmo trecho ferroviário podem apresentar padrões de degradação diferentes. Rodrigues (2001) destaca que as características planialtimétricas de cada seção da via permanente influenciam no padrão de degradação, e Lichtberger (2005) acrescenta a relevância da compactação heterogênea do lastro e da flutuação de sua elasticidade vertical nesse comportamento. Portanto, cada segmento ferroviário pode apresentar seu próprio ritmo de deterioração que, eventualmente, resultará em necessidade própria de manutenção (M), como descrito pela Figura 4.5 (LICHTBERGER, 2005).

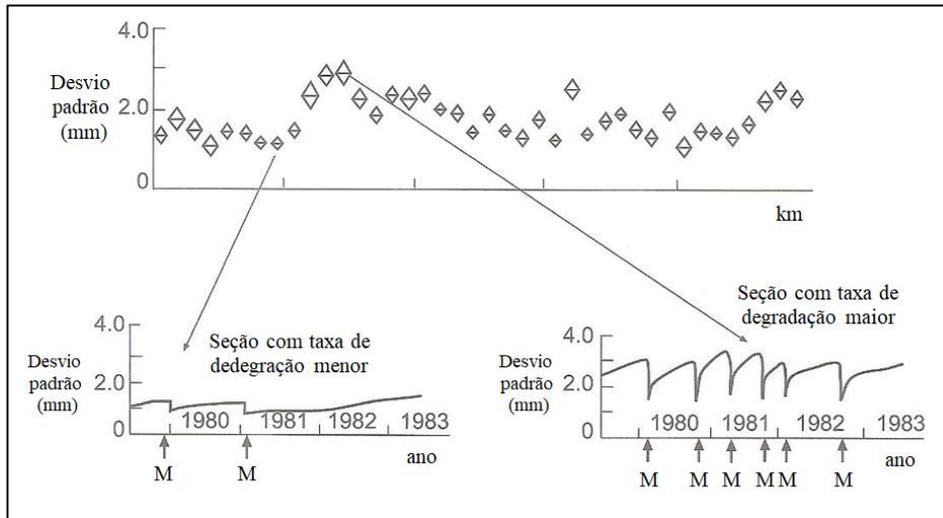


Figura 4.5: Segmentos com perfis de degradação diferentes em um mesmo trecho ferroviário.

Fonte: Adaptado de Lichtberger (2005).

A Figura 4.6 reforça tal entendimento apresentando a taxa de degradação de dois segmentos adjacentes na linha francesa Bordeaux – Sete, operada pela SNCF (*Société Nationale des Chemins de Fer*). Apesar do trecho ter os mesmos tipos de componentes, ter sido construído no mesmo ano e ter o mesmo tráfego, as taxas de deterioração diferem substancialmente (LICHTBERGER, 2005).

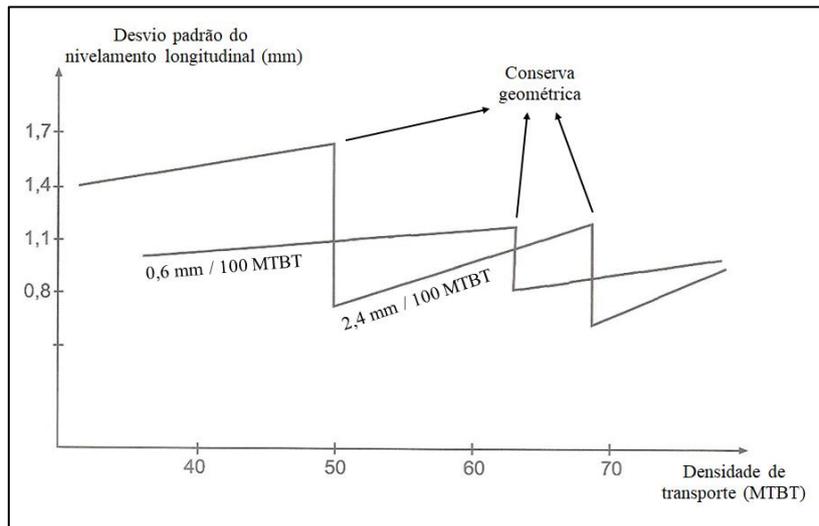


Figura 4.6: Degradação do nivelamento longitudinal em segmentos adjacentes da linha Bordeaux – Sete.

Fonte: Lichtberger (2005).

Conseqüentemente, no planejamento de manutenções preditivas, o estado da geometria de cada segmento da via permanente precisa ser conhecido de forma

independente, e, para tanto, consolidou-se o emprego de índices de qualidade, também conhecidos como TQI (*track quality index*), calculados a partir das leituras das deformações dos parâmetros geométricos e, em alguns casos, das acelerações adquiridas pelos veículos durante deslocamento em relação à via permanente (RODRIGUES, 2001). O TQI expressa, de forma sintética, o estado de degradação da geometria de toda a seção ferroviária analisada. A seguir são apresentados os principais modelos de cálculo de TQI estudados no desenvolvimento deste trabalho, porém, em decorrência de seu volume e variedade, somente as contribuições mais relevantes foram apresentadas com maiores detalhes.

O TQI proposto por Madejski e Grabczyk, visto em Ribeiro (2017), avalia a condição da via a partir de sua subdivisão em segmentos de 1.000 metros de extensão, sendo o índice de qualidade calculado a partir da seguinte formulação:

$$J = (Sz + Sy + Sw + 0,5Se)/3,5 \quad (8)$$

Onde

Sz é o desvio padrão das deformações verticais medidas no segmento;

Sy é o desvio padrão das deformações horizontais medidas no segmento;

Sw é o desvio padrão das leituras do parâmetro empeno do segmento;

Se é o desvio padrão das leituras do parâmetro bitola do segmento.

Os valores J obtidos são comparados a tolerâncias de referência (Tabela 8) para avaliação da necessidade de manutenção.

Tabela 8: Valor máximo de J em função da velocidade operacional

Velocidade (km/h)	Coefficiente J (mm)
80	7,0
90	6,2
100	5,5
110	4,9
120	4,0
130	3,5

Fonte: Ribeiro (2017).

Os modelos desenvolvidos pela *Baltimore and Ohio – B&O*; *Japanese National Railway – JNR*; *Ferrovias Paulistas S.A. – FEPASA*; *CONSEPRO – Consultores para*

Estudos e Projetos de Engenharia e Economia Ltda.; Rede Ferroviária Federal S.A. – RFFSA; Estrada de Ferro Vitória a Minas – EFVM; Estrada de Ferro dos Carajás – EFC; *Polish State Railways* – PKP; *German Federal Railway* – DB; *Swiss Federal Railways* – CFF/SBB; *Hungarian State Railways* – MAV; *Burlington Northern Rail* – BN, se assemelham ao método representado pela Equação 8 no que se refere ao uso de equações próprias para definição do TQI, bem como a segmentação da via férrea em seções de análise de 1.000 metros. Apesar dos modelos desenvolvidos pela PLASSER & THEURER, *Tokaido Shinkansen Maintenance System* – TOSMA e Ferrovias Holandesas – NS, também estarem baseados em formulações próprias, estes subdividem a via em seções de 500, 20 e 5000 metros, respectivamente – todos estes métodos são vistos em Rodrigues (2001).

Os procedimentos listados nos parágrafos precedentes são relativamente antigos, tendo sido desenvolvidos e utilizados entre as décadas de 1980 e 1990. Desde então, houve mudança conceitual nas abordagens, com destaque, sobretudo, ao emprego do desvio padrão das leituras das deformações geométricas. Segundo Tayal (2013), a avaliação da condição geométrica em pontos isolados na via permanente pode ser feita considerando a amplitude, em verdadeira grandeza, das deformações dos parâmetros, contudo, ao analisar o estado de segmentos completos, o desvio padrão é capaz de retratar a sua severidade e homogeneidade.

O modelo desenvolvido pelas ferrovias indianas está fundamentado no uso das Equações 9 e 10, tendo como referência a Tabela 9 para interpretação dos resultados (TAYAL, 2013).

$$TGI = (2UI + TI + GI + 6AI)/10 \quad (9)$$

Em que UI é o valor relativo ao nivelamento; TI relativo à torção; GI relativo à bitola; AI relativo ao alinhamento. Cada um desses fatores é determinado pela Equação 10.

$$GI, TI, AI, UI = 100e^{-\frac{SD_{med}-SD_n}{SD_{maint}-SD_n}} \quad (10)$$

Onde

SD_{med} é o desvio padrão das leituras do parâmetro geométrico medidas em segmentos ferroviários de 200 m sob análise;

SD_n é o desvio padrão de referência para uma via nova;

SD_{maint} é o desvio padrão de referência para manutenção.

Tabela 9: Parâmetros para avaliação do TGI

Valor TGI	Ação requerida
> 80	-
50 < TGI < 80	Manutenção básica
36 < TGI < 50	Manutenção planejada
TGI < 36	Manutenção urgente

Fonte: Tayal (2013).

Nos modelos de planejamento de manutenções mais atuais, consolidou-se a adoção do desvio padrão das leituras de geometria como TGI, sem o emprego de equações específicas como aquelas vistas no método precedente. Além disso, considera-se que o estado de degradação da via pode ser retratado adequadamente a partir da análise de poucos parâmetros, comumente o nivelamento e alinhamento longitudinais, como observado em Lichtberger (2005), e nos modelos propostos em Caetano e Teixeira (2015), Wen *et al.* (2016), Lee *et al.* (2017), Khajehei *et al.* (2019), Sasidharan *et al.* (2020) e Bakhtiary *et al.* (2020). Outra padronização relevante constatada a partir desses trabalhos e de Soleimanmeigouni *et al.* (2016) e Bakhtiary *et al.* (2020), é a segmentação da via ferroviária em seções com 200 m de extensão.

Rodrigues (2001) sugere que cada curva e tangente do trecho ferroviário sejam analisadas de forma independente, tendo em vista que as características planimétricas seriam uma das principais variáveis a determinar o ritmo de degradação.

A inspeção geométrica e o TGI estabelecem o estado atual da geometria, porém, o planejamento de longo prazo requer a previsão da condição futura, de modo a viabilizar a determinação da frequência ideal das intervenções. As abordagens desenvolvidas com a finalidade de estimar a degradação geométrica podem ser classificadas em dois grupos: métodos mecanicistas e estatísticos.

O primeiro está fundamentado no uso de equações fixas, desenvolvidas a partir de conceitos e leis da física (HIGGINS e LIU, 2017). Tratam-se de formulações em que as respostas dos componentes e os parâmetros do tráfego são bem descritas e fundamentadas. Contudo, por se tratarem de modelos baseados no uso de equações

aplicáveis a qualquer trecho ou ferrovia, podem ocorrer distorções nas estimativas em função de sua incapacidade de lidar com as particularidades e incertezas do comportamento da via (SOLEIMANMEIGOUNI *et al.*, 2016). A Tabela 10 apresenta os modelos dessa categoria obtidos na literatura pesquisada.

Tabela 10: Modelos mecanicistas para previsão da degradação geométrica

Nome do modelo	Equação	Variáveis
DSM ¹	$S = S_1(1 + K_H \ln N)$	S – Rebaixamento da via; S_1 – Acomodação inicial após primeiro ciclo de carregamento; K_H – Coeficiente ³ ;
Hoshino ²	$\Delta = L_H \cdot J \cdot Z_1$	N – Número acumulado de eixos; Δ – Coeficiente de deterioração da via; L_H – Fator de carregamento; J – Fator de estrutura; Z_1 – Fator de condição;
Sugiyama ¹	$Z_2 = 2.09 \times 10^{-3} \cdot T^{0.31} \cdot V^{0.98} \cdot J^{1.10} \cdot R^{0.21} \cdot K_p^{0.26}$	Z_2 – Crescimento médio das irregularidades na seção; T – Tonelada acumulada; V – Velocidade média de tráfego; J – Fator de estrutura; R – Fator de influência para trilhos com juntas; K_p – Fator de influência para subgrade;
Sato ¹	$BS = \begin{cases} a_s(P_b - P_g \cdot br)^w, & P_b > P_g \cdot br \\ 0, & P_b \leq P_g \cdot br \end{cases}$ $BS = \alpha_s \cdot P_b^w$	BS – Assentamento do lastro; a_s, α_s – Coeficientes ³ ; P_b – Pressão de contato entre o dormente e o lastro; $P_g \cdot br$ – Valor limite para pressão de contato entre o dormente e o lastro; w – Expoente ³ ;
Guerin ¹	$\frac{dS}{dN} = \alpha_g \cdot y^{\beta G}$	y – Deflexão elástica máxima durante o ciclo de carregamento; $\alpha_g, \beta G$ – Parâmetros do material;
Frohling ¹	$S = \left[\left[K_{F1} + K_{F2} \cdot \left(\frac{D_{2mi}}{K_{F3}} \right) \right] \frac{Q_{tot}}{Q_{ref}} \right]^w \log N$	D_{2mi} – Rigidez da via medida em um dormente i ; K_{F1}, K_{F2}, K_{F3} – Constantes ³ de assentamento; Q_{tot} – Carga/roda predominante; Q_{ref} – Carga/roda de referência; D – MTBT;
AREA ²	$VUN = 10^{\left(\frac{D-121,31}{-149,50} \right)}$	VUN – Vida útil do nivelamento;
Rodrigues ²	$VUN = \prod_{y=1}^7 k_y 10^{\left(\frac{D-121,31}{-149,50} \right)}$	$\prod_{y=1}^7 k_y$ – produto de fatores k_y (fatores apresentados no Anexo I);
López Pita ²	$y_t = y_{0t}(1 + k \ln t)$	y_t – Valor médio das deformações do parâmetro y no instante t ; y_{0t} – Valor médio inicial ou atual da deformação do parâmetro y ; k – Coeficiente função da estrutura da via e da operação;

Nome do modelo	Equação	Variáveis
Universidade Técnica de Munique ¹	$S_{opt} = 1,57 \cdot p_b \cdot \Delta N + 3,04 \cdot p_b^{1,21} \cdot \ln N$	S_{opt} – Aumento das deformações em cenário ótimo (mm/100 dias);
	$S_{pess} = 2,33 \cdot p_b \cdot \Delta N + 15,20 \cdot p_b^{1,21} \cdot \ln N$	S_{pess} – Aumento das deformações em cenário pessimista (mm/100 dias);
	$S_{med} = 1,89 \cdot p_b \cdot \Delta N + 5,15 \cdot p_b^{1,21} \cdot \ln N$	S_{med} – Aumento das deformações em cenário intermediário (mm/100 dias); p_b – Pressão no lastro (pelo método Zimmermann, em Pascal); ΔN – Média de passagens de eixos, no período após os serviços de correção geométrica (≤ 10.000); N – Passagens de eixos após ΔN .

¹ Previsão da amplitude das deformações em verdadeira grandeza; ² Previsão do estado da geometria.

³ Coeficientes que dependem das condições locais e são determinados empiricamente.

Fonte: Rodrigues (1983), Ratton Neto (1985), Guler *et al.* (2011) e Sasidharan *et al.* (2020).

Guler *et al.* (2011) salientam que a degradação geométrica é afetada por vários fatores, requerendo uma análise de sua influência simultânea, portanto, complexidade difícil de ser tratada sob a abordagem mecanicista. Por consequência, métodos empíricos (probabilísticos e estatísticos) podem ser mais adequados uma vez que as variáveis podem ser mais bem descritas e ajustadas. Com base em dados confiáveis e suficientes, e tendo as condições de validação do modelo satisfeitas, as estimativas podem ser bastante precisas.

A seguir são apresentados os trabalhos dessa categoria analisados, sendo que, tal qual adotado na apresentação das formulações de TQI, foram destacadas somente as características que contribuiriam de maneira mais significativa ao desenvolvimento desta pesquisa.

Baseado em análise de banco de dados, Rahimikelarijani *et al.* (2020) propõem um modelo em que o tempo até o aparecimento de defeitos geométricos é estimado mediante distribuição de Weibull, empregando regressão logística para analisar o desempenho da formulação.

Sharma *et al.* (2018) também desenvolveram procedimento baseado em dados históricos de inspeções geométricas. Utilizando método denominado *Random Forest*, é prevista a ocorrência de defeitos de geometria, e a partir de processo de decisão de Markov e simulação de Monte Carlo, definem a estrutura da política de manutenção, considerando para tanto, os custos de intervenção.

Xu *et al.* (2015) formularam modelo para prever a amplitude da deformação dos parâmetros geométricos em um horizonte de, no máximo, três meses, utilizando equação obtida por meio de regressão linear por partes.

Ratton Neto (1985) utiliza modelos de regressão linear para calcular as amplitudes das deformações de cada parâmetro geométrico, considerando como variáveis explicativas do processo de degradação o tempo transcorrido entre as inspeções geométricas e a amplitude máxima das deformações medidas na via, remanescentes do serviço de manutenção geométrica, estimada para o intervalo de confiança de 95%, que representa, portanto, o patamar a partir do qual o processo de degradação evolui.

Os quatro trabalhos apresentados nos parágrafos precedentes se assemelham quanto ao propósito de estimar a amplitude, em verdadeira grandeza, das deformações geométricas. Contudo, também foram vistas abordagens que empregaram TQI para estabelecer o estado de degradação.

Shafahi e Hakhamaneshi (2009) propõem uma ferramenta de gestão cuja estimativa das degradações é feita por meio de matrizes de transição de Markov, tendo a condição geométrica retratada por meio de TQI denominado *CTR index (Combined Track Record index)*.

Em Soleimanmeigouni *et al.* (2020), o estado da geometria foi representado pelo desvio padrão das leituras das deformações dos parâmetros alinhamento e nivelamento longitudinais, sendo que o estado futuro foi previsto mediante uso de um modelo exponencial por partes e regressão logística ordinal. Também foi utilizada simulação de Monte Carlo para prever a condição geométrica em diferentes intervalos de inspeção.

Andrade e Teixeira (2015), tomando como base dados históricos e observações feitas por profissionais, utilizaram modelagem Bayesiana para estimar a degradação de indicadores da condição geométrica, a saber, o desvio padrão das leituras das deformações dos parâmetros nivelamento longitudinal e alinhamento longitudinal, sendo analisadas, posteriormente, alternativas de manutenção e renovação.

Andrews *et al.* (2014) propõem formulação baseada em Redes de Petri que representam as inspeções, manutenções geométricas e renovações. Os autores adotam como parâmetro representativo da condição geométrica o desvio padrão das leituras de nivelamento longitudinal, e, por meio de simulação de Monte Carlo, projetam diversos cenários em que são considerados padrões de degradação distintos, assim como a distribuição ao longo do tempo das operações de inspeção, manutenção geométrica e

renovação. A análise dos custos totais dos cenários subsidia a comparação de alternativas gerenciais visando a escolha da sistemática com os melhores benefícios.

Wen *et al.* (2016) propõem um método de planejamento de políticas de manutenção preditivas, cujo objetivo é reduzir o custo total do programa de manutenção. Para tanto, os autores formularam modelo baseado em Programação Linear Inteira Mista, sendo que o estado da geometria é estabelecido pelo desvio padrão das leituras do parâmetro nivelamento longitudinal dos segmentos do trecho ferroviário. Também são fatores considerados pelo modelo os impactos das operações de socaria na capacidade de recuperação da condição geométrica, a distribuição das seções em curva ao longo do trecho, e os custos relativos à operação da socadora.

Rodrigues (2001) utiliza regressões lineares simples para formular equações de degradação geométrica. A partir de histórico de inspeções geométricas e densidade de transporte, o autor adota como variável explicativa (independente) do processo de degradação o MTBT transportado durante o período das inspeções, e como variável explicada (dependente) o desvio padrão das medidas do parâmetro geométrico empeno. A Equação 11 apresenta o modelo geral adotado pelo referido autor:

$$E = a + bP_a + u \quad (11)$$

Onde

E é a condição geométrica, variável explicada da regressão;

P_a é a carga transportada no período considerado, variável explicativa da regressão;

u é o erro padrão da estimativa de regressão;

a é um termo constante estimado pela regressão;

b é um termo estimado pela regressão e expressa a taxa de degradação por unidade de variação da variável explicativa.

Ao comparar os modelos de regressão logarítmica, exponencial e linear, Neuhold *et al.* (2020) concluem que todos os três métodos são adequados para modelagem do processo de degradação geométrica, porém o mais bem avaliado foi o linear. Dessa forma, os autores modelam a condição geométrica por meio de um algoritmo de priorização e

regressão linear, sendo que para determinar o estado de degradação é utilizada forma modificada de cálculo do desvio padrão, empregada nas ferrovias austríacas e que considera as medidas obtidas nos trilhos esquerdo e direito do parâmetro nivelamento longitudinal. O TQI em questão é calculado para segmentos de 100 m.

Assim como Rattou Neto (1985), esses autores destacam a relevância de considerar o estado inicial da degradação, verificado pós manutenções. A Equação 12, apresenta o modelo geral proposto pelos referidos autores.

$$Q(t) = Q_n + bt \quad (12)$$

Onde

$Q(t)$ é a condição geométrica futura;

Q_n é a condição atual da geometria;

b é a taxa de degradação geométrica;

t é a variável explicativa da degradação.

Caetano e Teixeira (2015) apresentam entendimento similar ao de Neuhold *et al.* (2020) no que se refere à necessidade de considerar a qualidade inicial da geometria, porém estes autores propõem formulação (Equação 13) que inclui variável relativa à perda de eficiência da socaria ao longo do tempo devido à degradação do lastro.

$$D_{\sigma i} = c_0 \beta_i^g + c_1 l \quad (13)$$

Onde

$D_{\sigma i}$ é o valor previsto do desvio padrão do parâmetro i no período l ;

c_0 é o desvio padrão inicial (atual) do parâmetro i ;

β é a perda da eficiência da socaria em corrigir as irregularidades do parâmetro i ;

g é o número de socarias realizadas na seção ferroviária de 200 m desde a última renovação;

c_1 é a taxa de degradação do desvio padrão do parâmetro i , em mm/MTBT;

l é o tráfego acumulado, em MTBT.

Todas as equações determinadas pelos métodos empíricos são de aplicação restrita ao trecho a partir do qual foram desenvolvidas.

4.3 Modelagem da Degradação Física

Assim como na seção anterior, todos os modelos de previsão da degradação física dos componentes analisados no desenvolvimento deste trabalho foram apresentados, tendo sido detalhados, porém, apenas os mais relevantes. Para considerar a influência das forças dinâmicas sobre a degradação física, o modelo deve possuir variáveis ou abordagem que levem em conta esse aspecto, seja com a possibilidade de aproveitamento direto, seja mediante adaptações.

Os componentes da via permanente estão sujeitos ao desenvolvimento de desgaste e/ou fadiga de suas estruturas, por consequência, torna-se necessário estimar a vida útil para ambos os tipos de degradação, adotando como referência o menor valor obtido visando resguardar a segurança.

Para determinação da vida útil dos trilhos a AREA (*American Railway Engineering Association*) propõe duas equações que consideram o peso de referência do trilho, a densidade anual do tráfego (MTBT) e constantes específicas, além do que prevê alguns ajustes nessas constantes em função da experiência dos gestores; já o modelo desenvolvido pela Universidade de Illinois define a vida útil a partir da taxa de perda de material dos trilhos por abrasão, considerando também o grau da curva e coeficiente de desgaste em função também do grau da curva (RODRIGUES, 1983).

O modelo TOPS On-Line Service Inc. possui formulação mais elaborada, abrangendo diversas variáveis para estimar a vida útil dos trilhos por desgaste. O modelo ENEFER – Consultoria e Projetos Ltda, se baseia no TOPS, porém inclui um coeficiente recomendado pela AREA, e ainda uma variável relativa à bitola da via (RODRIGUES, 1983).

Rodrigues (1983) se embasou nesses modelos para propor a Equação 14, que, segundo o autor, é mais factível à realidade brasileira. Vale notar que dentre as variáveis da equação, a carga por eixo (fator K_5) poderia ser ajustada em função das forças dinâmicas.

$$VUTrilhos = \left(\prod_{i=1}^8 K_i \right) \cdot 1,932 \cdot WT^{0,565} \quad (14)$$

Onde

$VUTrilhos$ é a vida útil de trilhos, em MTBT;

W é o peso do trilho, em kg/m;

T é a densidade anual de tráfego, em MTBT;

$\prod_{i=1}^8 K_i$ é o produtório de coeficientes relativos a características da via, com K_i ($i = 1, \dots, 8$):

K_1 = tipo de trilho;

K_2 = velocidade de operação;

K_3 = rampas;

K_4 = curvas;

K_5 = carga por eixo;

K_6 = trem típico;

K_7 = outras características da via com relação à drenagem, plataforma, condições de manutenção, tipo e estado do lastro;

K_8 = bitola e base rígida do truque, com base no método definido pela *Japan Railway Technical Service - JARTS*.

Os valores relativos aos coeficientes K_i são apresentados no Anexo II deste documento.

Ainda tomando como referência a definição da vida útil por desgaste, o modelo proposto pela universidade de Queensland se baseia no uso de três equações. Para o desgaste no topo do boleto em curvas são propostas as Equações 15 e 16 para o trilho mais elevado e o mais baixo, respectivamente (ZHANG *et al.*, 2000; RIBEIRO, 2017):

$$w_{hr_top} = 7,6 \cdot 10^{-6} \cdot k_h \cdot k_{l_hrtop} \cdot w_h \cdot \sin\psi \quad (15)$$

$$w_{lr_top} = 9,5 \cdot 10^{-6} \cdot k_h \cdot k_{l_lrtop} \cdot w_l \cdot \sin\psi \quad (16)$$

Para o desgaste na face da bitola ($w_{hr_{gauge}}$) do trilho mais elevado, são propostas as seguintes equações:

$$w_{hr_{gauge}} = 12,1 \cdot 10^{-6} \cdot k_h \cdot k_{l_{hr_{gauge}}} \cdot C_1 \cdot P_1 \cdot \sin\psi \Leftrightarrow R \leq 500 \quad (17)$$

$$w_{hr_{gauge}} = 12,1 \cdot 10^{-6} \cdot k_h \cdot k_{l_{hr_{gauge}}} \cdot C_1 \cdot P_1 \cdot \sin\psi(1,7 - 0,0014 \cdot R) \Leftrightarrow 500 < R < 1200 \quad (18)$$

Onde

$k_{l_{hr_{top}}}$, $k_{l_{lr_{top}}}$ e $k_{l_{hr_{gauge}}}$ são o fator de lubrificação dos trilhos, que varia de 0,115 quando com boa lubrificação a 0,497 para atrito;

$k_h = 51,05e^{-0,0152H}$ onde H é a dureza do trilho;

w_h e w_l são a carga vertical da roda, em kN;

C_1 é um fator constante;

P_1 é a força lateral no trilho, em kN;

ψ é o ângulo de ataque roda – trilho, em rad;

R é o raio da curva, em metros.

As variáveis w_h , w_l e P_1 relativas às cargas verticais e laterais das rodas, poderiam ter sua magnitude ajustada devido ao incremento dinâmico resultante da condição geométrica.

O modelo denominado *Archard Wear Model* estima o volume de metal perdido em função da tensão normal aplicada à superfície, o módulo de deslizamento local e a dureza do material, como apresentado na Equação 19 (RIBEIRO, 2017).

$$w = \frac{k_w}{H} \cdot F \cdot \|s\| \quad (19)$$

Onde

w é o volume de metal perdido por desgaste, em m³;

k_w é o coeficiente de desgaste, em m²/N;

F é a força normal;

H é a dureza do material, em Hb;

$\| s \|$ é a distância de deslizamento.

A força normal (variável F) se refere àquela contrária à força peso exercida pela roda na face superior do trilho, logo, poderia ser ajustada levando em consideração as forças dinâmicas.

O método denominado Larsson, visto em Ribeiro (2017), analisa o mecanismo de desgaste nos trilhos em função do raio de curvatura da via, ajuste geométrico, coeficiente de atrito nas curvas, carga por eixo, dentre outras variáveis. A princípio poderia ser utilizado tendo em vista a variável carga por eixo, contudo, existem parâmetros do modelo que foram obtidos empiricamente em um trecho ferroviário específico, o que limita a abrangência de utilização da equação.

Com relação ao desenvolvimento de fadiga nos trilhos, em Rodrigues (1983) é apresentado o modelo proposto pela AAR, baseado na seguinte equação:

$$VUTrilhos = \frac{1}{\sum \frac{B_y}{N_y}} \quad (20)$$

Onde

$VUTrilhos$ é a vida útil do trilho por fadiga, em MTBT;

$$B_y = B \cdot a_y;$$

B é o total de ciclos por MTBT;

a_y é a fração do número total de ciclos aplicados com carga y ;

N_y é o número total de ciclos que provocam a fadiga para a carga y por MTBT;

$$N_y = \frac{N_e}{\frac{S_{m\acute{a}x}}{S_e}} \cdot \frac{1}{Z}$$

N_e é o limite de tolerância à fadiga do aço, em ciclos;

$S_{m\acute{a}x}$ é a carga vertical máxima y ;

Z é a inclinação da curva S - N (esforço x número de ciclos necessários para provocar fadiga);

$$S_e = \frac{b}{1 - m \cdot R};$$

S_e é o limite abaixo do qual não ocorrerá fadiga para o carregamento considerado;

b é o limite de fadiga para $r = 0$ fornecido pelo diagrama de Goodman modificado;

R é a taxa de esforço máximo igual a $-0,2$ para truques, e $-0,2875$ para eixos;

m é a inclinação da curva limite do diagrama de Goodman modificado.

$S_{máx}$ pode ser ajustado segundo as forças dinâmicas. O Apêndice I detalha a utilização dessa equação.

O método apresentado por Akeel *et al.* (2011) destina-se ao cálculo do momento de início da fratura superficial causada por fadiga RCF (*rolling contact fatigue*). Outro modelo para previsão de fadiga é o chamado *Whole Life Rail Model* (WLRM), que se baseia na dissipação de energia no contato roda-trilho (DIRKS e ENBLOM, 2011).

Quanto aos demais componentes, em Rodrigues (1983) são apresentados modelos para cálculo de vida útil de dormentes, sendo eles o método desenvolvido pela AREA, que se baseia em estudos feitos em ferrovias americanas; o TOPS que nacionaliza a equação da AREA diminuindo sua restrição de aplicabilidade pela utilização de produtório de fatores que englobam características da ferrovia analisada; o ENEFER que se baseou no modelo TOPS, contudo, incluiu variável relativa ao tipo de trilho utilizado; e, o modelo proposto pelo próprio autor (Equação 21), desenvolvido a partir de dados das ferrovias da extinta RFFSA e EFVM e com o emprego de produtório de fatores determinados em função das características da ferrovia.

$$VUD = 2,023 \cdot \left(\prod_{i=1}^6 K_i \right) \cdot e^{(2,3569 - 0,0350\alpha)} \cdot D^{-0,1553396} \quad (21)$$

Onde

VUD é a vida útil do dormente, em anos;

D é a densidade anual de tráfego, em MTBT;

α é o grau da curva para a corda de 100 ft (30,48 m);

$\prod_{i=1}^6 K_i$ é o produtório das constantes:

K_1 = comprimento da barra do trilho;

K_2 = velocidade;
 K_3 = rampas;
 K_4 = perfil dos trilhos;
 K_5 = carga por eixo;
 K_6 = características da via, como drenagem, carga por eixo, condições da plataforma e do lastro.

Os valores relativos aos fatores K_i utilizados nessa equação são apresentados no Anexo II. Nesse modelo, assim como para os trilhos, o fator K_5 pode ser ajustado em função da sobrecarga dinâmica.

O método desenvolvido por Shenton (1985), visto em Sadeghi e Askarinejad (2010), destina-se ao cálculo da deterioração do lastro. Dentre as variáveis consideradas na formulação (Equação 22), encontra-se o peso por eixo do material rodante.

$$S = K_s \frac{A_e}{20} (0.69 + 0.028L)N^{0.2} + 2.7 \times 10^{-6}N \quad (22)$$

Onde

S é o abatimento do lastro;

A_e é o peso por eixo equivalente, em kN;

N é o número de eixos que trafegaram pelo trecho;

L é o levantamento da grade feito pela socaria;

K_s é um fator definido em função do tipo e tamanho do dormente, condição do lastro e do sublastro.

Em Ribeiro (2017) é apresentado o método de cálculo do fator A_e (Equação 23).

$$A_e = \left(\frac{\sum F_i^5 \cdot N_i}{\sum N_i} \right)^{0,2} \quad (23)$$

Onde

F_i é a carga estática da roda tipo i , em kN;

N_i é o número de carregamentos de rodas tipo i .

Segundo Rodrigues (1983), a ENEFER considera que a vida útil do lastro é o dobro do ciclo de nivelamento. Por outro lado, esse autor propõe que a cada correção geométrica seja feita descarga de lastro complementar em volume de 12% até o quarto serviço consecutivo, e na quinta intervenção seja feito o desguarnecimento do material presente na via, com posterior descarga de 52% de lastro novo. Trata-se de um autor nacional, que considera característica de gestão tipicamente brasileira, relativa à reposição de lastro a cada conserva geométrica.

Para os demais componentes que formam o sistema de fixação, apenas Rodrigues (1983) apresenta meio objetivo de cálculo, baseado em uma norma estabelecida pela AREA e que toma como referência a vida útil dos trilhos (VUT), como apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Vida útil dos acessórios de fixação

Componente	Vida útil
Tala, porca, parafuso e arruela	1,07 VUT
Placa de apoio	1,73 VUT
Fixação	0,88 VUT
Retensores	1,17 VUT
AMVs	0,71 VUT

Fonte: Rodrigues (1983).

Como neste método as fixações têm sua vida útil variando em função dos trilhos, se os trilhos tiverem sua durabilidade ajustada por um fator dinâmico, também estes componentes terão seu horizonte de renovação ajustado a partir da consideração de forças dinâmicas.

A modelagem da vida útil dos componentes também pode ser feita empregando métodos estatísticos. Nesse sentido, as falhas em sistemas como aquele que envolve a degradação da via permanente, podem ser analisadas segundo a curva de probabilidade ilustrada na Figura 4.7, também conhecida como “curva da banheira”. Nela se distinguem três fases distintas do ativo, sendo a primeira caracterizada por tendência elevada de falhas, que pode ser explicada por problemas oriundos de projeto ou execução de serviços, posteriormente o sistema tende a atingir um estado estacionário, com falhas aleatórias, e, ao final, a taxa de falhas aumenta novamente influenciada pela idade e degradação do sistema (ANDRADE, 2008).

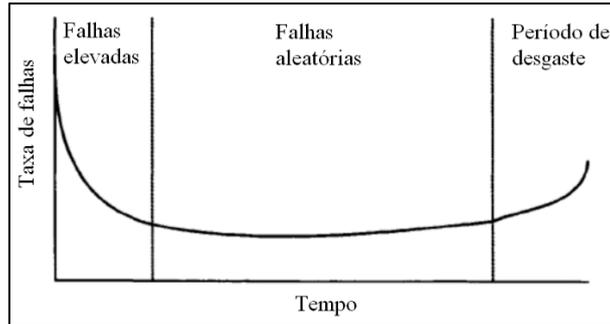


Figura 4.7: Curva da banheira.

Fonte: Adaptado de Andrade (2008).

A distribuição de Weibull é considerada apropriada para modelar tempos até falha de sistemas que apresentam comportamento semelhante ao ilustrado pela Figura 4.7 (ANDRADE, 2008).

Baria (2015) considera que o surgimento de defeitos em trilhos devido a fadiga pode ser modelado por meio da distribuição de Weibull empregando a seguinte formulação:

$$F(m) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{m}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (24)$$

Onde

m é o tempo, a carga acumulada, os ciclos, ou qualquer outra variável que seja considerada na avaliação da degradação;

η é o parâmetro de escala conhecido como vida característica;

β relaciona-se com a taxa de falha do componente estudado.

Com os valores η e β determinados é possível calcular o tempo médio entre falhas pela equação:

$$MTTF = n\Gamma[(\beta + 1)/\beta] \quad (25)$$

O tempo médio ($MTTF$) pode ser calculado em horas ou MTBT dependendo do parâmetro utilizado.

Guler (2016) possui o mesmo entendimento de Baria, delimitando que o parâmetro de forma β está relacionado à taxa de falhas do componente, enquanto o parâmetro de escala η também é conhecido como vida característica do componente, sendo que seus valores podem indicar o estado em que a via se encontra, como apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros da distribuição de Weibull para trilhos

Parâmetro	Valor	Condição
β	< 1	Degradação incipiente
β	1	Falhas aleatórias
β	> 1	Estado desgastado
η	≥ 1	Mais de 63,2% da unidade em falha

Fonte: Guler (2016).

Com relação aos dormentes, segundo Baria (2015) e Guler (2016), em função da não linearidade do comportamento das degradações, que durante a fase inicial da vida útil é muito pequena, mas que na fase final torna-se significativamente mais elevada, seria mais apropriado realizar a modelagem da vida útil por meio de distribuição estatística do tipo exponencial.

Em contrapartida, Merheb *et al.* (2015) salientam que no caso dos dormentes a distribuição de Weibull pode ser empregada para estimar o tempo até a falha pois é extensivamente utilizada em situações onde componentes idênticos sujeitos às mesmas condições falham sobre períodos diferentes e inesperados; quando uma série de falhas existem em um item e este falha devido à falha mais grave; e ainda, quando a taxa de falha pode aumentar ao longo do tempo, incluindo um período em que não ocorrem falhas.

Sobre o lastro, Indraratna *et al.* (2006) indicam que a degradação é influenciada pela carga aplicada pelo material rodante, o número de ciclos de carregamento e a velocidade dos trens, existindo um padrão não linear entre o número de carregamentos e a acomodação do lastro. Por consequência, seu abatimento é comumente relacionado com o número de ciclos de carregamento por uma relação semi-logaritmica tal como:

$$S_n = a(1 + k \log N) \quad (26)$$

Onde

S_n é a acomodação do lastro em N ciclos de carregamento;

N é o número de ciclos de carregamento;

a é a acomodação no primeiro ciclo;

k é uma constante empírica dependente da compactação inicial, tipo de lastro, tipo de reforço e grau de saturação do material.

Devido à rápida acomodação inicial seguida por uma consolidação gradual, Indraratna *et al.* (2006) ainda afirmam que uma relação mais acurada poderia ser representada pela função:

$$S_n = a \cdot N^b \quad (27)$$

Onde

b é um coeficiente empírico determinado por uma regressão não linear.

Indraratna *et al.* (2000) *apud* Indraratna *et al.* (2006) investigaram o efeito dos ciclos de carregamento e da carga por eixo na degradação do lastro. A partir da Equação 27 foi modelado o recalque do material, como mostrado na Figura 4.8, sendo que a variação da carga aplicada afeta apenas o coeficiente a , enquanto o coeficiente b permanece relativamente inalterado.

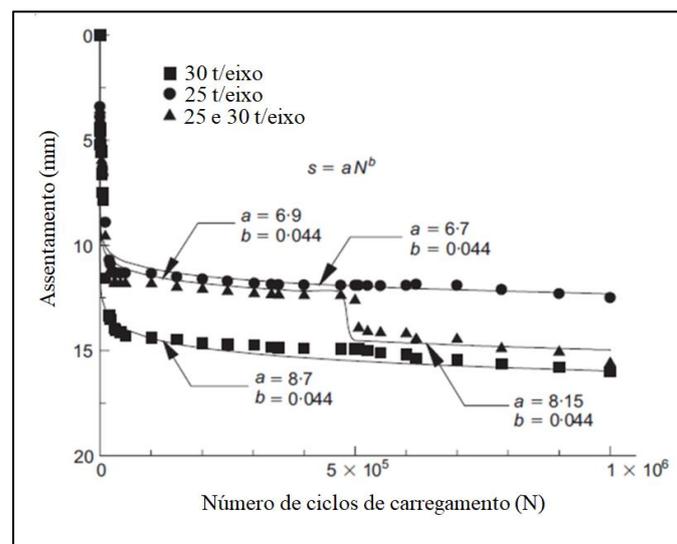


Figura 4.8: Efeito dos ciclos de carregamento e do peso por eixo no abatimento do lastro.

Fonte: Indraratna *et al.* (2000 *apud* 2006).

Em outra abordagem, Baria (2015) afirma ser possível utilizar para o lastro o mesmo modelo por ele proposto para trilhos e dormentes baseado na distribuição exponencial.

4.4 Custos de Manutenção

Os custos inerentes à realização dos serviços de manutenção podem ser estimados por meio de formulações agregadas, quando, a partir de dados históricos são obtidos modelos empíricos mediante emprego de ferramentas estatísticas (STENSTRÖM *et al.*, 2016; PRATICÒ e GIUNTA, 2018). Contudo, modelos desagregados são os mais empregados, em que os valores são determinados para cada uma das operações analisadas levando em consideração os suprimentos necessários, pessoal, equipamentos, dentre outros parâmetros pertinentes.

As manutenções geométricas, exceto em intervenções corretivas de pequena dimensão, são realizadas, normalmente, por equipamentos de grande porte, como socadoras e reguladoras de lastro. Consequentemente, os custos da intervenção são relativos ao funcionamento do maquinário e da mão de obra para sua operação, tanto durante o tempo de execução do serviço, como durante o deslocamento até os locais de manutenção. Como as inspeções geométricas subsidiam essas intervenções, o seu custo pode ser, eventualmente, incluído no orçamento de conserva, sendo constituído de elementos semelhantes, ou seja, o custo relativo aos insumos necessários ao funcionamento do carro controle e os valores devidos aos inspetores/operadores.

Além disso, a depender do modelo de intervenção adotado, é realizada a descarga de lastro complementar nesses processos, e assim, os custos correspondentes também devem ser incluídos.

Nos trabalhos de Sasidharan *et al.* (2020) e Patra *et al.* (2009) são apresentadas equações desagregadas, dentre as quais se encontram formulações destinadas à contabilização dos custos de inspeção e de manutenção geométrica, apresentadas, respectivamente, a seguir.

$$\hat{C}_{INS_n} = \sum_{u=1}^U \sum_{m=1}^M (\hat{C}_{Emn} \cdot \hat{E}_{mn} + \hat{C}_{TImn}) \cdot L \quad (28)$$

Onde

\hat{C}_{INS_n} é o custo de inspeção da via, durante o período n considerado;

u é a frequência de realização da inspeção;

m é o tipo de equipamento utilizado na inspeção;

\hat{C}_{Emn} é o custo médio com o operador do equipamento;

\hat{E}_{mn} é o número médio de funcionários necessários para operar o equipamento;

\hat{C}_{TImn} é o custo de uso do equipamento por metro de via inspecionada;

L é o comprimento da seção de via inspecionada.

$$CSV = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(T_{TAi} \cdot C_l \cdot L_i) + (T_{TAi} \cdot C_{eta} \cdot L_i) \cdot \left(\frac{m}{m_{TAi}}\right)}{(1+r)^j} \quad (29)$$

Onde

i é o segmento da via férrea analisada;

j é o período em que a manutenção está sendo avaliada;

N é a vida útil do trecho ferroviário;

CSV é o custo de socaria de via, em R\$;

T_{TAi} é o tempo médio de rendimento do processo de socaria, em h/km;

C_l é o custo médio da mão de obra, em R\$/h;

L_i é o comprimento da seção de via em manutenção, em km;

C_{eta} é o custo de operação do equipamento, em R\$/h;

m é a carga acumulada no período avaliado, em milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT);

m_{TAi} é o intervalo para realização de socaria da via, em MTBT;

r é a taxa de juros.

A mesma estrutura da formulação destinada ao cálculo dos custos de manutenção geométrica pode ser adotada para outros serviços mecanizados de manutenção realizados na via permanente, tais como desguarnecimento e regulação de lastro, esmerilhamento de trilhos, capina química, dentre outros cuja operação envolve apenas custos relativos aos operadores e ao funcionamento dos equipamentos.

Quanto aos serviços que mesmo sendo mecanizados envolvem substituição de componentes, como o desguarnecimento com reposição de lastro e as operações de renovação, é necessário que sejam contabilizados os custos de aquisição dos novos componentes. Quando as operações forem realizadas de forma manual, desconsideram-se os custos do maquinário de grande porte e incluem-se valores inerentes aos equipamentos de pequeno porte, como furadeira, trefonadeira, policorte etc., além do que deve-se corrigir o rendimento da operação para corresponder à produtividade da equipe.

Como exemplo de formulação desagregada para esse cálculo, é apresentada a Equação 30, relativa ao processo de renovação de trilhos, adaptada de Guler (2016):

$$RRC = \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_R \cdot L_i) + (T_{RRi} \cdot C_L \cdot L_i) + (C_{ERR} \cdot T_{RRi} \cdot L_i)) \cdot (M/M_{RRi})}{(1+r)^j} \quad (30)$$

Onde

RRC é o custo de renovação de trilhos, em R\$/km;

C_R é o custo do trilho, em R\$/km;

L_i é o comprimento do trecho a ser renovado, em km;

T_{RRi} é o tempo para substituição de trilho, em h/km;

C_L é o custo de mão de obra para instalação, em R\$/h;

C_{ERR} é o custo de equipamento para instalação, em R\$/h;

M é a carga acumulada no período avaliado, em milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT);

M_{RRi} é a vida útil do trilho, em MTBT;

Guler (2016) apresenta formulações para definição dos custos de renovação dos demais componentes da via que não foram aqui apresentadas, pois suas estruturas são, basicamente, idênticas à Equação 30, diferindo apenas o nome das variáveis em função do componente foco do serviço. Também estão presentes modelos para a determinação do custo de limpeza do lastro, lubrificação de trilhos e esmerilhamento do boleto de trilhos.

De maneira geral, essas formulações estabelecem os custos de compra dos materiais, definido por meio do produto entre o custo unitário do item e o volume a ser substituído; o custo para instalação do item, obtido pela multiplicação entre o tempo

necessário para realização do serviço e o custo da mão-de-obra; e por fim, a amplitude da operação, estabelecida pela razão entre a vida útil do item em MTBT, e o MTBT que trafegou até o momento considerado. Também é utilizado um fator de atualização dos valores para uma data presente, já que tratam-se de serviços futuros.

As características das formulações estão condicionadas à política de renovação adotada pela ferrovia, tendo em vista que diferenças significativas no ritmo de degradação física dos componentes podem levar à adoção de estratégias de substituição independente, em que os itens são trocados em datas diferentes em função de suas respectivas vidas úteis. Por outro lado, também existe a possibilidade de renovação conjunta, quando todos os componentes são substituídos ao mesmo tempo.

Eventualmente, a depender das características operacionais do trecho ferroviário, a execução dos serviços de manutenção incorre na geração de custos indiretos, relativos, sobretudo, a atrasos na circulação dos trens. Sempre que pertinente, estes valores devem ser contabilizados.

Estratégias de intervenção que proporcionam economias em uma perspectiva de curto prazo não necessariamente resultarão em benefícios financeiros em longos horizontes administrativos, sendo relevante, portanto, analisar o custo total de longo prazo da política de manutenção. Esse processo está frequentemente apoiado no conceito de custo do ciclo de vida (CCV ou LCC – *life cycle cost*), que a IEC 60300-3-3 (2004) define como o processo de análise econômica destinado à avaliação do custo total de aquisição, operação e descarte de um produto. A análise do CCV pode ser desenvolvida para todo o ciclo de vida de um projeto ou para partes ou combinações de diferentes fases de sua vida útil. As decisões mais comumente subsidiadas por esse tipo de análise incluem a avaliação e comparação de abordagens alternativas de projeto, e a comparação de estratégias de operação, teste, inspeção, e manutenção do item avaliado.

Para muitos ativos complexos, o custo de manutenção é relevante na análise CCV, especialmente para ativos como a infraestrutura da via permanente, onde a fase de operação e manutenção correspondem ao maior período do ciclo de vida do sistema (STENSTRÖM *et al.*, 2016). Por isso, essa técnica tem sido largamente utilizada nesse contexto para seleção das melhores estratégias de manutenção com foco no longo prazo, permitindo comparar as características relativas das alternativas concorrentes, viabilizando análises que minimizem os custos totais do sistema e aumentem a sustentabilidade econômica da superestrutura ferroviária (HAMARAT *et al.*, 2019).

Em suma, para tomada de decisão todos os custos afetados pela alternativa gerencial devem ser considerados. A teoria do CCV presume que, se todos esses custos forem identificados para todas as alternativas avaliadas, aquela com o menor valor deve ser escolhida. Um pré-requisito para essa comparação é que as alternativas devem assegurar o serviço e os padrões técnicos necessários. Na prática, outros fatores também influenciarão a decisão, como regulamentações relacionadas à segurança, ruído e vibrações, conforto dos passageiros, dentre outras a serem consideradas no desenvolvimento de alternativas de decisão. A análise conjunta de todas essas questões, juntamente com o orçamento disponível pode, por exemplo, levar o gestor a selecionar a segunda melhor alternativa (HAMARAT *et al.*, 2019).

Os horizontes administrativos utilizados nessas análises variam em função dos objetivos gerenciais de cada empresa. Contudo, é comum que sejam de longo prazo, coincidindo, por exemplo, com a vida útil dos componentes.

No contexto de gestão da via permanente, diversos trabalhos embasaram suas análises nessa abordagem, tais como Khajehei *et al.* (2019), que analisaram a frequência mais adequada para as inspeções; Giunta *et al.* (2018), Rempelos *et al.* (2020) e Singh *et al.* (2020) que analisaram alternativas tecnológicas para estabilização do lastro; e Praticò e Giunta (2018), que compararam os benefícios de vias lastradas e sobre laje.

No que se refere especificamente à gestão das manutenções, apesar da variedade de abordagens, em geral os modelos de planejamento de longo prazo apoiados nas análises CCV buscam a racionalização das intervenções visando solucionar:

- Quando realizar os serviços: Wen *et al.* (2016), Khouzani *et al.* (2017), Lee *et al.* (2017), Su e De Schutter (2018), Khajehei *et al.* (2019), Bakhtiary *et al.* (2020);
- Quais serviços realizar: Caetano e Teixeira (2013), Caetano e Teixeira (2015);
- Onde realizar as intervenções: Caetano e Teixeira (2015), Khouzani *et al.* (2017);
- Como lidar com a interrupção do tráfego: Caetano e Teixeira (2013), Khouzani *et al.* (2017), Su e De Schutter (2018).

É nesse âmbito que se identificam as estratégias que se relacionam com a descrição feita na Figura 1.1, visando programações que propiciem intervir estritamente

quando necessário, mas com atendimento pleno da segurança, garantia do desempenho, e o menor impacto possível na circulação dos trens.

4.5 Conclusões do Capítulo

Apesar da modelagem mecanicista ser uma opção no que se refere à previsão da degradação geométrica, foi identificado na literatura o entendimento de que, estando disponíveis os dados necessários, os modelos empíricos são preferíveis. Sobre estes, apesar das diversas concepções, a adoção de alternativas em que a evolução da degradação ocorre de forma linear em função de uma variável explicativa, comumente a passagem do tráfego (MTBT), é a abordagem mais comum, o que está em consonância com o que foi apresentado na descrição da Figura 4.3, e com Andrade e Teixeira (2012), que afirmam que já é consenso corroborado experimentalmente a adequabilidade da modelagem linear.

O período imediato pós manutenção é marcado por degradação geométrica acentuada, contudo, a maioria dos autores desconsiderou esse fenômeno. Acredita-se que essa simplificação deve-se à dificuldade em modelar com precisão tal comportamento. Além disso, por ser um período relativamente curto, a significância de seus efeitos frente a degradação total pode, eventualmente, não ser relevante.

Os modelos de planejamento preditivo de manutenções analisados, estabelecem, quase que em sua totalidade, planos de intervenção baseados na subdivisão da via, tendo como fundamento o entendimento de que cada segmento da via férrea pode apresentar perfil próprio de degradação. Nesse âmbito, consolidou-se o emprego de segmentos de 200 m de extensão, sendo que o estado no qual se encontra a geometria nas seções é estabelecido por meio de índices de qualidade, sendo o desvio padrão das leituras dos parâmetros geométricos, o TQI mais empregado atualmente.

A perda de eficiência da socaria foi abordada somente por um autor. Estando atrelada à degradação do lastro, ações de desguarnecimento, ou mesmo a descarga de lastro complementar, podem prevenir sua ocorrência, o que pode indicar o motivo pelo qual a maioria da literatura, apesar de mencionar essa questão, não a considerou. Nessa situação, a renovação é realizada não pelo aumento da frequência de manutenções geométricas, mas, sobretudo, pela vida útil dos componentes, expressa pelo atingimento do limite de desgaste ou fadiga.

A literatura consultada não indicou uma abordagem (mecanicista ou estatística) preferencial a ser adotada na modelagem da degradação física dos componentes. Foi possível identificar de maneira objetiva a aderência dos modelos mecanicistas às necessidades desta pesquisa, tendo em vista a presença de variáveis, em algumas formulações, relativas às forças aplicadas sobre a via. Apesar da variedade de equações, o trabalho de RODRIGUES (1983) forneceu modelos para todos os componentes da superestrutura.

Quanto aos custos de manutenção, o cálculo por meio de formulações desagregadas, ou seja, específicas para cada tipo de operação, é o modelo mais empregado. Nas renovações, as estimativas dos valores levam em consideração o modelo de intervenção (substituição conjunta ou separada dos componentes).

Quanto ao planejamento das manutenções, embora os trabalhos analisados apresentem particularidades, de maneira geral as estratégias empregadas estão fundamentadas na análise do CCV, com os esforços para redução orçamentária concentrados no aprimoramento dos planos de intervenção geométrica, o que envolve inúmeros fatores inerentes à sua realização, tais como a frequência dos serviços, a qualidade mínima preconizada para a via em função do padrão de tráfego, o roteamento e deslocamento das equipes, e a mitigação das interferências no tráfego.

Além de não considerarem os efeitos das condições futuras da via sobre a dinâmica veicular, os trabalhos analisados não estabelecem qualquer relação entre a frequência de manutenção geométrica e os ciclos de renovação. Esta pesquisa explora essas limitações, empregando tais conceitos na formulação do procedimento de planejamento de manutenções que é apresentado no próximo capítulo.

5. PROCEDIMENTO DE PLANEJAMENTO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO

Este capítulo apresenta o procedimento de planejamento de políticas de manutenção de vias ferroviárias desenvolvido neste trabalho. Seu objetivo é definir a frequência de correção geométrica capaz manter a segurança e o desempenho operacional ao menor custo possível.

Trata-se de um método empírico, cujo uso requer, preferencialmente, os seguintes dados:

- Histórico de inspeções geométricas: constituído por um conjunto de relatórios de inspeções realizadas no trecho ferroviário a ser analisado;
- Relatório de inspeção dinâmica: registro das acelerações verticais e horizontais que o veículo ferroviário adquiriu em relação à via permanente durante deslocamento no mesmo trecho sob análise;
- Densidade de transporte: volume (em MTBT) de mercadorias e/ou passageiros transportados durante o mesmo período do histórico de inspeções geométricas;
- Custos unitários de manutenção: valores unitários para realização dos serviços de manutenção geométrica e renovação no trecho ferroviário analisado.

Os dois primeiros conjuntos de dados são indispensáveis, sem os quais o método não pode ser aplicado. Os demais, excepcionalmente, podem ser substituídos por alternativas apresentadas no Capítulo 6 deste documento.

O procedimento é constituído por quatro etapas, apresentadas na Figura 5.1

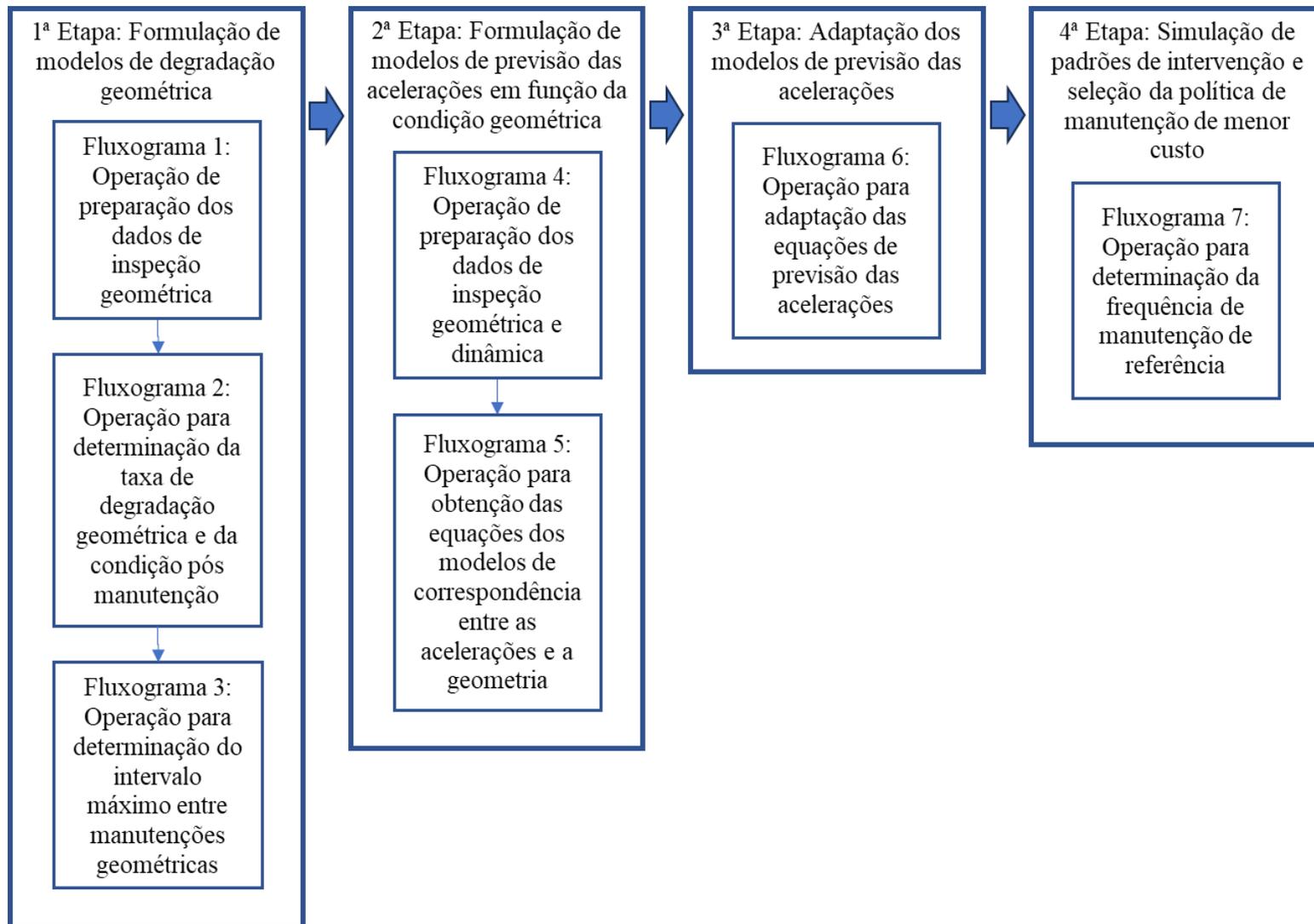


Figura 5.1: Etapas do procedimento.

As características de cada uma das etapas do procedimento são apresentadas nas próximas subseções.

5.1 Formulação de Modelos de Degradação Geométrica

Esta primeira etapa do procedimento visa:

1. Formular modelos matemáticos a serem utilizados para estimar o estado de degradação de cada parâmetro geométrico nas seções da via permanente analisada;
2. Estimar o máximo intervalo entre manutenções geométricas capaz de assegurar que a condição geométrica não ultrapasse os limites de segurança.

Para consecução dessas metas são necessárias operações que foram organizadas neste documento sob a forma de fluxogramas de processos.

O Fluxograma 1, apresentado na Figura 5.2, apresenta a sequência de processos relativos à primeira operação. A explicação de cada item, bem como o significado das abreviações e siglas utilizadas, é sempre feita nos parágrafos posteriores aos fluxogramas.

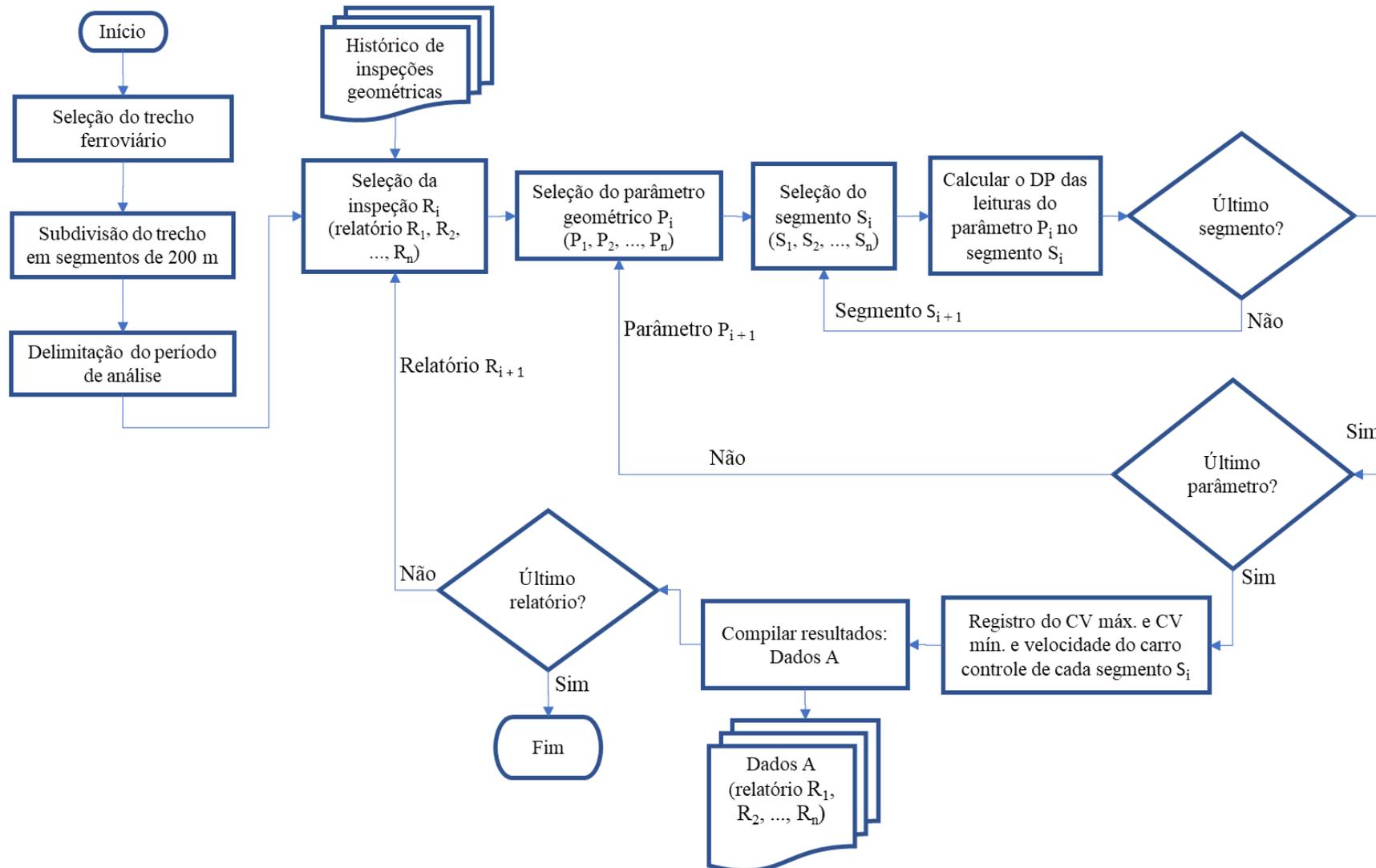


Figura 5.2: Fluxograma 1 – Operação de preparação dos dados a serem utilizados no desenvolvimento da primeira etapa do procedimento.

A operação descrita na figura precedente tem início com a seleção do trecho ferroviário a ser analisado, sendo necessário, nesse momento, determinar a extensão total da via em questão.

Posteriormente, o trecho é subdividido em segmentos de mesma extensão. A segmentação foi adotada levando em consideração referencial teórico (RODRIGUES, 2001; LICHTBERGER, 2005; SOLEIMANMEIGOUNI *et al.*, 2016; BAKHTIARY *et al.*, 2020) que indicou que cada seção da via permanente pode apresentar perfil próprio de degradação, o que pode justificar planos personalizados de intervenção, além do que, em trechos de alta densidade de transporte, as janelas operacionais para execução das manutenções são limitadas, o que restringe a extensão a receber manutenção. Neste trabalho foi adotado como padrão seções de 200 m de comprimento, tendo em vista seu amplo emprego nos trabalhos mais atuais analisados na revisão bibliográfica (TAYAL, 2013; CAETANO e TEIXEIRA, 2015; WEN *et al.*, 2016; LEE *et al.*, 2017; KHAJEHEI *et al.*, 2019; BAKHTIARY *et al.*, 2020; SASIDHARAN *et al.*, 2020).

Em seguida, é delimitado o período de tempo a ser considerado no estudo da evolução da condição geométrica e, conseqüentemente, na formulação dos modelos de degradação. Esse período é a referência para seleção dos relatórios de inspeção a serem utilizados. É necessário considerar períodos que compreendam o intervalo entre duas manutenções geométricas consecutivas, pois possibilita estabelecer a evolução da degradação desde o patamar verificado no momento após a manutenção, até a tolerância de intervenção. Não existe um período de referência para tanto, mas recomenda-se pelo menos três anos para trechos de maior movimento, e pelo menos cinco anos para trechos de menor envergadura.

A seguir, iniciam-se processos que visam a determinar o estado da geometria em cada segmento do trecho ferroviário e em todos os relatórios de inspeção selecionados. Esses processos começam com a seleção do primeiro relatório de inspeção da série definida e, na sequência, o primeiro parâmetro geométrico dentre os inspecionados. Então, o estado de degradação desse parâmetro é estabelecido por meio do cálculo de um TQI para cada um dos segmentos de 200 m analisados.

O procedimento analisa a condição da geometria por meio de um TQI por três motivos: intervenções preditivas focadas na conservação de toda a extensão da seção ferroviária requerem que o estado de degradação de todo o segmento seja conhecido, o que não poderia ser feito de forma objetiva por meio do emprego de valores em verdadeira grandeza das deformações geométricas, mais aplicáveis à análise de defeitos isolados, e,

por consequência, planejamento de ações corretivas de pequena envergadura; é a forma empregada pela maioria dos métodos de planejamento de manutenções vistos no referencial bibliográfico para expressar de forma consolidada a condição geométrica; e, foi realizado um estudo (apresentado no Apêndice II) a partir do banco de dados utilizado no desenvolvimento do Capítulo 6, que concluiu que os modelos de correspondência entre as acelerações dos veículos e a condição da via mais representativos estatisticamente, são aqueles que empregaram o TQI para representar a geometria.

Como índice de qualidade (TQI) este trabalho adotou o desvio padrão (DP) das leituras dos parâmetros geométricos dos segmentos de 200 m. Tal abordagem toma como referência os trabalhos mais modernos, nacionais e internacionais, analisados no referencial teórico, que empregaram este índice para expressar o estado da geometria de seções ferroviárias (RODRIGUES, 2001; CAETANO e TEIXEIRA, 2013; TAYAL, 2013; CAETANO e TEIXEIRA, 2015; WEN *et al.*, 2016; LEE *et al.*, 2017; KHAJEHEI *et al.*, 2019; BAKHTIARY *et al.*, 2020; SASIDHARAM *et al.*, 2020). A bibliografia em questão afirma que o desvio padrão é capaz de indicar adequadamente o estado de degradação dos parâmetros geométricos no que se refere à severidade das deformações e sua homogeneidade.

O processo de cálculo do DP se repete para todos os segmentos do trecho ferroviário analisado. Terminados os segmentos, o processo é repetido para o próximo parâmetro geométrico até que todos aqueles aferidos durante a inspeção sejam considerados. Então esses subprocessos são repetidos para todas as inspeções selecionadas.

Cada veículo de inspeção tem sua própria aparelhagem de inspeção que pode ser configurada para medir um mesmo tipo de parâmetro de diversas formas. Portanto, o número total de parâmetros geométricos inspecionados pode variar em relação ao apresentado na Seção 2.2 deste trabalho.

Ao término, são identificados o grau de curva máximo e mínimo (CV máx e CV mín) dos segmentos analisados, assim como a velocidade do carro controle. Esses três últimos dados são utilizados na segunda etapa do procedimento.

Finalmente, é consolidado o banco de dados intitulado Dados A, que é composto por pastas de trabalho em número igual ao de inspeções sob análise, sendo que cada uma dessas pastas conta com duas planilhas. Na primeira, estão registradas as leituras originais obtidas dos relatórios da inspeção geométrica em questão, e, na segunda, o cálculo e registro do DP de cada parâmetro geométrico em cada segmento.

O procedimento ora proposto utilizou como suporte para tratamento dos dados planilhas do Microsoft Excel, motivo pelo qual foi adotada nomenclatura padrão definida pelo *software* para seus arquivos. O termo “planilha” designa a tabela em que são organizados e, eventualmente, se desenvolvem cálculos com os dados, e “pasta de trabalho” designa o arquivo que contém uma ou mais planilhas. Essa estruturação não presume que o procedimento deva ser utilizado por meio do referido *software*.

O banco Dados A forma a base de informações necessárias para o estabelecimento do ritmo de degradação de cada parâmetro ao longo do período avaliado, empregando para tanto o Fluxograma 2, apresentado na Figura 5.3.

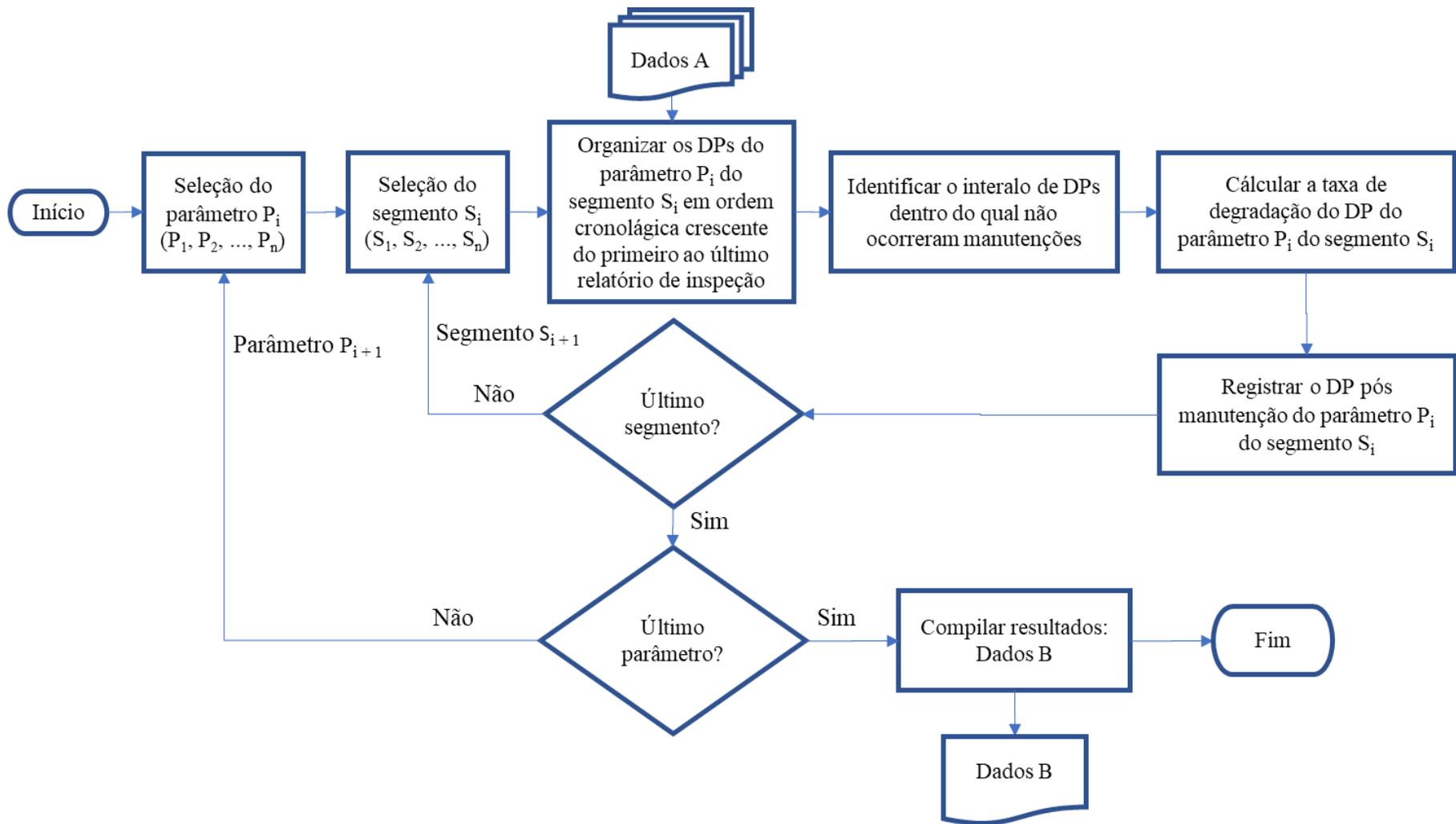


Figura 5.3: Fluxograma 2 – Operação para determinação da taxa de degradação dos parâmetros e obtenção dos demais dados necessários ao modelo de degradação geométrica.

O objetivo da operação descrita na Figura 5.3 é determinar a taxa de degradação dos parâmetros geométricos, bem como os dados necessários para estabelecer o estado de degradação remanescente do serviço de manutenção, que representa o patamar a partir do qual a degradação evolui.

A operação em questão inicia-se pela seleção do primeiro parâmetro do conjunto inspecionado, com a posterior seleção do primeiro segmento em análise. Em seguida, a partir de Dados A, são obtidos os valores de DP calculados em todos os relatórios de inspeção desse segmento e parâmetro, que são então organizados em ordem cronológica crescente. Essa disposição cronológica tem por objetivo organizar os dados da forma como o estado de degradação geométrica evoluiu ao longo do tempo.

A seguir, é identificado o intervalo de valores de DP dentro do qual não ocorreram manutenções. Tal identificação é feita observando a diretriz apresentada por Khajehei *et al.* (2019), de que reduções dos valores de DP maiores ou iguais a 15% entre inspeções consecutivas indicam que foram realizadas manutenções entre esses registros. Portanto, cada DP é comparado ao valor precedente começando pelo segundo relatório da série disponível. Identificada uma redução de pelo menos 15%, fica delimitado o início do intervalo. O processo continua até que seja identificada outra redução, que determina o fim do intervalo de DPs de interesse.

Posteriormente é calculada a taxa de degradação do parâmetro geométrico em questão no segmento sob análise. Caetano e Teixeira (2015) e Lee *et al.* (2017) expressam o entendimento que o ritmo de evolução da degradação geométrica pode ser modelado de forma linear, e Ratton Neto (1985), Rodrigues (2001), Wen *et al.* (2016), Khouzani *et al.* (2017) e Sasidharan *et al.* (2020) afirmam que regressões lineares podem ser empregadas para formulação das equações de degradação. Portanto, seguindo tal entendimento, este procedimento modela a degradação geométrica por meio de uma função linear, cujo coeficiente angular estabelece a taxa de evolução das deformações, e para sua determinação adotou-se a função INCLINAÇÃO, nativa do *software* Excel, que possui como argumentos os valores da variável dependente do modelo (*val_conhecidos_y*), e os valores da variável independente (*val_conhecidos_x*). Por variável dependente se designa aquela cujo comportamento é explicado pelo modelo, e a variável independente refere-se àquela cuja variação explica o comportamento da primeira.

Recomenda-se a adoção do volume transportado no período entre as inspeções (quantidade de carga e/ou passageiros, em MTBT), como variável independente, e os respectivos valores de DP de cada inspeção do intervalo delimitado, como variável

dependente. O resultado obtido por meio da referida função é idêntico ao coeficiente angular estabelecido por meio da técnica de regressão linear.

O procedimento avança para o registro do valor de DP relativo à inspeção realizada após a execução do serviço de manutenção. Esse valor estabelece o estado da geometria pós socaria, indicando, portanto, a condição de partida do processo de degradação.

Concluída a obtenção desses dados referentes ao primeiro parâmetro geométrico no primeiro segmento de 200 m sob análise, o processo segue de forma iterativa por todos demais parâmetros e segmentos. Ao final, é gerada a pasta intitulada Dados B, composta por planilhas em número igual ao dos parâmetros geométricos inspecionados, ou seja, cada planilha é relativa a um parâmetro, nas quais os respectivos dados são organizados segundo o processo descrito, com o registro da taxa de degradação e da condição pós manutenção de cada segmento.

O banco Dados B fornece o conteúdo necessário para a realização da terceira operação desta primeira etapa, o cálculo do intervalo (em MTBT) necessário para que a degradação geométrica, partindo da condição pós manutenção, atinja as tolerâncias de segurança estabelecidas em norma, configurando-se, portanto, como o máximo intervalo entre manutenções geométricas possível de ser adotado sem que a segurança seja comprometida sob o ponto de vista geométrico. Esse cálculo segue o Fluxograma 3, apresentado na Figura 5.4.

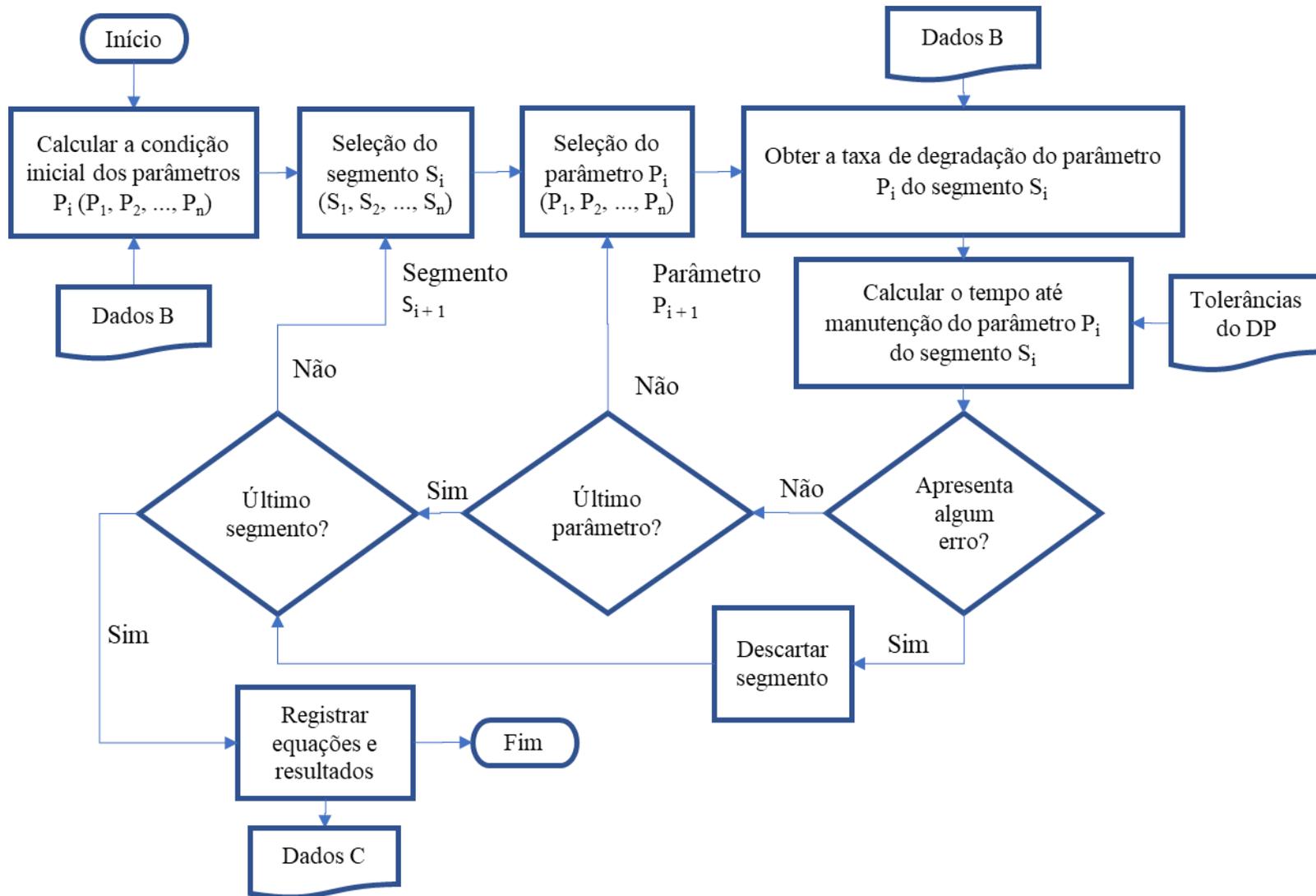


Figura 5.4: Fluxograma 3 – Operação para determinação do intervalo máximo entre manutenções geométricas para cada parâmetro e segmento analisados.

Os dados obtidos anteriormente são reunidos para formulação dos modelos de degradação utilizados para calcular o momento em que a condição de cada parâmetro geométrico em cada segmento de estudo alcançará a respectiva tolerância geométrica.

O processo se inicia com o cálculo do estado de degradação inicial de cada parâmetro, sendo empregada a seguinte equação:

$$DP_{inicial_i} = \frac{\sum_1^n DP \text{ pós manutenção}_{i_n}}{n} \quad (31)$$

Onde

$DP_{inicial_i}$ é o valor (DP) da condição geométrica inicial (pós manutenção) do parâmetro i sob análise, em mm;

$DP \text{ pós manutenção}_{i_n}$ é o valor do DP relativo ao parâmetro i verificado na inspeção realizada após o serviço de manutenção geométrica nos segmentos 1 até n sob análise.

A Equação 31 calcula a média aritmética dos valores de DP inicial registrados por parâmetro em todos os segmentos analisados, porque a manutenção geométrica pode produzir, em alguns casos, desde correções satisfatórias, até melhorias insignificantes ou até mesmo piora na condição prévia. A possível piora se deve à ação nociva da socaria sobre a degradação física do lastro, como descrito na Seção 2.4. Portanto, a adoção da média amostral busca estabelecer um valor central de referência que ameniza essa amplitude de resultados, tal qual adotado em Seraco (2019).

Uma vez calculados os DPs iniciais, é selecionado o primeiro segmento e parâmetro geométrico a serem analisados. Posteriormente, a respectiva taxa de degradação é obtida do banco Dados B, para que seja formulada a equação para estimar a condição geométrica em função da passagem do tráfego, cujo modelo geral é expresso pela Equação 32. Essa formulação toma como referência Caetano e Teixeira (2015) e Seraco (2019).

$$D_{in_T} = Tax_{i_n} \cdot T + DP_{inicial_i} \quad (32)$$

Onde

D_{in_T} é o valor do DP do parâmetro i , no segmento n , no momento T , em mm;

Tax_{i_n} é a taxa de degradação do DP do parâmetro i no segmento n , em mm/MTBT;

T é o volume transportado desde a última manutenção geométrica, em MTBT;

$DPinicial_i$ é o valor do DP verificado na via logo após os serviços de manutenção para o parâmetro i , em mm;

Para calcular o período necessário para que o DP do parâmetro avaliado atinja a tolerância referencial, a Equação 32 é modificada, resultando em:

$$TM_{i_n} = \frac{Tdp_i - DPinicial_i}{Tax_{i_n}} \quad (33)$$

Onde

TM_{i_n} é o volume de transporte necessário para que a condição do parâmetro i no segmento n atinja a tolerância de segurança (limite de manutenção) partindo do estado verificado após a última manutenção, em MTBT;

Tdp_i é a tolerância do DP para o parâmetro i , em mm;

$DPinicial_i$ é o valor do DP verificado na via após os serviços de manutenção para o parâmetro i , em mm;

Tax_{i_n} é a taxa de degradação do DP do parâmetro i no segmento n , em mm/MTBT.

Se por alguma inconsistência de dados, tal como erros de registro nos relatórios de inspeção, o segmento ferroviário é descartado do estudo, visto que para a obtenção dos modelos de previsão das acelerações (segunda etapa do procedimento) é necessário dispor de equações válidas para todos os parâmetros geométricos do segmento analisado.

Formulada a equação de degradação e calculado o TM_{i_n} , o processo segue de forma iterativa até o último parâmetro geométrico do segmento avaliado. Esse processo é repetido até que sejam analisados todos os segmentos.

A frequência mínima de socaria capaz de garantir a segurança operacional sob critério geométrico no segmento avaliado corresponde ao menor TM_{i_n} obtido dentre aqueles calculados para os parâmetros analisados.

Ao final, as equações e os TM_{i_n} dos segmentos válidos são registrados em uma pasta de trabalho intitulada "Dados C", finalizando a primeira etapa do procedimento.

Com relação à tolerância do DP, deve-se adotar limites normatizados para o desvio padrão em função da velocidade máxima autorizada no trecho ferroviário analisado.

5.2 Formulação de Modelos de Previsão das Acelerações em Função da Condição Geométrica

O objetivo da segunda etapa do procedimento é formular modelos matemáticos que estimem as acelerações verticais e horizontais dos veículos ferroviários em relação à via permanente.

A primeira operação para o desenvolvimento dessa etapa é descrita no Fluxograma 4, apresentado a seguir.

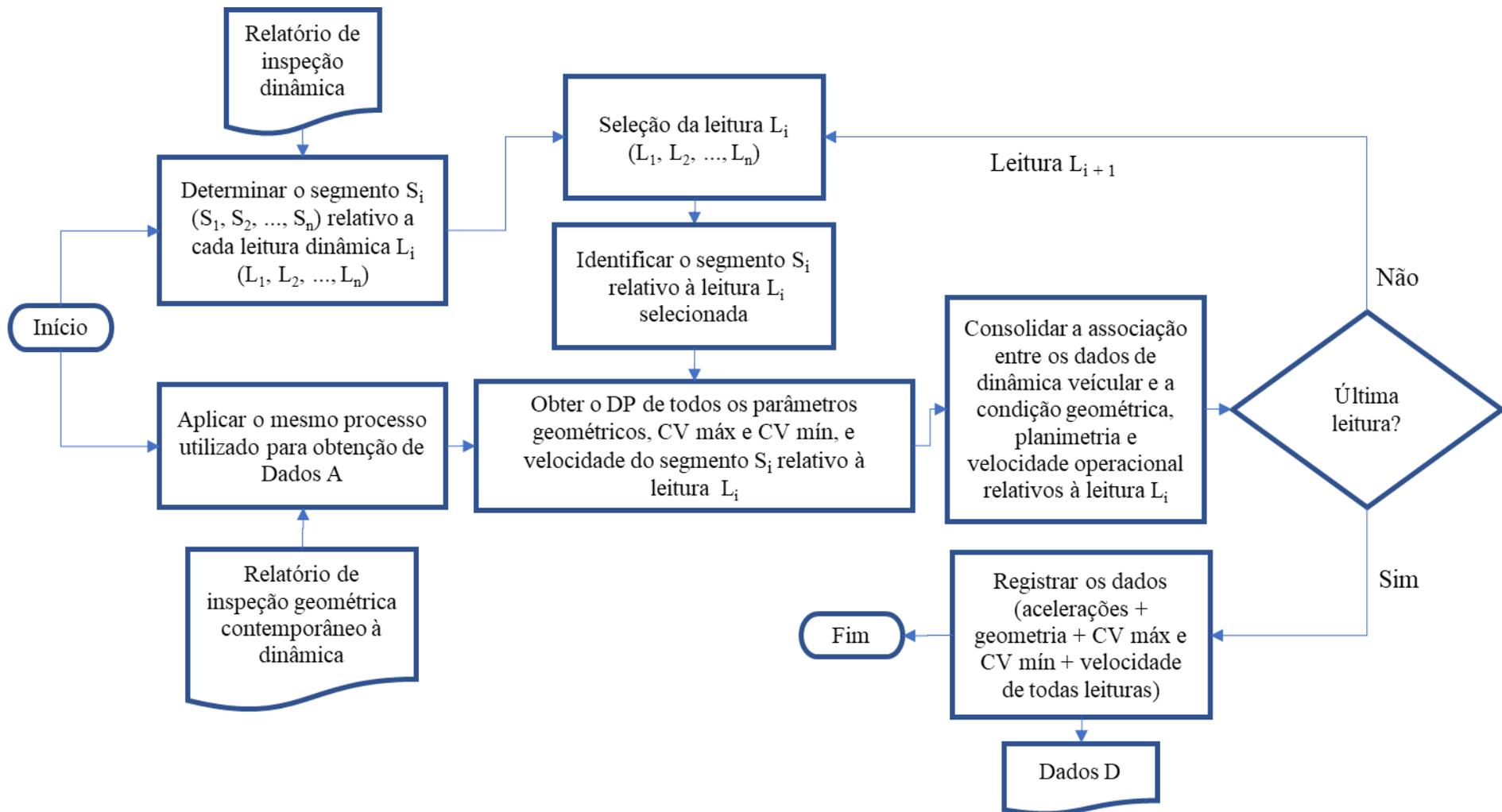


Figura 5.5: Fluxograma 4 – Operação de preparação dos dados a serem utilizados para obtenção dos modelos de correspondência entre as acelerações e a geometria.

A meta dos processos apresentados na figura anterior é associar o comportamento dinâmico do material rodante às características físicas e operacionais da via permanente.

Inicialmente fazem-se necessárias duas ações independentes, sendo a primeira relativa à identificação do segmento ao qual pertence cada leitura dinâmica, visando permitir que posteriormente sejam estabelecidas as características operacional e da via permanente desse mesmo segmento. Por leitura dinâmica se designa o registro das acelerações vertical e horizontal que o veículo de inspeção adquiriu durante passagem por um determinado ponto da via permanente. Portanto, um relatório de inspeção dinâmica é composto por diversas leituras em quantidade igual ao número de pontos de medição, que será tanto maior quanto menor for o intervalo entre cada leitura.

Em paralelo, é obtida a condição da geometria na época em que foi feita a inspeção dinâmica, e para tanto é utilizado o relatório de inspeção geométrica contemporâneo à dinâmica, sendo empregada a mesma operação descrita no Fluxograma 1 (Figura 5.2), para definição do DP de cada parâmetro e em cada um dos segmentos da via, além do registro do CV máx e CV mín e também da velocidade de circulação dos veículos nos segmentos.

Em seguida, tem início a associação entre os dados dos relatórios dinâmico e geométrico, em que a primeira leitura dinâmica é selecionada e identificado o segmento da via ferroviária ao qual pertence. Posteriormente, o estado da geometria, planimetria e velocidade operacional relativas a esse segmento são obtidas e associadas às respectivas leituras de aceleração vertical e horizontal. O processo é repetido até a última leitura dinâmica disponível no relatório. Ao final os dados são registrados em uma pasta de trabalho intitulada "Dados D".

O banco Dados D fornece o conjunto de informações necessárias para formulação das equações foco dessa etapa, cuja obtenção é descrita pela operação apresentada na Figura 5.6 a seguir.

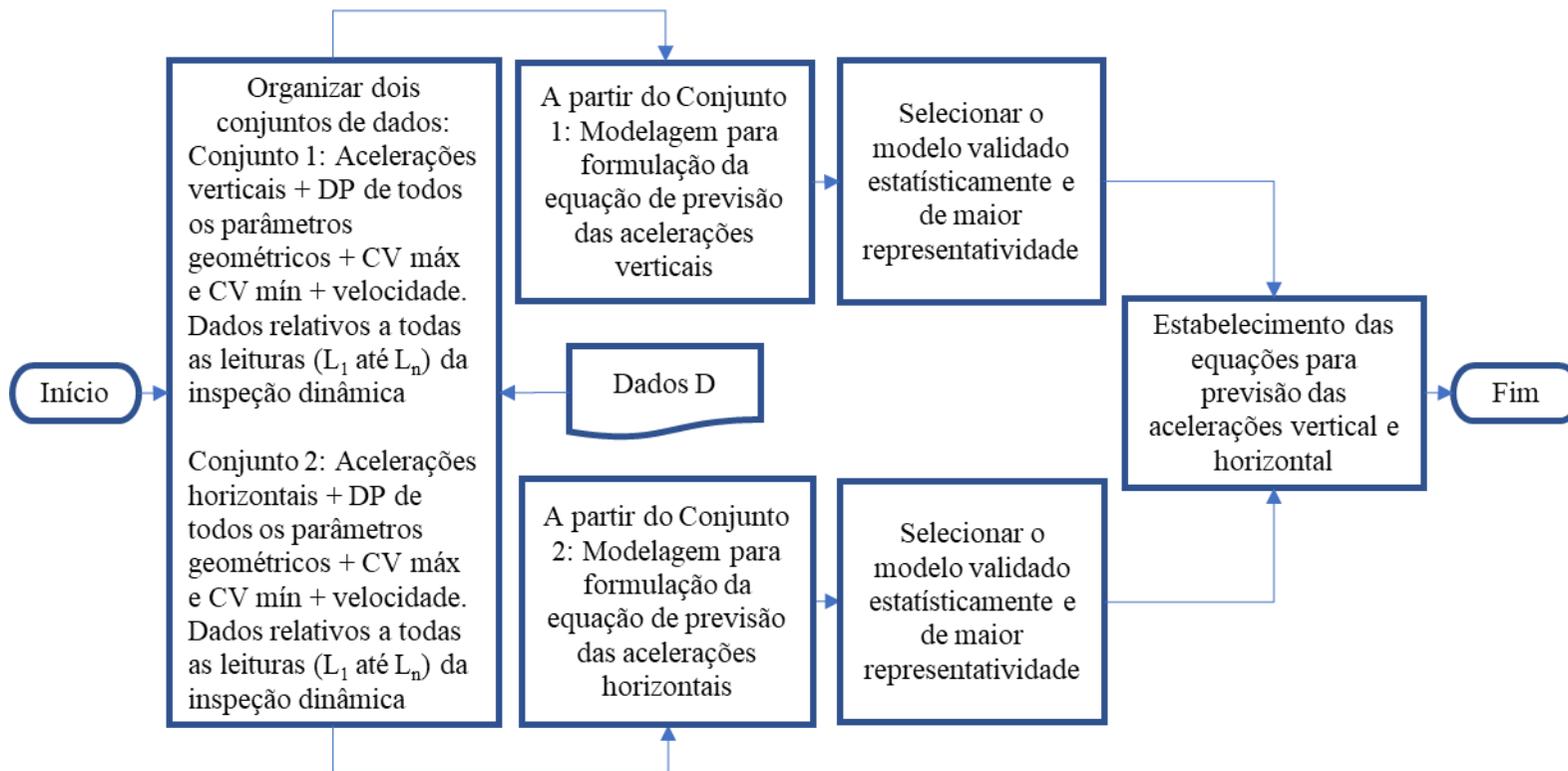


Figura 5.6: Fluxograma 5 – Operação para obtenção das equações dos modelos de correspondência entre as acelerações e a geometria.

O Fluxograma 5 inicia-se com a organização das informações provenientes de Dados D de modo a formar dois conjuntos de dados. Cada leitura dinâmica é composta por um registro de aceleração vertical e horizontal associados aos valores de DP de todos os parâmetros geométricos inspecionados, além do CV máx e CV mín e da velocidade operacional do respectivo segmento da via. A organização dos dados consiste em separar os registros de acelerações horizontais dos demais, formando, com os retidos, o Conjunto 1 que subsidiará a formulação do modelo de previsão das acelerações verticais, e, posteriormente, repetir o processo, separando o registro das acelerações verticais, formando, com os retidos, o conjunto 2 destinado à formulação do modelo de previsão das acelerações horizontais.

Os modelos matemáticos para previsão das acelerações podem ser expressos como:

$$ac_j = f(g, p, v) \quad (34)$$

Onde

ac_j é a aceleração j (vertical – ac_V – ou horizontal – ac_H) que o veículo adquire em relação à via permanente;

g é o estado da geometria da via permanente expressa pelo TQI de cada parâmetro geométrico;

p refere-se à planimetria da via, expressa por CV máx e CV mín;

v é a velocidade operacional.

Recomenda-se que seja empregada a velocidade em que trafegou o veículo de inspeção dinâmica. Alternativamente, caso esse dado não esteja disponível, sugere-se o uso da velocidade do carro controle, disponível nos relatórios de inspeção geométrica. Entende-se que essa opção é viável, pois as restrições de velocidade ao longo da via são impostas a todos os veículos que por ela circulam, logo, a velocidade do carro controle e do veículo que realizou a inspeção dinâmica, se não as mesmas, provavelmente são semelhantes.

As equações ac_j são formuladas por meio da técnica estatística de regressão múltipla, tomando como variável dependente do modelo a aceleração j sob análise, e

como variáveis independentes as demais variáveis. Tal procedimento está baseado em Ratton Neto (1985) que o empregou para estabelecer modelos de correspondência entre as acelerações e o estado da via.

Posteriormente à organização dos dados, o processo de modelagem para obtenção das equações ac_j consiste do ajustamento de curvas de regressão visando identificar o modelo mais representativo para previsão da aceleração j . O objetivo desse processo é estabelecer as características dos modelos no que diz respeito às variáveis independentes a serem consideradas e sua relação com a variável dependente em função do tipo de aceleração a ser prevista.

Será selecionado o par de modelos de referência, ou seja, as equações ac_V e ac_H a serem utilizadas nas demais etapas do procedimento, validados estatisticamente, empregando para tanto o teste de hipóteses baseado na distribuição F de Fischer-Snedecor, em que serão consideradas válidas as equações que obtiverem valores de probabilidade (*p-value*) para o referido teste inferiores a 0,05. Dentre os modelos válidos de uma mesma família de equações ac_j , será selecionado aquele de maior representatividade, ou seja, que apresente a maior capacidade de explicar o comportamento da variável dependente. Para tanto serão analisados o coeficiente de determinação ajustado (R^2 ajustado) e os critérios de informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC).

Formulados modelos que atendam a todos os critérios em questão, conclui-se os processos do quinto fluxograma e alcança-se o objetivo da segunda etapa do procedimento proposto.

Devido à falta de padronização na forma como as inspeções geométricas são realizadas, em função do equipamento de inspeção utilizado, e da configuração adotada pelos inspetores, os dados gerados podem variar entre ferrovias. Por isso, os modelos de regressão expressam as particularidades do trecho ferroviário sob estudo, não sendo generalizáveis.

Para exemplificar como este processo pode ser empregado, o Capítulo 6 apresenta sua aplicação em um trecho ferroviário, e o Apêndice II apresenta a modelagem das equações ac_j utilizadas nessa aplicação.

5.3 Adaptação dos Modelos de Previsão das Acelerações

A terceira etapa do procedimento de planejamento de manutenções tem por objetivo formular modelos para previsão das acelerações verticais e horizontais em função do intervalo entre manutenções geométricas.

Essa meta é alcançada por meio da substituição das variáveis relativas ao estado da geometria nos modelos de previsão das acelerações (Equação 34), pelas correspondentes equações de degradação geométrica formuladas na primeira etapa para cada um dos parâmetros geométricos sob análise, resultando na equação geral:

$$ac_{jnT} = f(D_{1nT} + \dots + D_{inT}, p_n, s_n) \quad (35)$$

Onde

ac_{jnT} é a aceleração j do segmento n sob análise, no momento T ;

D_{1nT} é o modelo de previsão da condição geométrica correspondente ao primeiro parâmetro da série analisada, que foi formulado na primeira etapa do procedimento para o segmento n em questão;

D_{inT} é o modelo de previsão para o segmento n correspondente ao parâmetro i , o último da série de parâmetros geométricos analisada;

p_n são os valores CV máx e CV mín do segmento n ;

s_n é a velocidade operacional no segmento n .

A Equação 35 possui estruturação conceitual, já que o número de variáveis consideradas em função da aceleração j prevista, depende das características dos modelos ac_j formulados na etapa precedente.

Os processos necessários para formulação das equações ac_{jnT} estão apresentados na figura a seguir.

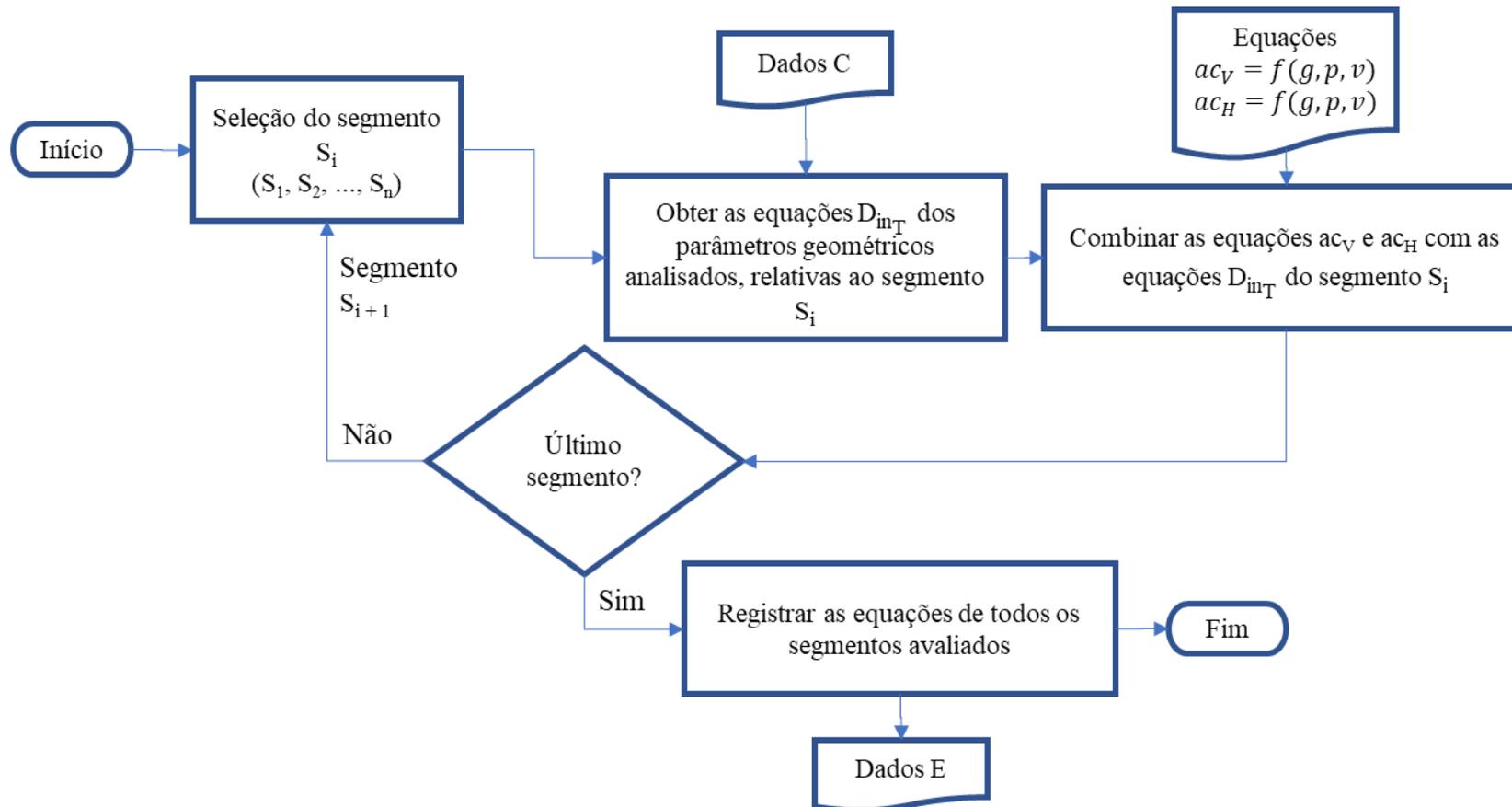


Figura 5.7: Fluxograma 6 – Operação para adaptação das equações de previsão das acelerações.

O Fluxograma 6 se inicia com a seleção do primeiro segmento. Posteriormente, são buscados no banco Dados C as equações D_{inT} do segmento n sob análise relativas aos parâmetros geométricos considerados pelos modelos ac_j , sendo que, em seguida, esses modelos são modificados com a substituição das variáveis relativas ao estado de degradação dos parâmetros pelas respectivas equações D_{inT} do segmento, fazendo com que as equações de previsão das acelerações passem a ser específicas do segmento n sob análise e a ter os valores das acelerações calculados em função de T (MTBT).

Essa alteração permite que posteriormente sejam calculadas as acelerações vertical e horizontal em função do intervalo TM_{in} entre manutenções geométricas, bem como para qualquer outro intervalo (T) que se deseje avaliar.

A partir da adaptação dos modelos ac_j cada segmento analisado no trecho ferroviário terá o seu próprio par de equações para previsão das acelerações.

Ao final, tendo sido considerados todos os segmentos válidos, as equações são registradas dando origem a pasta intitulada "Dados E".

5.4 Simulação de Padrões de Intervenção e Seleção da Política de Manutenção de Menor Custo

O objetivo desta etapa é definir a frequência de manutenção geométrica de referência para cada segmento analisado. Essa frequência será aquela que atender a todos os seguintes critérios:

1. Garantir a segurança operacional sob critério geométrico;
2. Garantir a segurança operacional sob critério dinâmico;
3. Resultar no menor custo total possível em longo prazo.

O Fluxograma 7 apresentado na Figura 5.8 descreve a operação para alcançar tal objetivo.

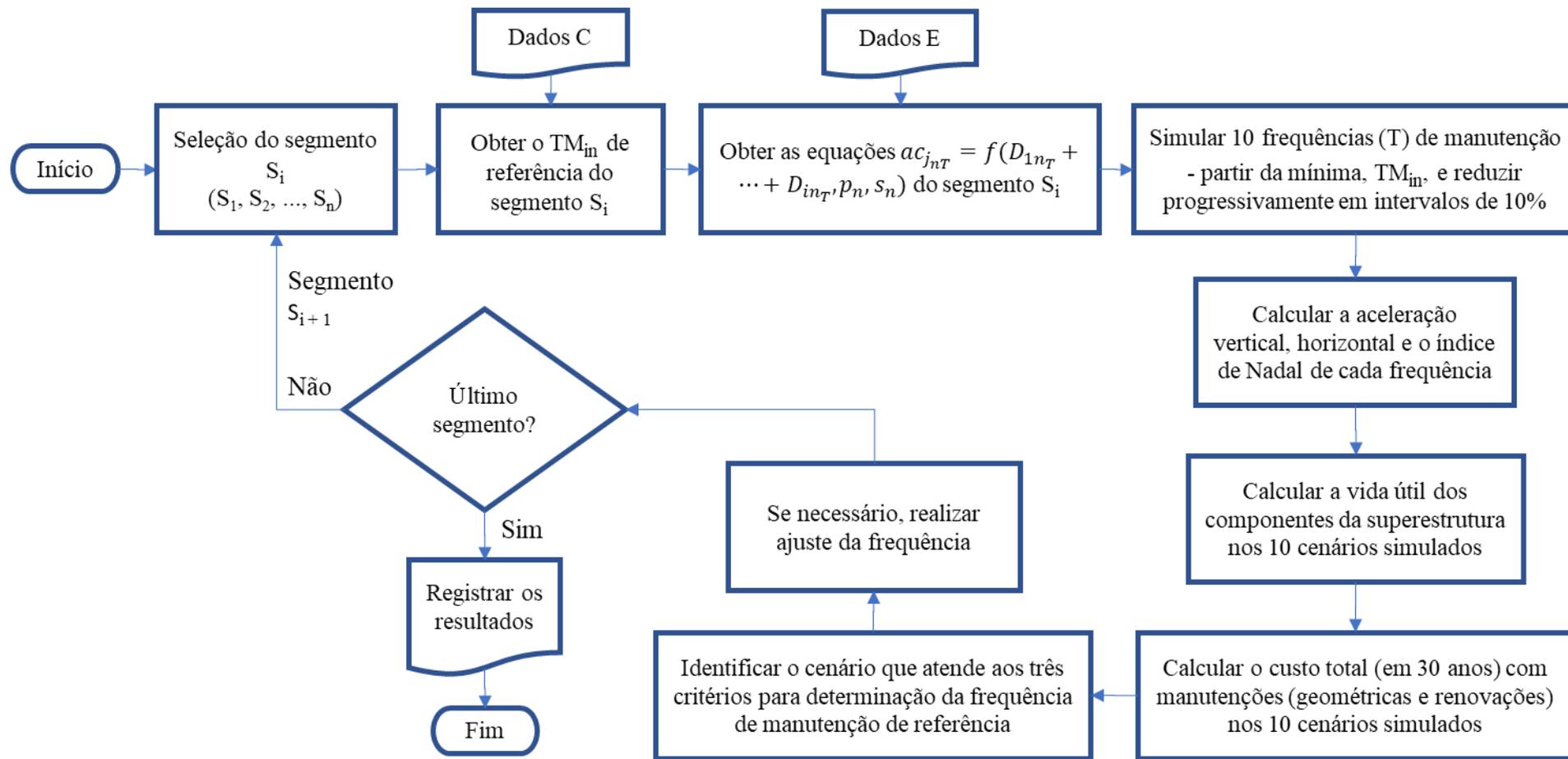


Figura 5.8: Fluxograma 7 – Operação para determinação da frequência de manutenção de referência.

Após a seleção do primeiro segmento, é buscada no banco Dados C a frequência mínima de manutenção geométrica (TM_{i_n}) desse segmento. Em seguida, são obtidas do banco Dados E as equações para estimar as acelerações específicas desse segmento. Então são delineados 10 cenários administrativos, caracterizados cada um por uma frequência de manutenção geométrica específica, que no primeiro cenário corresponde à frequência mínima TM_{i_n} , sendo aumentada nos demais cenários em intervalos padronizados de 10%. Logo após, são calculadas as acelerações horizontais e verticais em cada um dos cenários.

A estimação das acelerações torna possível verificar se as frequências de manutenção são capazes de garantir a operação segura sob critérios de avaliação do equilíbrio da dinâmica veicular. Portanto, com os valores das acelerações vertical e horizontal previstas, a segurança dinâmica será avaliada por meio do critério de Nadal, com a definição da tolerância dinâmica na ferrovia analisada feita por meio da Equação 5.

A avaliação da segurança operacional utilizando o critério de Nadal requer a análise da razão entre as forças laterais (horizontais) e as cargas verticais aplicadas pelas rodas sobre os trilhos. As forças são uma grandeza física proveniente do produto entre a massa do objeto e sua aceleração. Conhecido o peso/roda e previstas as acelerações do veículo em relação à via, torna-se possível estima-las. Entretanto, o ponto em que são medidas as acelerações no veículo influi na análise, pois qualquer medição realizada acima dos *axle-boxes* terá sofrido influência das suspensões, com as acelerações sendo amenizadas. Se o relatório de inspeção dinâmica tiver sido originado em inspeção em que os acelerômetros foram instalados nos veículos acima das suspensões, primária ou secundária, a magnitude das acelerações registradas terá sido afetada e as acelerações previstas pelas equações ac_j guardarão a mesma ordem de grandeza. Portanto, nesses casos é preciso dispor de modelos matemáticos que, considerando as características de funcionamento das suspensões, permitam calcular as forças em questão à altura da roda a partir de acelerações estimadas em pontos acima delas. Exemplos de formulações deste tipo são aquelas desenvolvidas pela *Japan Railway Technical Service* (Jarts) para o sistema de trens urbanos do Rio de Janeiro, apresentadas na Seção 3.5 deste trabalho.

Em cada um dos cenários simulados a avaliação da segurança sob critério dinâmico é feita mediante a comparação da razão entre as forças laterais e as cargas

verticais previstas e a respectiva tolerância obtida a partir da Equação 5. Valores abaixo da tolerância indicam operação segura.

Posteriormente, a vida útil dos componentes é calculada em cada um dos cenários, sendo que, para tanto, consideram-se as cargas dinâmicas aplicadas pelos veículos sobre os trilhos. Por meio dos modelos anteriormente formulados estimam-se as acelerações verticais e correspondentes cargas dinâmicas, assim, é possível medir o impacto que a condição dinâmica fruto de padrões alternativos de manutenção geométrica possuem sobre o ritmo de degradação dos componentes. Em outras palavras, essa estruturação possibilita analisar a influência da frequência de manutenção geométrica sobre os ciclos de renovação, aspecto esse, elementar no âmbito dos objetos de análise delimitados na Seção 1.1 desta Tese.

Devido à complexidade em se obter um banco de dados de longa data que viabilize essa análise mediante ferramentas estatísticas, esse trabalho adotou para o cálculo da vida útil dos componentes as formulações propostas por Rodrigues (1983). Essa escolha teve como fundamento o fato de que as equações em questão foram desenvolvidas a partir das especificidades do sistema ferroviário brasileiro, além do que, apresentam variáveis que consideram as particularidades do trecho ferroviário. Todavia, para atender às necessidades da presente pesquisa, tais formulações precisaram ser modificadas. Sendo assim, a Equação 14 foi adotada como padrão para calcular a vida útil dos trilhos por desgaste. No produtório de 8 fatores que integra a equação, o fator k_5 diz respeito à carga por eixo dos veículos, conseqüentemente, variável de interesse neste contexto, pois pôde ser ajustada para considerar os efeitos das acelerações dos veículos em relação à via. Originalmente os seus valores são fixos, como apresentado na Tabela 13:

Tabela 13: Fator função da carga por eixo adotado originalmente na Equação 14

Variação da carga por eixo, em t	Fator k_5
$\leq 13,6$	1,1534
13,6 - 19,0	1,0000
19,0 - 21,0	0,9639
21,0 - 23,0	0,9120
23,0 - 25,0	0,8599
25,0 - 27,0	0,7739
27,0 - 29,0	0,6437
29,0 - 31,0	0,5167
31,0 - 33,0	0,3520
$> 33,0$	0,3254

Fonte: Rodrigues (1983).

A modificação em questão consistiu em formular uma equação que permita calcular um valor específico para o fator k_5 em função de qualquer carga que se deseje avaliar, por consequência, conferindo à Equação 14 maior sensibilidade às variações de carga em função dos movimentos (acelerações) dos veículos. Nesse propósito, inicialmente os dados da tabela anterior foram alterados conforme apresentado na Tabela 14, com a adoção da mediana dos intervalos de carga por eixo.

Tabela 14: Adaptação da Tabela 13

Varição da carga por eixo, em t	Fator k_5
13,6	1,1534
16,3	1,0000
20,0	0,9639
22,0	0,9120
24,0	0,8599
26,0	0,7739
28,0	0,6437
30,0	0,5167
32,0	0,3520
33,0	0,3254

Então, foi ajustada uma curva aos valores da tabela acima, conforme Figura 5.9, cuja correspondente função $k_5 = f(t)$ (Equação 36) passou a ser utilizada como forma de determinação do fator k_5 na Equação 14, em substituição à Tabela 13.

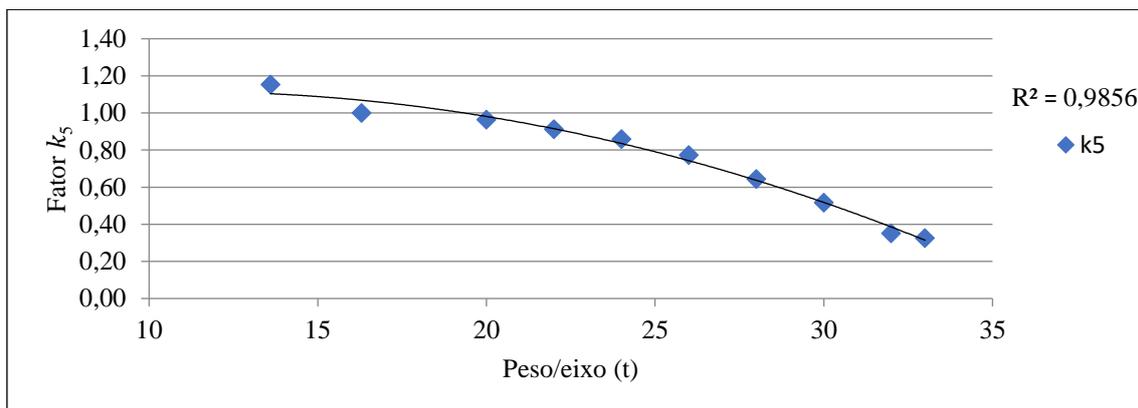


Figura 5.9: Ajuste do modelo de previsão do fator k_5 para trilhos.

$$k_{5t} = -0,0017t^2 + 0,0365t + 0,9133 \quad (36)$$

Onde

k_{5t} é o valor do fator k_5 a ser utilizado para estimar a vida útil de trilhos na Equação 14;

t é a carga/eixo, em toneladas.

Com relação à previsão da vida útil dos trilhos devido à fadiga, foi adotado como padrão a Equação 20, que já prevê dentre suas variáveis a carga aplicada sobre o trilho.

Quanto à vida útil dos dormentes, Rodrigues (1983) foi o único autor que forneceu um modelo (Equação 21), limitado, todavia, à análise dos dormentes de madeira. Fez-se também necessária sua adaptação, a mesma empregada para a equação de previsão da vida útil dos trilhos por desgaste. Assim, a Tabela 15 original, foi modificada conforme Tabela 16, e a curva ajustada aos dados (Figura 5.10) estabeleceu a Equação 37.

Tabela 15: Fator k_5 utilizado para cálculo da vida útil de dormentes adotado na Equação 21

Variação da carga por eixo, em t	Fator k_5
$\leq 13,6$	1,2931
13,6 - 19,0	1,0000
19,0 - 21,0	0,8793
21,0 - 23,0	0,7994
23,0 - 25,0	0,7328
25,0 - 27,0	0,6764
27,0 - 29,0	0,6281
29,0 - 31,0	0,5862
31,0 - 33,0	0,5496
$> 33,0$	0,5172

Fonte: Rodrigues (1983).

Tabela 16: Adaptação da Tabela 15

Variação da carga por eixo, em t	Fator k_5
13,6	1,2931
16,3	1,0000
20,0	0,8793
22,0	0,7994
24,0	0,7328
26,0	0,6764
28,0	0,6281
30,0	0,5862
32,0	0,5496
33,0	0,5172

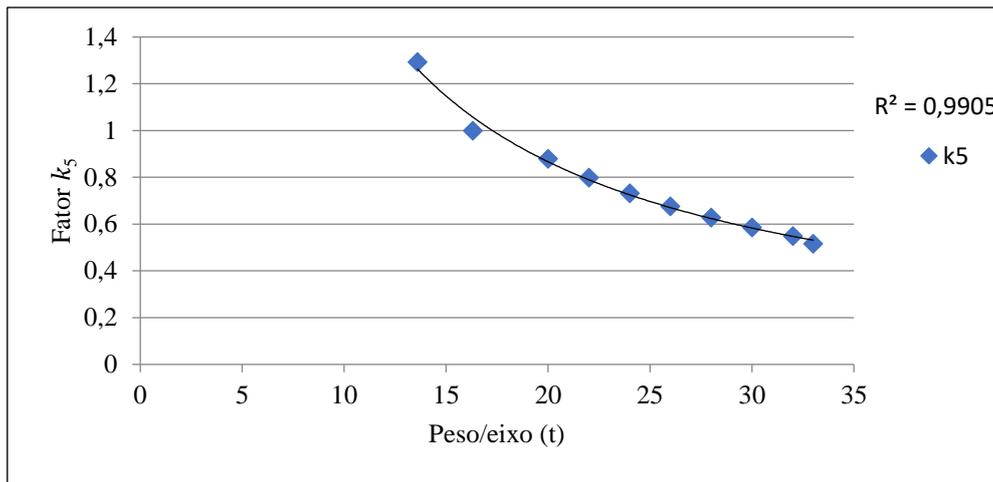


Figura 5.10: Ajuste do modelo de previsão do fator k_5 para dormentes.

$$k_{5d} = 16,157t^{-0,977} \quad (37)$$

Onde

k_{5d} é o valor do fator k_5 a ser utilizado para estimar a vida útil de dormentes de madeira na Equação 21;

t é a carga/eixo, em toneladas.

Quanto aos demais componentes da fixação, recomenda-se adoção das equações apresentadas na Tabela 11, já que foram as únicas formulações obtidas da literatura. Vale notar que essas equações condicionam suas vidas úteis à vida útil dos trilhos, e como esta será ajustada considerando as cargas dinâmicas segundo o modelo acima apresentado, o tempo de uso dos itens em questão estimado por meio das respectivas equações levará em conta indiretamente o efeito das acelerações. Se estes elementos forem substituídos em conjunto com outro componente (trilhos, dormentes, ou ambos em conjunto) a referência a ser adotada será a vida útil do item em questão.

Sobre o lastro, tendo em vista que no contexto nacional é comumente adotada a sistemática de recomposição do material a cada intervenção de manutenção geométrica, foi adotada a sistemática de Rodrigues (1983) que indica descarga complementar de 12% de lastro novo a cada serviço de socaria e 52% na quinta intervenção. Portanto, sua vida útil estará atrelada ao ciclo de manutenção geométrica, não sendo necessário prever seu tempo de uso.

Se as acelerações que subsidiaram a formulação dos modelos de previsão da condição dinâmica tiverem sido obtidas mediante instrumentação dos *axle-boxes*, a previsão das cargas dinâmicas poderá ser feita mediante o produto entre o peso/roda e as acelerações verticais. Contudo, caso sejam empregadas técnicas de inspeção inerciais com leituras feitas acima das suspensões primária ou secundária, recomenda-se o uso de modelos específicos que considerem o efeito das suspensões. As Equações 6 e 7 são um exemplo de formulações desenvolvidas para o uso de dados provenientes de leituras realizadas no interior dos veículos, contudo, por estes modelos estarem atrelados às características da ferrovia e veículos a partir dos quais foram desenvolvidos, seu emprego está limitado.

As vidas úteis calculadas delimitam uma referência quanto à frequência de renovação dos componentes, que associadas à frequência de manutenção geométrica, permitem calcular a quantidade de intervenções a serem executadas em cada cenário administrativo simulado, sendo necessário para isso considerar um horizonte administrativo de referência. Esse cálculo é feito mediante as seguintes equações:

$$MMG_{t_n} = \frac{t}{TM_{nF}} \quad (38)$$

Onde

MMG_{t_i} é a quantidade de manutenções geométricas a serem realizadas no período t , no segmento n sob análise;

t é o período padrão, horizonte administrativo de planejamento;

TM_{nF} é a frequência F de manutenção geométrica simulada no cenário considerado, no segmento n sob análise. Esta deverá estar em unidade temporal, determinada considerando o MTBT médio transportado no trecho ferroviário analisado.

$$MR_{tC_n} = \frac{t}{VU_{TM_{nFC}}} \quad (39)$$

Onde

MR_{tC_n} é a quantidade de renovações a serem realizadas ao longo do período t de planejamento, para o componente C , no segmento n sob análise;

t é o período padrão de planejamento;

$VU_{TM_{nFC}}$ é a vida útil estimada em função do TM_{nFC} considerado no cenário avaliado, para o componente C .

A princípio, pode-se adotar qualquer período t em função dos objetivos organizacionais, contudo, tendo em vista a longa vida útil dos sistemas ferroviários, e a proposta de retornar benefícios em horizontes administrativos de longo prazo, recomenda-se que seja adotado período superior a 20 anos. Visando o aproveitamento nacional do procedimento, fica recomendada a análise em período de 30 anos, mesmo período das concessões ferroviárias brasileiras.

Caso seja adotado o padrão de renovação com todos os componentes sendo substituídos ao mesmo tempo, $VU_{TM_{nFC}}$ será relativo ao componente de menor vida útil. Caso seja feita a renovação independente, serão calculados MR_{tC_n} próprios para cada componente C avaliado.

A partir dessa quantidade de intervenções e utilizando custos unitários para execução dos serviços, é calculado o custo do ciclo de vida do sistema de manutenções nos cenários, ou seja, o CCV dos segmentos de 200 m. Esse cálculo é realizado por meio das Equações 40 e 41.

$$Ct_{mn} = N_{mn} \cdot Cun_m \quad (40)$$

$$CCV_n = \sum_{m=1}^u Ct_{mn} \quad (41)$$

Onde

Ct_{mn} é o custo total com manutenções do tipo m no segmento n sob análise;

N_{mn} é o número de intervenções do tipo m no segmento n durante o período considerado;

Cun_m é o custo unitário para execução da manutenção do tipo m na extensão de 200 m;

CCV_n é o custo do ciclo de vida de manutenções no segmento n durante o período considerado;

$\sum_{m=1}^u Ct_{mn}$ é o somatório para o segmento n dos custos totais das manutenções do tipo Ct_{mn} ($m = 1, \dots, u$):

Ct_1 = Custos com manutenções geométricas;

Ct_2 = Custos com renovações, com $m = 2$ no caso de renovação conjunta ou m variando de 2 até u caso os componentes sejam renovados de forma independente (Ex. $m = 2$ para renovação de trilhos, $m = 3$ para renovação de dormentes, $m = u$ para renovação do último componente substituído de maneira independente).

Os custos unitários a serem empregados nessas equações são estabelecidos em função do comprimento dos segmentos sob análise. O Apêndice III deste documento, apresenta formulações para determinação de custos unitários para os serviços de manutenção.

Calculado o CCV resultante de cada padrão de intervenção simulado no segmento n , na sequência do fluxograma é identificado o cenário que atende aos três critérios estabelecidos no início dessa subseção.

Quando necessário, a frequência de intervenção do cenário selecionado é ajustada de modo a obter a mínima frequência que atenda à tolerância dinâmica, geométrica e resulte no menor CCV. Esse ajuste pode ser necessário devido à diferença de 10% entre as frequências dos cenários simulados.

Na sequência, o processo se repete até que todos os segmentos válidos sejam analisados, e, ao final, alcança-se o objetivo dessa etapa e do próprio método proposto, com o registro das frequências de referência para manutenção, específicas de cada segmento, que configuram-se, portanto, como a política de manutenção de menor custo a ser adotada como referência para o trecho ferroviário sob análise.

O procedimento foi concebido de forma a estabelecer padrões de manutenção próprios para cada segmento de 200 m de via analisada. A depender das janelas operacionais disponíveis para intervenção no trecho ferroviário e da produtividade das operações de manutenção, essa extensão pode ser considerada limitada (pequena), tendo em vista os custos inerentes à mobilização e deslocamento de maquinário e equipes para

manutenção de trechos de 200 m quando houver possibilidade de intervir em maiores extensões.

Conseqüentemente, recomenda-se que, tomando como subsídio as janelas operacionais para intervenção, o tempo de deslocamento até os pontos de manutenção, a produtividade da operação de manutenção, assim como os correspondentes custos, sejam consideradas intervenções oportunistas de forma contínua ao longo de segmentos contíguos, múltiplos de 200 m, sendo que nesse caso o momento de manutenção será definido pelo segmento do conjunto com a maior frequência de intervenção calculada pelo procedimento, visando com isso resguardar a segurança operacional.

6. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

Este capítulo apresenta a aplicação do procedimento em uma ferrovia brasileira.

6.1 Características do Trecho Ferroviário Analisado

A ferrovia em questão transporta exclusivamente passageiros em um sistema localizado em uma metrópole nacional. Sua superestrutura é formada por vias duplicadas e lastradas em bitola larga (1.600 mm), sendo utilizados dormentes de madeira e concreto, fixações elásticas e trilhos TR-57. As composições são formadas por trens unitários com tração elétrica (TUEs), com peso por eixo estático de 19 toneladas, que trafegam a velocidade máxima de 60 km/h.

A operação obedece a horários programados para a circulação dos trens, que não variam ao longo do tempo. O tráfego é interrompido no período noturno, sendo nesse período realizadas as intervenções de manutenção da via permanente, indicando, portanto, que nesta aplicação não são considerados prejuízos financeiros decorrentes de atrasos na circulação dos trens devido à execução das manutenções na via.

Como a extensão do trecho analisado não influencia nos resultados do procedimento, a aplicação se restringiu a uma via de um ramal com 48 km de extensão.

O banco de dados utilizado tem a seguinte composição:

- Histórico de inspeções geométricas: composto por 542 relatórios relativos a inspeções realizadas entre os anos de 2016 e 2021, em frequência de, aproximadamente, 10 medições anuais por trecho. As inspeções foram realizadas por meio de carro controle fabricado pela *Plasser&Theurer*, e cujos relatórios apresentam medições de 18 parâmetros geométricos, com leituras feitas em intervalos de 25 cm. Além desses registros outras informações como a velocidade do veículo e a planimetria (graus de curva) também foram registradas. A Tabela 17 apresenta os parâmetros geométricos e suas características. Deve-se atentar, nessa tabela, à coluna intitulada Identificação do parâmetro, pois nomeia os parâmetros i , cuja denominação foi utilizada no decorrer do procedimento;

Tabela 17: Parâmetros geométricos inspecionados e características do processo de medição

Identificação do parâmetro	Parâmetro (denominação original no registro do carro controle)	Parâmetro (definição em português)	Características
P ₁	LPROF31	Nivelamento (Niv.) longitudinal	Nivelamento do trilho esquerdo determinado a partir de base de medição de 31 pés ($\cong 9,5$ m)
P ₂	RPROF31	Niv. longitudinal	Nivelamento do trilho direito determinado a partir de base de 31 pés
P ₃	LALIGN31	Alinhamento (Al.) longitudinal	Alinhamento do trilho esquerdo determinado a partir de corda de medição de 31 pés
P ₄	RALIGN31	Al. longitudinal	Alinhamento do trilho direito determinado a partir de corda de 31 pés
P ₅	LPROF62	Niv. longitudinal	Nivelamento do trilho esquerdo determinado a partir de base de 62 pés ($\cong 19$ m)
P ₆	RPROF62	Niv. longitudinal	Nivelamento do trilho direito determinado a partir de base de 62 pés
P ₇	LALIGN62	Al. longitudinal	Alinhamento do trilho esquerdo determinado a partir de corda de 62 pés
P ₈	RALIGN62	Al. longitudinal	Alinhamento do trilho direito determinado a partir de corda de 62 pés
P ₉	LPROF124	Niv. longitudinal	Nivelamento do trilho esquerdo determinado a partir de base de 124 pés ($\cong 38$ m)
P ₁₀	RPROF124	Niv. longitudinal	Nivelamento do trilho direito determinado a partir de base de 124 pés
P ₁₁	LALIGN124	Al. longitudinal	Alinhamento do trilho esquerdo determinado a partir de corda de 124 pés
P ₁₂	RALIGN124	Al. longitudinal	Alinhamento do trilho direito determinado a partir de corda de 124 pés
P ₁₃	GAUGE	Bitola	-
P ₁₄	XLEVEL	Nivelamento transversal	-
P ₁₅	WARP_62	Empeno	Empeno determinado a partir de base de comprimento 62 pés
P ₁₆	TWIST_S	Torção	Torção determinada a partir de base “curta” ($S = short \cong 10$ m)
P ₁₇	TWIST_M	Torção	Torção determinada a partir de base “média” ($M = medium \cong 20$ m)
P ₁₈	TWIST_L	Torção	Torção determinada a partir de base “longa” ($L = longer \cong 40$ m)

- Relatório de inspeção dinâmica: apresenta o registro de acelerações verticais e horizontais medidas no interior dos veículos por meio de um pacote de acelerômetros portáteis que foi posicionado no piso da cabine dos TUEs. A Figura 6.1 apresenta o equipamento e ilustra o seu posicionamento no veículo.

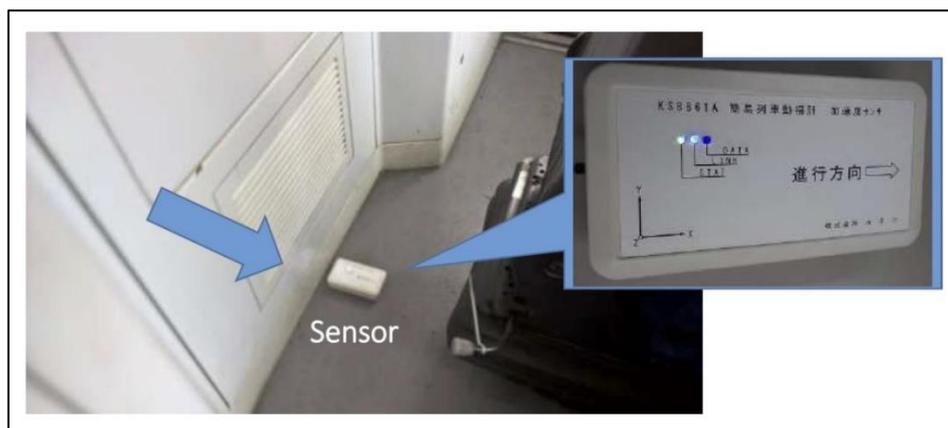


Figura 6.1: Pacote de acelerômetros utilizado na inspeção dinâmica.

Fonte: Lima (2019).

Nessa inspeção foram registradas apenas as acelerações em magnitude superior a um limite pré-determinado pelos inspetores, a saber, 0,4 g na direção vertical, e 0,3 g na horizontal. Estavam disponíveis um relatório por linha do sistema ferroviário em questão, relativos a inspeções realizadas ao longo do mês de março de 2021. Ilustrativamente, a Tabela 18 apresenta os cinco primeiros registros feitos no trecho ferroviário analisado.

Tabela 18: Conformação do relatório de inspeção dinâmica

CÓDIGO	DATA	DEFEITO VERT.	DEFEITO HORIZ.	LINHA	KM	ESTACA
23K090M	03/03/2021	0,14 G	0,32 G	1	23	90
23K110M	03/03/2021	0,09 G	0,37 G	1	23	110
26K740M	03/03/2021	0,27 G	0,49 G	1	26	740
26K750M	03/03/2021	0,15 G	0,34 G	1	26	750
28K310M	03/03/2021	0,20 G	0,32 G	1	28	310
28K460M	03/03/2021	0,44 G	0,21 G	1	28	460

Nas colunas intituladas DEFEITO VERT. e DEFEITO HORIZ. são apresentados os registros das acelerações verticais e horizontais, respectivamente, e nas demais colunas à direita são identificados o local da leitura, com a indicação da linha do sistema ferroviário, a posição quilométrica, e a posição em metros no referido quilômetro.

A empresa ferroviária não forneceu a densidade de transporte do trecho, nem os custos unitários dos serviços de manutenção. Por consequência, foi necessário adotar

como variável explicativa do processo de degradação geométrica o tempo transcorrido entre as inspeções. Por se tratar de um sistema de transporte de passageiros cujo padrão operacional é aproximadamente regular ao longo do tempo, acredita-se que essa característica não gerou distorções significativas nas estimativas do procedimento, tendo em vista que o volume transportado por unidade de tempo tende a ser semelhante. Ademais, foram descartados os dados relativos à períodos históricos em que ocorreram eventos com possível impacto no volume de passageiros transportados.

Com relação aos custos unitários dos serviços de manutenção, foi empregado método alternativo baseado no uso das composições de custo do relatório SICRO (2023) do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), conforme sugerido no Apêndice III.

As subseções seguintes apresentam os resultados obtidos na aplicação.

6.2 Formulação de Modelos de Degradação Geométrica

Seguindo o processo descrito pelo primeiro fluxograma do procedimento, o trecho ferroviário de 48 km de extensão foi subdividido dando origem a 240 segmentos de 200 m cada.

O período de análise para formulação dos modelos de degradação geométrica compreendeu o intervalo entre 01/01/2017 e 31/12/2019, sendo que o principal motivo para sua delimitação foi analisar a degradação no período de 2018, ano em que não ocorreram eventos de grande porte na cidade em que se encontra a linha ferroviária. A cidade em questão sediou um grande evento no ano de 2016 e, a partir de 2020, o sistema foi impactado pelos efeitos da pandemia do COVID-19. O período de quase um ano antes e após o ano de interesse foi considerado de modo a tornar o banco de dados extenso ao ponto de compreender o intervalo entre manutenções geométricas consecutivas. Esse detalhamento quanto à delimitação do período de análise possui relevância especificamente na aplicação ora apresentada devido à ausência de dados de MTBT da ferrovia em questão. Caso esse dado estivesse disponível, tais delimitações seriam dispensáveis, basicamente, podendo ser escolhido qualquer período.

Tendo sido determinado o período de análise, foram obtidos do banco de dados todas as inspeções realizadas nesse intervalo de tempo, no caso, 24 relatórios provenientes de inspeções feitas entre os meses de abril de 2017 e dezembro de 2019.

Posteriormente, procedeu-se à determinação do estado de degradação de cada parâmetro geométrico em cada segmento sob análise, e em todos os relatórios de inspeção. Inicialmente foi selecionado P_1 , dentre os 18 parâmetros apresentados na Tabela 17, e, como descrito no Fluxograma 1 (Figura 5.2), o cálculo do índice de qualidade da geometria (desvio padrão das deformações geométricas – DP) foi realizado até que todos os segmentos fossem analisados, ou seja, de S_1 até S_{240} . O processo foi repetido para os demais parâmetros, de P_1 até P_{18} . Essas operações foram realizadas em todos os relatórios das 24 inspeções geométricas (R_1 até R_{24}).

Registrados o grau de curva máximo e mínimo e a velocidade, foi consolidado o banco Dados A, composto por 24 pastas, sendo que em cada uma delas a planilha relativa ao DP possui 240 linhas relativas aos 240 segmentos, e 21 colunas, 18 delas relativas aos parâmetros geométricos, e as demais referentes à velocidade do carro controle e ao grau de curva máximo (CV máx) e mínimo (CV mín) do segmento. As Figuras 6.2 e 6.3 ilustram a conformação dessas pastas, apresentando aquela relativa ao conjunto Dados A obtida a partir do primeiro relatório (R_1 - inspeção realizada em 21/04/2017).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	MP	MPFT	SYNC_COUNT	SYNC_SAMPLE	SPEED	DIV_CODE	TRK_CLASS	POSTED_SPD	TRK_NUM	GRADIENT	ALD	LPROF31	LPROF62	LPROF124	RPROF31	RPROF62	RPROF124	LALIGN31	LALIGN62	LALIGN124
12390	25.00	0.00	5.00	1774.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	10.00	-9.50	9.07	-16.43	3.16	7.33	1.39	-7.34	-7.34	-18.12
12391	25.00	1.00	5.00	1775.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	10.00	-10.77	8.95	-17.57	2.05	7.41	-0.14	-4.98	-4.98	-16.19
12392	25.00	2.00	5.00	1776.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	10.00	-7.63	11.84	-15.10	1.73	7.88	-0.16	1.77	1.77	-9.35
12393	25.00	3.00	5.00	1777.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-10.51	9.50	-17.78	0.71	7.53	-1.25	2.77	2.77	-6.92
12394	25.00	4.00	5.00	1778.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-10.79	7.93	-18.92	-1.64	4.12	-3.36	5.94	5.94	-3.54
12395	25.00	5.00	5.00	1779.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-7.50	10.02	-15.97	-0.66	3.44	-3.11	3.95	3.95	-5.46
12396	25.00	6.00	5.00	1780.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-8.51	7.36	-17.88	-2.33	1.39	-5.12	4.99	4.99	-4.03
12397	25.00	7.00	5.00	1781.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-4.84	10.42	-13.86	-2.27	0.47	-4.95	-0.65	-0.65	-8.20
12398	25.00	8.00	5.00	1782.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-3.40	10.60	-12.58	-2.53	-0.12	-5.18	-4.70	-4.70	-10.80
12399	25.00	9.00	5.00	1783.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-2.35	9.53	-11.89	-2.60	-0.88	-5.01	-5.72	-5.72	-10.69
12400	25.00	10.00	5.00	1784.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-0.79	9.94	-10.90	-3.19	-0.60	-4.54	-6.50	-6.50	-10.74
12401	25.00	11.00	5.00	1785.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	-0.36	10.24	-9.22	-2.64	-0.53	-3.78	-8.03	-8.03	-11.69
12402	25.00	12.00	5.00	1786.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	1.12	10.38	-8.19	-2.44	-0.43	-3.04	-7.71	-7.71	-12.95
12403	25.00	13.00	5.00	1787.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	1.84	11.27	-6.80	-2.33	-0.87	-2.63	-6.42	-6.42	-12.17
12404	25.00	14.00	5.00	1788.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	2.56	10.63	-4.74	-1.91	-0.77	-2.06	-4.60	-4.60	-10.83
12405	25.00	15.00	5.00	1789.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	1.84	10.53	-2.11	-1.46	-0.29	-1.26	-3.90	-3.90	-9.94
12406	25.00	16.00	5.00	1790.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	3.64	10.09	-1.89	-1.95	-0.78	-0.86	-3.57	-3.57	-10.14
12407	25.00	17.00	5.00	1791.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	3.98	9.37	-1.11	-1.85	-1.36	-0.92	-3.61	-3.61	-9.88
12408	25.00	18.00	5.00	1792.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	2.69	9.07	0.52	-3.26	-1.95	-0.19	-4.35	-4.35	-10.01
12409	25.00	19.00	5.00	1793.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	3.06	7.42	-0.20	-3.23	-2.13	-0.57	-5.03	-5.03	-9.56
12410	25.00	20.00	5.00	1794.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	2.25	6.95	1.23	-3.62	-2.78	-0.65	-4.40	-4.40	-8.97
12411	25.00	21.00	5.00	1795.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	2.09	6.32	3.67	-3.53	-2.79	0.53	-5.83	-5.83	-8.46
12412	25.00	22.00	5.00	1796.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	1.56	5.00	2.58	-3.81	-2.77	-0.43	-6.74	-6.74	-6.03
12413	25.00	23.00	5.00	1797.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	1.27	4.90	2.28	-2.95	-1.53	0.13	-7.33	-7.33	-4.74
12414	25.00	24.00	5.00	1798.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	2.47	5.06	3.00	-2.95	-2.02	0.09	-7.74	-7.74	-3.64
12415	25.00	25.00	5.00	1799.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	1.91	4.13	2.56	-3.36	-2.81	-0.80	-7.66	-7.66	-4.82
12416	25.00	26.00	5.00	1800.00	44.00	0.00	3.00	80.00	1.00	0.00	-5.00	3.65	5.38	2.21	-2.24	-2.00	-1.86	-5.79	-5.79	-1.74

Figura 6.2: Planilha com os dados originais provenientes do relatório de inspeção geométrica realizada em 21/04/2017. No total são 155.556 linhas e 45 colunas. As colunas relativas aos parâmetros (à direita da coluna K) apresentam as leituras, em mm, das deformações geométricas na via. A coluna A apresenta o km em que foi feita a medição, e a coluna B a contagem da leitura no respectivo km, portanto, 0.00 indica a leitura no ponto 25 km + 000 m, 1.00 indica leitura no ponto 25 km + 000,25 m, e assim sucessivamente. Essas colunas foram utilizadas para identificação dos 240 segmentos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	Segmento	LPROF31	RPROF31	LALIGN31	RALIGN31	LPROF62	RPROF62	LALIGN62	RALIGN62	LPROF124	RPROF124	LALIGN124	RALIGN124	GAUGE	XLEVEL	WARP_62	TWIST_S	TWIST_M	TWIST_L	SPEED	MÁX	MÍN	
2	1	8,81393	9,16145	0	0	37,5935	31,1456	0	0	40,2642	14,2244	0	0	5,94372	21,3055	22,3783	10,025	15,5465	17,2825	12,2837	-0,04	-2,4	
3	2	7,95025	7,24553	0	0	9,49128	9,41545	0	0	31,3344	31,6026	0	0	6,53368	28,2595	9,47349	5,50726	7,37349	7,69324	24,9391	1,54	-1,89	
4	3	5,94799	5,85702	0	0	13,1405	12,2216	0	0	21,0558	25,7806	0	0	5,76324	19,7246	9,66485	5,67178	7,19691	8,43728	18,3212	1,58	-0,09	
5	4	9,29994	9,69868	0	0	18,82	26,0953	0	0	53,9025	52,4816	0	0	7,93688	10,7279	13,2718	8,33187	11,5778	12,6751	16,1477	4,41	-4,05	
6	5	12,5661	11,557	4,24223	4,89817	22,5035	22,7327	4,24223	4,89817	59,6286	55,5457	0	0	8,35706	66,2406	19,9529	7,1414	11,542	14,659	24,5855	4,38	-2,94	
7	6	3,90442	5,46419	4,67675	5,26538	5,37178	7,14978	4,67675	5,26538	8,60743	23,5049	5,69122	6,4557	5,40132	9,33392	9,40594	5,65794	6,4773	7,0607	36,9533	4,01	3,76	
8	7	4,95641	4,33551	5,96014	4,3319	6,92899	4,73134	5,96014	4,3319	13,5998	9,61153	46,6343	46,9463	4,85514	53,7992	11,9094	4,8046	7,04887	8,58267	43,8121	4,34	0,07	
9	8	7,33894	7,86501	4,20079	1,98591	8,15101	8,85451	4,20079	1,98591	13,1849	11,3164	9,49818	8,02254	3,70381	5,58568	7,24457	3,64662	5,53651	6,39985	48,5776	0,08	-0,09	
10	9	6,30133	6,79619	3,85179	1,86485	9,00918	8,37144	3,85179	1,86485	16,8689	13,0912	9,50192	9,15605	4,14093	8,14234	10,2954	5,41775	7,66282	8,61885	47,5851	0,02	-1,53	
11	10	5,21705	5,17893	5,30681	3,82713	5,84046	5,44135	5,30681	3,82713	10,2255	7,16887	25,4186	24,482	4,68706	34,8504	17,7334	5,42689	9,38078	12,0255	43,8449	0,6	-3,83	
12	11	4,29723	6,57243	4,08273	5,54761	6,22482	8,83319	4,08273	5,54761	19,806	17,1152	23,9625	23,5849	5,39167	39,3402	18,3411	6,41912	10,0807	13,2565	39,2137	4,3	0,62	
13	12	4,30387	6,29679	6,08021	8,34741	6,63843	7,75357	6,08021	8,34741	10,4419	15,9356	16,0707	16,2535	5,32342	10,0564	10,3819	5,69968	8,32241	9,36667	39,4981	4,47	2,69	
14	13	3,14786	4,21371	4,00599	5,02398	3,41337	5,88877	4,00599	5,02398	12,3312	13,3669	21,4692	21,1015	5,99302	8,23254	8,31852	3,99614	5,24677	6,44796	44,6561	3,96	2,91	
15	14	3,85017	3,75944	5,20096	4,49199	7,99894	6,07785	5,20096	4,49199	15,5651	10,7178	64,2343	64,8128	4,89119	84,304	8,24359	4,34214	6,12055	6,52507	47,2516	5,49	-3,88	
16	15	4,99072	2,52978	5,49647	5,24206	9,30082	4,90267	5,49647	5,24206	13,1413	6,81088	19,7212	21,4889	4,59024	10,7803	8,73113	5,06343	6,94249	7,7815	45,1631	-3,88	-4,69	
17	16	5,06408	2,86592	7,7963	4,17852	7,23981	4,08705	7,7963	4,17852	12,2779	6,99043	12,1876	10,95	6,64946	11,2059	8,04195	5,99117	7,04437	7,55499	44,207	-2,44	-4,56	
18	17	5,43357	2,80539	6,41054	3,39152	8,95332	4,66696	6,41054	3,39152	18,1071	11,3262	18,0675	15,5987	5,14329	6,00128	8,3269	5,29197	6,88157	7,17363	48,3664	-2,5	-4,99	
19	18	4,65277	2,9652	5,88065	3,85335	12,74	6,46326	5,88065	3,85335	27,2173	19,7064	24,7618	24,0251	5,14349	57,2016	15,7996	5,53485	9,65346	12,1459	51,2146	0,1	-4,94	
20	19	4,2843	4,31459	3,24421	6,12498	7,56417	5,29581	3,24421	6,12498	12,5362	6,60559	8,78328	9,21797	4,96652	6,12095	7,37463	3,60584	5,42736	6,22177	53,1832	0,08	-0,14	
21	20	4,65795	4,5891	2,59235	5,77298	8,70284	8,57145	2,59235	5,77298	18,8607	13,928	11,074	12,6503	5,06093	39,1018	12,1446	3,95367	6,59371	8,5563	53,256	1,64	-0,01	
22	21	3,4007	4,01323	2,85713	5,40668	6,51305	7,4292	2,85713	5,40668	12,1127	9,24699	10,4223	11,5426	4,59255	33,7554	11,3718	3,49774	5,86563	7,73836	51,5401	1,45	-0,09	
23	22	6,62255	6,19342	5,65217	4,60664	13,1425	10,2453	5,65217	4,60664	31,81	17,2941	16,5942	18,1559	5,96779	29,8675	14,4287	5,97449	9,98088	12,1211	50,2191	0	-1,5	
24	23	6,40057	7,32485	5,68702	2,84782	8,11216	8,84004	5,68702	2,84782	16,1708	12,641	11,0817	11,5809	5,01928	18,6224	6,63237	3,84355	5,12865	5,47795	48,8331	0,02	-1,56	
25	24	8,77714	8,86232	4,3192	2,91293	11,1404	10,1132	4,3192	2,91293	19,1228	13,2238	18,4944	14,4328	4,85422	11,88	14,5617	7,21025	10,8211	12,2044	48,735	0,16	-0,18	
26	25	6,83434	6,10199	4,37086	3,81407	9,89837	9,1762	4,37086	3,81407	16,4372	13,8303	10,424	10,3176	4,53826	5,96252	9,2681	6,09959	7,76641	7,99772	47,3274	0,12	-0,16	
27	26	6,19778	6,94917	4,9445	4,21498	13,9559	11,5353	4,9445	4,21498	34,7361	23,1072	21,3356	21,4981	4,40154	12,5998	13,388	6,02273	8,98724	9,99828	47,4419	0,74	-0,23	
28	27	4,68978	5,26628	2,12871	4,22459	6,32665	7,23496	2,12871	4,22459	8,85943	8,14327	10,3294	11,1722	4,00742	27,7814	10,4502	3,83404	6,48607	7,91863	46,1995	3,32	0,74	
29	28	3,73996	4,64008	3,1338	5,36591	4,45687	4,93797	3,1338	5,36591	11,9943	10,7322	19,8823	20,8073	5,06412	46,7264	11,935	4,09092	6,73293	8,28886	47,9306	3,14	-0,08	
30	29	6,73519	6,93347	4,2771	4,65165	7,52533	7,98245	4,2771	4,65165	14,3859	12,9631	6,58035	6,52008	3,94177	4,82019	4,977	3,64022	4,80028	5,21682	51,9028	0,05	-0,08	
31	30	3,36501	5,49781	3,97564	2,31976	6,25507	7,11104	3,97564	2,31976	12,5654	11,4262	9,93094	8,94495	4,42872	6,56109	6,4182	3,86792	4,74554	5,43797	49,2588	0,05	-0,16	

Figura 6.3: Planilha com os resultados do cálculo do DP para a inspeção 21/04/2017. A planilha se estende, na vertical, até o 240º segmento. Os valores “0” são resultantes de dados distorcidos presentes nos relatórios de inspeção. As distorções mais comuns identificadas foram valores idênticos ou o registro do valor “0” ao longo de extensões significativamente longas. Tal observação é relevante, pois esses registros originam erros nos processos de cálculo do procedimento e que levaram ao descarte do segmento em questão.

Uma vez estabelecido Dados A, a aplicação avançou para a segunda operação, descrita na Figura 5.3, sendo selecionado o primeiro parâmetro geométrico do conjunto de 18, e o primeiro segmento do total de 240. Em seguida, os DPs do segmento em questão foram obtidos do banco Dados A e organizados em ordem cronológica crescente. Como foram utilizados 24 relatórios para compor o banco Dados A, foram obtidos por parâmetro e por segmento 24 valores de DP.

Posteriormente foi calculada a taxa de degradação geométrica, adotando como variável dependente (y) do modelo as leituras de DP organizadas em sequência cronológica, e como variável independente (x) o intervalo de tempo (em dias) transcorrido entre as inspeções consideradas. Como resultado, foi obtida a taxa de degradação geométrica do parâmetro em questão, em mm/dia. Na sequência, o DP pós manutenção foi registrado.

As operações foram repetidas até que todos os parâmetros em todos os segmentos fossem analisados, dando origem à pasta intitulada Dados B, formada por 18 planilhas, cada uma relativa a um parâmetro geométrico, dentro das quais os respectivos dados foram organizados segundo o processo previsto. As Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 ilustram as características desse banco de dados com a apresentação da planilha relativa ao parâmetro LPROF31 (P_1). Como se tratam de planilhas extensas, o seu conteúdo foi dividido entre essas três figuras.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
1		Valores do parâmetro nas inspeções (DP em mm)																			
2	Segmento	21/04/2017	14/06/2017	13/08/2017	03/10/2017	26/11/2017	04/12/2017	23/04/2018	28/05/2018	08/07/2018	04/09/2018	25/10/2018	25/11/2018	28/12/2018	15/01/2019	18/02/2019	02/04/2019	14/05/2019	03/06/2019	25/07/2019	31/08/2019
3	1	8,81	8,41	8,67	8,54	8,44	8,70	4,53	9,17	8,72	10,76	8,68	10,18	10,18	8,46	9,14	7,15	7,41	6,23	6,26	
4	2	7,95	7,64	8,05	7,97	8,31	8,37	7,67	8,71	9,75	6,54	9,13	10,58	10,29	9,16	9,21	9,05	9,47	9,74	9,52	
5	3	5,95	5,98	7,06	6,88	7,07	7,17	8,07	7,44	8,53	8,85	8,42	8,65	9,73	7,26	8,21	6,95	8,67	8,66	8,57	
6	4	9,30	9,06	8,26	7,89	8,47	8,38	8,60	7,27	6,63	10,12	9,80	8,29	11,95	8,57	10,36	5,70	7,67	6,88	7,29	
7	5	12,57	13,70	9,95	9,11	8,96	9,41	10,07	10,86	9,31	11,38	9,54	8,47	11,83	8,72	9,07	8,84	10,51	8,69	8,12	
8	6	3,90	4,42	4,62	3,82	4,01	4,37	4,72	4,42	4,61	5,94	4,68	4,90	7,78	4,98	4,36	4,94	9,53	5,51	3,62	
9	7	4,96	5,34	5,61	5,80	6,03	6,06	7,24	5,14	5,49	6,90	6,27	6,20	8,32	6,38	5,22	6,15	7,50	6,38	4,21	
10	8	7,34	7,37	8,04	7,64	8,32	8,48	8,54	5,85	6,98	8,56	8,57	8,76	10,75	8,94	5,75	7,52	8,21	7,99	3,98	
11	9	6,30	6,52	7,00	6,71	7,13	7,31	7,93	5,35	6,15	8,11	8,35	8,89	11,14	8,71	6,49	8,58	9,22	8,99	3,81	
12	10	5,22	7,13	5,89	7,41	4,87	6,09	5,04	5,86	4,67	5,40	7,51	5,52	8,04	6,67	9,06	7,44	9,77	6,92	5,21	
13	11	4,30	4,99	4,83	4,83	4,81	5,01	5,09	4,70	4,46	7,29	4,46	4,69	8,52	4,95	5,46	5,55	7,81	5,92	5,12	
14	12	4,30	4,67	5,40	4,77	5,02	5,09	4,92	5,63	5,01	6,02	3,58	4,11	5,46	3,36	3,75	3,58	3,86	3,67	2,96	
15	13	3,15	3,27	3,48	3,32	3,54	3,75	3,56	3,75	3,83	3,69	3,08	3,22	4,44	3,19	3,34	3,83	4,47	3,82	4,79	
16	14	3,85	3,47	3,63	3,40	3,13	3,33	3,82	8,95	3,48	4,19	3,45	3,19	5,39	3,40	3,92	3,33	4,51	3,35	3,68	
17	15	4,99	5,14	5,77	5,28	2,54	3,19	4,57	6,89	2,65	3,13	3,61	2,84	4,74	4,28	4,82	4,95	6,10	2,93	4,78	
18	16	5,06	4,77	5,39	4,24	4,16	4,06	4,71	6,33	5,06	4,52	4,26	4,36	5,03	4,49	4,26	4,11	6,06	4,27	3,08	
19	17	5,43	5,42	4,86	3,86	3,89	3,98	4,15	4,75	3,43	5,23	4,48	4,25	5,50	4,55	3,85	3,73	5,59	4,02	3,50	
20	18	4,65	4,39	4,33	2,94	3,12	3,30	3,67	3,55	3,01	4,64	3,23	2,88	3,61	3,46	2,81	5,21	7,16	5,86	3,71	
21	19	4,28	4,36	4,77	3,27	3,76	3,69	3,95	3,46	3,72	3,95	2,87	2,88	4,02	3,05	3,25	3,38	3,61	3,57	3,54	
22	20	4,66	4,97	5,39	5,44	4,27	4,66	5,49	4,28	3,32	4,63	3,37	3,23	4,40	3,43	3,75	3,78	4,48	3,92	4,10	
23	21	3,40	3,42	3,59	3,50	3,06	3,24	3,07	5,69	3,58	3,97	3,35	3,24	4,19	4,22	3,94	3,75	4,75	3,78	4,17	
24	22	6,62	7,00	7,76	5,80	6,20	6,24	6,68	9,94	6,77	6,00	6,06	6,13	8,16	6,32	7,79	6,72	9,14	7,02	6,45	
25	23	6,40	6,50	6,97	6,62	6,71	5,14	7,55	8,85	7,42	3,57	4,18	3,23	5,57	6,39	4,40	5,36	6,66	5,53	6,17	
26	24	8,78	8,38	9,13	9,14	9,39	9,94	10,88	9,45	10,85	10,54	7,79	7,20	9,84	9,61	8,25	9,00	10,51	9,37	9,53	
27	25	6,83	6,95	7,53	7,54	7,86	8,16	8,79	9,21	7,82	10,44	7,70	8,19	9,10	7,90	8,26	9,01	9,34	7,58	7,97	
28	26	6,20	6,31	6,34	6,41	6,74	6,67	7,36	7,54	7,28	9,35	8,20	7,63	8,97	7,92	7,94	8,15	8,32	8,13	8,41	
29	27	4,69	5,18	5,21	5,28	4,79	5,09	6,21	6,54	4,61	7,80	5,44	5,14	7,33	4,94	5,57	5,22	9,40	5,20	5,52	
30	28	3,74	4,09	4,27	4,15	4,20	4,42	4,61	6,25	3,48	4,79	4,04	3,87	5,53	4,49	4,49	4,48	5,12	4,50	5,00	
31	29	6,74	7,02	7,32	7,32	7,72	7,70	7,64	9,96	5,94	7,92	6,65	6,88	8,75	7,39	9,11	8,24	10,27	8,29	8,78	
32	30	3,37	3,56	3,60	3,80	3,81	3,81	4,42	4,84	4,39	5,54	4,66	4,67	5,70	5,05	5,41	5,03	6,08	5,10	5,31	
33	31	3,18	3,36	3,79	3,64	3,73	4,15	3,36	3,78	3,62	4,56	3,90	3,58	4,66	4,19	4,99	4,01	5,47	4,01	4,22	
34	32	5,62	5,97	6,68	6,43	6,70	6,90	7,81	8,61	5,58	8,36	7,50	7,44	9,90	8,10	9,33	8,98	8,46	8,33	6,74	
35	33	4,89	4,86	5,05	5,05	5,21	5,40	5,74	5,99	4,84	6,80	5,34	5,63	6,54	5,88	5,95	6,14	6,61	6,21	6,63	

Figura 6.4: Porção inicial da planilha relativa ao parâmetro LPROF31 onde é vista a identificação dos segmentos do trecho (coluna A) e a organização em ordem cronológica dos valores de DP obtidos de cada uma das 24 inspeções utilizadas. A planilha se estende na vertical até o 240º segmento. A pasta Dados B possui 18 planilhas, sendo visto na parte inferior dessa figura apenas as 12 primeiras, de LPROF31 a RALIGN124.

	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM			
1	Identificação das medições dentre as quais não ocorreu manutenção																						
2	25/07/2019	31/08/2019	08/09/2019	12/10/2019	23/11/2019	21/12/2019	21/04/2017	14/06/2017	13/08/2017	03/10/2017	26/11/2017	04/12/2017	23/04/2018	28/05/2018	08/07/2018	04/09/2018	25/10/2018	25/11/2018	28/12/2018	15/01/2019	18/02/2019		
3	6,26	6,91	7,34	6,16	6,62	6,65	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	4,52802952	9,17347207	8,71862249	10,7557974	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo		
4	9,52	9,87	9,88	12,04	13,67	10,09	nulo	6,54068156	9,12721919	10,5775766	10,2948565	9,16147653											
5	8,57	8,87	9,11	10,05	3,47	9,10	nulo	7,25806307															
6	7,29	6,80	8,10	6,30	2,09	6,74	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	7,26649155	6,62506148	10,1164424	9,80210607	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo		
7	8,12	7,81	8,61	8,27	7,10	6,57	nulo	nulo	9,94848288	9,11014435	8,96232887	9,41078971	10,0736825	10,8619342	9,30956714	11,3764753	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo		
8	3,62	2,95	3,28	3,43	2,57	2,61	nulo	nulo	nulo	3,82479134	4,00864916	4,36884465	4,71888915	4,41578515	4,61249862	5,93859071	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo		
9	4,21	3,68	4,02	4,06	3,41	3,79	nulo	5,14033253	5,48671019	6,90464701	6,27176091	6,19978711	8,32497008	nulo	nulo								
10	3,98	3,82	4,23	4,54	4,21	4,79	nulo	5,85495623	6,97919212	8,56029871	8,5720027	8,7542226	10,7460026	nulo	nulo								
11	3,81	5,03	5,66	5,60	5,22	5,18	nulo	5,3480939	6,14823447	8,11092014	8,35349907	8,89051879	11,1434029	nulo	nulo								
12	5,21	4,52	8,68	7,21	6,23	5,22	nulo	nulo	5,89394012	7,41446559	nulo												
13	5,12	5,40	6,11	6,37	3,71	4,27	nulo	4,73151738	4,69206452	8,51592153	nulo	nulo											
14	2,96	2,73	3,16	3,56	6,08	3,88	nulo	3,57971814	4,10897164	5,46118938	nulo	nulo											
15	4,79	4,49	5,22	5,20	5,49	5,38	nulo	3,07953475	3,2166819	4,43846217	nulo	nulo											
16	3,68	3,18	4,10	3,47	3,44	3,15	nulo	3,47564038	4,19253476	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo								
17	4,78	2,92	5,57	3,29	3,94	3,30	nulo	nulo	nulo	nulo	2,5414219	3,18951221	4,56562242	6,89426529	nulo	nulo							
18	3,08	3,21	3,63	3,43	3,95	3,41	nulo	nulo	nulo	4,24469814	4,16057962	4,06391701	4,70739352	6,33343224	nulo	nulo							
19	3,50	3,56	4,06	3,84	3,84	3,85	nulo	nulo	nulo	3,85770758	3,8858601	3,97710819	4,15338644	4,75369801	nulo	nulo							
20	3,71	2,71	4,45	3,35	3,43	3,78	nulo	nulo	nulo	2,93756718	3,12373018	3,30476313	3,67111398	3,55289604	nulo	nulo							
21	3,54	3,65	3,98	3,82	4,25	3,87	nulo	nulo	nulo	3,26790972	3,76077722	3,69116514	3,95181523	3,46032196	3,71865356	3,94967177	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	
22	4,10	4,08	4,30	4,48	4,62	4,27	nulo	nulo	nulo	nulo	4,2741579	4,66215075	5,48902692	nulo	nulo								
23	4,17	4,06	5,34	4,48	5,39	4,12	nulo	3,58360751	3,97383054	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo								
24	6,45	6,66	7,08	6,84	7,41	7,00	nulo	nulo	nulo	5,79636838	6,19650698	6,23953294	6,67849896	9,94452308	nulo	nulo							
25	6,17	6,18	3,56	6,62	7,32	6,55	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	5,14034732	7,54922367	8,84889189	nulo	nulo							
26	9,53	9,27	9,43	8,12	9,22	8,53	nulo	7,79021486	7,20088682	9,84281394	9,61212428	8,2											
27	7,97	8,15	8,32	8,04	9,22	7,66	nulo	7,81623796	10,442267	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo								
28	8,41	8,43	8,87	8,63	8,88	5,02	nulo	nulo															
29	5,52	5,17	6,16	5,59	5,79	3,21	nulo	4,61359649	7,79514029	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo								
30	5,00	4,92	6,47	4,21	5,33	3,34	nulo	3,48104668	4,79294287	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo								
31	8,78	8,44	8,46	7,24	8,00	4,58	nulo	5,94194922	7,91853385	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo								
32	5,31	5,29	5,59	5,43	6,09	3,64	nulo	4,66199637	4,66758464	5,70483316	5,04524774	5,4											
33	4,22	4,09	4,68	4,31	7,18	4,21	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	3,36493389	3,77893344	3,61867433	4,55582426	3,89526548	3,57874219	4,66014199	4,18647895	4,9		
34	6,74	6,93	7,74	7,38	11,99	7,65	nulo	5,58193566	8,35562097	7,5034659	7,43744625	9,9005176	nulo	nulo									
35	6,63	6,47	6,92	6,63	8,18	6,59	nulo	4,83768959	6,79993689	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo								

Figura 6.5: Porção central da planilha relativa ao parâmetro LPROF31 onde é visto o término das colunas destinadas ao registro dos valores de DP (coluna Y), e início (à direita de Y) das colunas para determinação do intervalo no qual não ocorreram manutenções. Em cada segmento (linha) as primeiras colunas receberam o termo “nulo” até a identificação de uma manutenção (diminuição de, pelo menos, 15% no valor do DP). Posteriormente os valores de DP foram registrados até que novamente se identificasse outra manutenção, e então as colunas restantes receberam novamente o termo “nulo”, estabelecendo assim o intervalo de referência.

	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH		
1	ocorreu manutenção											Taxa de degradação	DP inicial											
2	15/01/2019	18/02/2019	02/04/2019	14/05/2019	03/06/2019	25/07/2019	31/08/2019	08/09/2019	12/10/2019	23/11/2019	21/12/2019	mm/dia												
3	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,03949	4,53											
4	9,16147653	9,21384635	9,04510217	9,47292437	9,73964577	9,51799152	9,8744392	9,88174402	12,0371803	13,6655311	nulo	0,00784	6,54											
5	7,25806307	8,2052501	nulo	0,02786	7,26																			
6	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,02255	7,27											
7	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,00379	9,95											
8	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,00445	3,82											
9	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,01099	5,14											
10	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,01912	5,85											
11	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,02396	5,35											
12	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,02981	5,89											
13	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,05974	4,73											
14	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,02952	3,58											
15	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,02140	3,08											
16	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,01236	3,48											
17	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,01893	2,54											
18	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,00757	4,24											
19	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,00314	3,86											
20	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,00275	2,94											
21	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,00104	3,27											
22	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,00719	4,27											
23	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,00673	3,58											
24	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,01326	5,80											
25	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,02005	5,14											
26	9,61212428	8,24682136	9,00362556	10,5143781	9,37089239	9,53315119	9,2703425	9,43476699	8,11727036	9,21638681	8,52718028	0,00143	7,79											
27	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,04528	7,82											
28	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	5,01777454	0,00288	5,02											
29	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,05485	4,61											
30	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,02262	3,48											
31	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,03408	5,94											
32	5,04524774	5,40756957	5,0305961	6,0847027	nulo	0,00531	4,66																	
33	4,18647895	4,99498021	nulo	0,00368	3,36																			
34	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,01785	5,58											
35	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	nulo	0,03383	4,84											

Figura 6.6: Porção final da planilha relativa ao parâmetro LPROF31 onde é visto o término das colunas destinadas a identificação das medições de DP dentre as quais não ocorreu manutenção, e as colunas com a determinação da taxa de degradação e o DP pós manutenção (DP inicial).

A partir de Dados B a aplicação avançou para a operação em que foram formuladas as equações de degradação geométrica (Fluxograma 3) de cada um dos parâmetros geométricos analisados em cada segmento. Esses modelos foram utilizados para calcular o tempo necessário para que a condição da geometria, partindo do estado pós manutenção, atingisse a tolerância de segurança geométrica.

Por terem sido analisados 18 parâmetros geométricos, o procedimento definiu 18 equações por segmento, contudo, a norma brasileira ABNT NBR 16387:2020, que foi adotada como referência neste estudo, forneceu tolerâncias para degradação geométrica aplicáveis somente a 11 deles, a saber, (L/R)PROF31, (L/R)ALIGN31, (L/R)PROF62, (L/R)ALIGN62, GAUGE, WARP_62 e TWIST_S. Por consequência, foram calculados intervalos entre manutenções somente para esses parâmetros. As demais equações foram utilizadas na terceira etapa do procedimento.

Portanto, os 11 parâmetros avaliados estabeleceram 11 possíveis intervalos de manutenção geométrica por segmento, sendo que para o intervalo de referência, TM_{i_n} , foi selecionado o menor, estabelecendo assim a mínima frequência de intervenção capaz de manter a segurança sob o critério geométrico.

As Figuras 6.7 a 6.9 apresentam parte da pasta Dados C, ilustrando o resultado desse processo. Como a planilha é extensa foi necessária sua divisão em três figuras.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1		Taxa de degradação mm/dia																			
2	Segmento	LPROF31	RPROF31	LALIGN31	RALIGN31	LPROF62	RPROF62	LALIGN62	RALIGN62	LPROF124	RPROF124	LALIGN124	RALIGN124	GAUGE	XLEVEL	WARP_62	TWIST_S	TWIST_M	TWIST_L	LPROF31	RPROF31
3	1	0,03949	0,01009	#DIV/0!	#DIV/0!	0,01101	-0,00505	#DIV/0!	#DIV/0!	0,21123	0,44771	#DIV/0!	#DIV/0!	0,01167	0,00530	0,00429	0,00795	0,01061	0,00795	4,52803	4,866
4	2	0,00784	0,03015	#DIV/0!	#DIV/0!	0,01518	0,12865	#DIV/0!	#DIV/0!	0,02742	0,07685	#DIV/0!	#DIV/0!	-0,00086	0,00326	0,01374	0,00734	0,02422	0,01011	6,540682	6,245
5	3	0,02786	0,03314	#DIV/0!	#DIV/0!	0,13567	0,01418	#DIV/0!	#DIV/0!	0,23789	0,00912	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00138	0,00957	0,02534	0,00796	0,01474	0,01138	7,258063	6,360
6	4	0,02255	-0,01570	#DIV/0!	#DIV/0!	0,02798	0,06197	#DIV/0!	#DIV/0!	1,06961	0,08367	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00030	0,22075	0,03193	0,02508	0,02441	0,03060	7,266492	10,98
7	5	0,00379	0,01377	0,43382	0,36463	0,10714	#DIV/0!	0,43382	0,36463	0,31812	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00096	-0,00006	0,01469	0,00712	0,01832	0,01096	9,948483	6,466
8	6	0,00445	0,00526	0,01061	0,01434	-0,00238	0,00286	0,01061	0,01434	0,00027	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0,00269	0,01630	0,00164	0,02949	0,00123	0,02662	3,824791	4,233
9	7	0,01099	0,01118	0,00063	0,00979	0,00311	0,00671	0,00063	0,00979	-0,00225	0,03510	0,22369	0,21782	-0,01414	0,00355	0,00872	0,00009	0,01289	0,01825	5,140333	3,864
10	8	0,01912	0,01339	0,00200	0,00955	0,01204	0,01489	0,00200	0,00955	0,02238	0,00134	0,08700	0,09207	-0,00037	0,17605	0,19137	0,00299	0,09442	0,13264	5,854956	6,015
11	9	0,02396	0,02140	0,00426	0,00433	0,01181	0,01075	0,00426	0,00433	0,02332	0,01678	0,01525	0,01704	0,00168	-0,00213	0,00939	0,00570	0,00748	0,00932	5,348094	6,303
12	10	0,02981	0,00933	-0,00050	-0,00282	0,00761	0,00906	-0,00050	-0,00282	-0,00246	0,38911	-0,01128	-0,00448	0,00251	0,05251	0,04077	0,01594	0,00909	0,01010	5,89394	5,206
13	11	0,05974	0,01944	0,00270	0,00062	0,04574	0,00824	0,00270	0,00062	0,00484	0,02278	0,09167	0,10232	0,01313	0,02179	1,42834	0,01004	0,79102	1,07336	4,731517	5,599
14	12	0,02952	0,04853	0,00881	0,00434	0,01065	0,00635	0,00881	0,00434	0,23476	0,03941	0,01392	0,01514	0,01251	0,02011	0,00730	-0,00071	0,01617	0,03117	3,579718	4,269
15	13	0,02140	0,01241	0,01772	0,00682	0,01474	0,01953	0,01772	0,00682	0,02741	0,02689	0,01954	0,01922	0,00054	0,14182	0,00466	0,00334	0,00483	0,00435	3,079535	3,693
16	14	0,01236	0,01397	0,02166	-0,00446	0,11420	0,02518	0,02166	-0,00446	0,01491	0,01337	0,18381	0,17907	0,00385	8,19787	0,03428	0,00035	0,04268	0,05880	3,47564	3,534
17	15	0,01893	0,01032	0,00224	0,03782	0,00061	0,00207	0,00224	0,03782	0,01244	0,01191	-0,09941	-0,01834	-0,00070	-0,00048	0,16281	0,01545	0,01257	0,02695	2,541422	2,078
18	16	0,00757	0,00398	0,00408	0,00702	0,00740	0,00456	0,00408	0,00702	0,07479	-0,00075	0,02221	0,02347	-0,00179	0,10287	0,12288	0,00534	0,01461	0,01669	4,244698	1,905
19	17	0,00314	0,02300	0,01322	0,02712	-0,00193	0,00829	0,01322	0,02712	0,00144	0,00355	0,00883	-0,00105	0,00203	0,02788	0,01186	0,00337	0,00000	0,00710	3,857708	2,91
20	18	0,00275	0,00258	0,00326	0,01393	0,01670	-0,00050	0,00326	0,01393	0,04795	-0,00581	0,03003	0,12812	0,00534	0,06730	0,19855	0,00123	0,00010	0,02633	2,937567	2,113
21	19	0,00104	0,00100	0,02066	0,00738	0,01173	0,00453	0,02066	0,00738	0,00258	0,01866	0,31540	-0,00002	-0,00028	-0,00045	-0,00006	-0,00096	-0,00003	0,00030	3,26791	3,324
22	20	0,00719	0,00571	0,00418	0,00760	0,00168	-0,00189	0,00418	0,00760	-0,00057	0,00670	0,04514	0,04565	0,00106	0,00585	0,04570	0,00671	0,02189	0,02408	4,274158	3,538
23	21	0,00673	0,00319	0,03017	0,01807	0,03157	0,00485	0,03017	0,01807	0,00154	0,00570	0,03981	0,03950	0,00051	0,00169	0,00959	0,00297	0,26607	0,00886	3,583608	5,065
24	22	0,01326	0,01642	0,01362	0,02150	0,00373	0,01467	0,01362	0,02150	0,00669	0,00521	-0,00696	0,00058	0,00207	0,44724	0,00963	0,04780	0,10576	0,13681	5,796368	5,488
25	23	0,02005	0,02286	0,00003	-0,00005	0,01445	0,02056	0,00003	-0,00005	0,01787	0,04896	0,00189	0,00124	-0,00029	0,00676	0,01070	0,00316	0,00880	0,00852	5,140347	5,623
26	24	0,00143	0,05497	0,00762	0,01075	0,00614	0,00666	0,00762	0,01075	0,66029	1,39786	-0,00256	-0,00213	0,00047	0,01079	0,03505	0,00588	0,00589	0,02576	7,790215	8,816
27	25	0,04528	0,01577	0,00353	0,00628	0,00252	0,00778	0,00353	0,00628	0,00371	0,00239	0,05954	0,05799	0,00002	0,00414	0,06631	0,00582	0,00431	0,00462	7,816238	5,985
28	26	0,00288	0,00169	0,00012	0,00057	0,00066	0,00526	0,00012	0,00057	-0,01185	0,01099	0,03597	0,03712	0,00035	0,00924	0,00983	0,00198	0,00456	0,00694	5,017775	5,086

Figura 6.7: Porção inicial da planilha Dados C em que são reunidas as taxas de degradação de todos os parâmetros em todos segmentos (colunas B a S). A ausência de alguns valores, com células apresentando o código “#DIV/0!” são consequência das distorções de dados mencionadas na Figura 6.3. A planilha se estende na vertical até o 240º segmento.

	S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ	AK	AL	AM
1		DP inicial de cada segmento e parâmetro (mm)																			
2	TWIST_L	LPROF31	RPROF31	LALIGN31	RALIGN31	LPROF62	RPROF62	LALIGN62	RALIGN62	LPROF124	RPROF124	LALIGN124	RALIGN124	GAUGE	XLEVEL	WARP_62	TWIST_S	TWIST_M	TWIST_L	LPROF31	RPROI
3	0,00795	4,52803	4,866748	5,944529	7,752252	16,02436	18,54091	5,944529	7,752252	60,06012	56,47292	0	0	4,941886	13,31176	15,85552	7,517876	10,83412	13,14828	5,157037	5,215
4	0,01011	6,540682	6,245527	1,875071	2,516777	7,818319	8,891909	1,875071	2,516777	15,76463	15,74237	0	0	6,284005	22,59592	#N/D	4,734939	7,812054	#N/D	5,157037	5,215
5	0,01138	7,258063	6,360591	0	0	14,53783	10,27389	0	0	18,30237	22,38986	0	0	5,149883	19,27921	10,84457	6,669842	8,19056	9,609541	5,157037	5,215
6	0,03060	7,266492	10,98644	0	0	14,54471	11,5537	0	0	25,56844	17,25525	0	0	6,180492	7,027972	8,361886	5,834188	7,185145	8,04281	5,157037	5,215
7	0,01096	9,948483	6,466253	6,586117	9,921664	15,86568	17,02736	6,586117	9,921664	48,68382	40,25897	0	0	6,324696	#N/D	#N/D	6,865567	10,64862	#N/D	5,157037	5,215
8	0,02662	3,824791	4,233547	3,140245	4,179637	5,591831	5,590116	3,140245	4,179637	12,55849	15,76901	0	0	4,272866	10,78707	9,191721	5,628456	6,457914	7,367316	5,157037	5,215
9	0,01825	5,140333	3,864234	2,735742	4,531121	6,663094	5,357301	2,735742	4,531121	10,98147	10,49858	9,449553	9,786678	7,838573	#N/D	#N/D	4,820401	6,896095	8,605102	5,157037	5,215
10	0,13264	5,854956	6,015045	1,736343	2,769376	7,215106	7,13517	1,736343	2,769376	8,850737	10,15151	0,599411	1,232037	2,699696	4,564778	5,269459	3,297249	4,264556	4,421152	5,157037	5,215
11	0,00932	5,348094	6,303164	2,204736	1,810064	8,342093	6,384813	2,204736	1,810064	16,45979	10,1388	2,838125	2,270399	2,062406	9,070811	10,54522	4,910193	6,90679	8,193888	5,157037	5,215
12	0,01010	5,89394	5,206579	5,292616	4,514454	5,889302	5,299906	5,292616	4,514454	11,62693	7,641335	14,81986	15,42624	#N/D	41,43135	21,00034	5,347567	10,51445	14,10227	5,157037	5,215
13	1,07336	4,731517	5,599691	3,579201	4,636737	7,246274	9,21893	3,579201	4,636737	16,49109	14,10781	14,12218	12,88737	4,274577	26,89888	13,85631	5,073671	8,070502	10,15715	5,157037	5,215
14	0,03117	3,579718	4,269248	3,205835	6,281337	5,20648	7,281118	3,205835	6,281337	18,09514	11,34519	13,21316	13,96742	5,698933	6,599223	#N/D	4,703565	4,442373	5,118364	5,157037	5,215
15	0,00435	3,079535	3,693345	3,852041	4,513506	4,801612	5,54609	3,852041	4,513506	9,801522	12,44781	0	0	4,069379	8,476088	8,378606	3,521742	4,979545	6,154044	5,157037	5,215
16	0,05880	3,47564	3,534785	3,853738	4,760676	6,384512	5,737585	3,853738	4,760676	19,54941	10,19351	48,85198	49,32556	3,894396	76,02218	#N/D	4,622468	7,759595	9,815853	5,157037	5,215
17	0,02695	2,541422	2,078754	4,527564	4,163312	7,602952	3,239893	4,527564	4,163312	11,12945	7,520529	17,72143	17,33321	4,503779	6,768305	5,627193	3,252441	4,76374	5,843279	5,157037	5,215
18	0,01669	4,244698	1,905601	6,154912	3,877843	5,207568	3,688417	6,154912	3,877843	10,75664	5,769368	3,694548	2,668225	5,553565	9,348198	8,132632	4,933753	4,74994	5,71856	5,157037	5,215
19	0,00710	3,857708	2,91137	4,323726	4,113199	6,233666	3,321977	4,323726	4,113199	11,05733	9,528101	15,5467	13,16697	4,766065	4,855753	6,375577	3,698043	4,942715	5,257095	5,157037	5,215
20	0,02633	2,937567	2,113294	5,432779	2,940553	10,29978	4,215498	5,432779	2,940553	23,47192	15,49454	#N/D	20,37209	3,824125	#N/D	11,11456	3,817381	7,359968	8,03052	5,157037	5,215
21	0,00030	3,26791	3,324623	4,19595	4,318918	6,052306	4,434965	4,19595	4,318918	10,08722	5,956384	8,147515	8,847702	#N/D	5,312711	5,851669	2,980786	4,065042	4,617325	5,157037	5,215
22	0,02408	4,274158	3,538109	#N/D	5,724974	7,765814	6,518089	#N/D	5,724974	16,02121	12,53146	#N/D	#N/D	4,187793	27,93597	7,650018	3,511009	5,291873	7,383063	5,157037	5,215
23	0,00886	3,583608	5,065271	4,076312	8,226268	4,974854	6,689872	4,076312	8,226268	11,27625	11,82404	#N/D	#N/D	#N/D	25,58363	#N/D	3,72487	7,707647	#N/D	5,157037	5,215
24	0,13681	5,796368	5,488631	3,978351	5,056666	10,5248	8,168728	3,978351	5,056666	23,68962	16,82358	15,88229	17,60868	4,120816	16,65488	#N/D	5,192596	8,206025	10,36888	5,157037	5,215
25	0,00852	5,140347	5,623299	0	0	6,795041	6,421895	0	0	12,67787	10,55947	0	0	4,767039	#N/D	5,584239	4,172634	4,465549	4,754982	5,157037	5,215
26	0,02576	7,790215	8,816481	3,99983	2,368355	11,81963	10,51992	3,99983	2,368355	22,354	17,85051	0	0	#N/D	#N/D	11,20355	5,99839	9,924058	10,54736	5,157037	5,215
27	0,00462	7,816238	5,985423	5,422162	3,823707	#N/D	8,578973	5,422162	3,823707	17,29713	12,84762	3,004091	2,229224	#N/D	#N/D	10,13905	6,626478	#N/D	#N/D	5,157037	5,215
28	0,00694	5,017775	5,086693	#N/D	4,199461	8,934556	10,9178	#N/D	4,199461	29,10695	18,98449	#N/D	#N/D	3,82369	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	#N/D	5,157037	5,215

Figura 6.8: Porção central da planilha Dados C em que são reunidos o DP inicial de cada parâmetro e segmento (colunas T a AK). Estes são os dados utilizados no cálculo do DP inicial por parâmetro por meio da Equação 31. A planilha se estende na vertical até o 240º segmento. Células com valores “0” ou com “#N/D” são resultantes das distorções de dados anteriormente mencionadas.

	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE
1		DP inicial (mm)																			
2	TWIST_L	LPROF31	RPROF31	LALIGN31	RALIGN31	LPROF62	RPROF62	LALIGN62	RALIGN62	LPROF124	RPROF124	LALIGN124	RALIGN124	GAUGE	XLEVEL	WARP_62	TWIST_S	TWIST_M	TWIST_L		
3	13,14828	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
4	#N/D	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
5	9,609541	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
6	8,04281	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
7	#N/D	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
8	7,367316	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
9	8,605102	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
10	4,421152	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
11	8,193888	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
12	14,10227	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
13	10,15715	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
14	5,118364	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
15	6,154044	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
16	9,815853	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
17	5,843279	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
18	5,71856	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
19	5,257095	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
20	8,03052	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
21	4,617325	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
22	7,383063	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
23	#N/D	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
24	10,36888	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
25	4,754982	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
26	10,54736	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
27	#N/D	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		
28	#N/D	5,157037	5,215483	3,359871	3,299089	8,396249	8,018509	3,359871	3,299089	17,40486	14,7339	10,93256	10,87097	4,281334	12,31755	9,17777	4,920285	6,972992	7,650778		

Figura 6.9: Porção final da planilha Dados C em que são reunidos o DP inicial por parâmetro (coluna AL a BC). A planilha se estende na vertical até o 240º segmento.

Os modelos para estimação das acelerações dos veículos em relação à via permanente requerem equações de previsão da condição geométrica de todos os parâmetros inspecionados, conseqüentemente, a viabilidade de análise de um segmento está condicionada à aprovação de todos os seus respectivos modelos de degradação geométrica. O ideal nesta aplicação seria a análise dos 240 segmentos do trecho ferroviário em questão, contudo, apenas 38 foram examinados, por inconsistências nos relatórios de inspeção. Portanto, esses segmentos são considerados representativos de todo o trecho ferroviário para fins da aplicação.

A Tabela 19 apresenta de forma consolidada os resultados finais dessa primeira etapa, com a identificação dos segmentos, a frequência mínima de manutenção capaz de garantir a segurança sob o ponto de vista geométrico, e o parâmetro de referência para sua determinação.

Tabela 19: Frequências mínimas de manutenção capazes de assegurar a segurança operacional sob o critério geométrico para os segmentos válidos

Segmento	TM_{i_n} (dias)	Parâmetro de referência
8	766	RPROF62
9	611	LPROF31
11	245	LPROF62
13	487	LALIGN31
15	230	RALIGN31
16	1239	TWIST_S
35	759	RPROF62
36	1910	LPROF62
37	245	TWIST_S
38	748	GAUGE
39	247	TWIST_S
47	1076	TWIST_S
73	433	RALIGN31
74	1660	TWIST_S
75	864	LPROF62
76	612	RPROF62
77	791	LPROF62
78	769	LPROF62
79	696	LALIGN31
94	2045	LALIGN31
97	249	LPROF62
101	371	RPROF62
104	804	TWIST_S
106	328	LALIGN31

(continuação)

Segmento	TM_{i_n} (dias)	Parâmetro de referência
110	281	TWIST_S
112	261	TWIST_S
113	501	RPROF62
123	349	LALIGN31
125	350	RALIGN31
210	1734	RPROF62
211	1545	GAUGE
212	6559	GAUGE
219	1344	LALIGN31
220	2070	LALIGN31
221	1299	LPROF62
222	1691	LALIGN31
223	1900	GAUGE
224	791	WARP_62

As tolerâncias do DP utilizadas nos cálculos anteriores são apresentadas no Apêndice IV.

6.3 Formulação de Modelos de Previsão das Acelerações em Função da Condição Geométrica

Inicialmente, nesta segunda etapa do procedimento, foram organizados os dados para modelagem das equações de correspondência entre a condição geométrica e as acelerações dos veículos em relação à via. Seguindo os processos estabelecidos no Fluxograma 4, foi feita a associação entre as leituras de dinâmica veicular e o correspondente estado da geometria. Os dados utilizados são provenientes do relatório de inspeção dinâmica disponível e de uma inspeção geométrica realizada 14 dias após a dinâmica.

A Figura 6.10 ilustra o resultado dessa associação ao apresentar as primeiras linhas do arquivo intitulado Dados D.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	Acelerações	
1																						Vert.	Hor.
2	LPROF31	RPROF31	LALIGN31	RALIGN31	LPROF62	RPROF62	LALIGN62	RALIGN62	LPROF124	RPROF124	LALIGN124	RALIGN124	GAUGE	XLEVEL	WARP_62	TWIST_S	TWIST_M	TWIST_L	SPEED	CV MÁX	CV MÍN		
3	4,38	4,22	6,59	6,59	3,96	4,06	7,25	7,54	7,96	8,57	4,48	4,53	4,40	4,86	2,94	3,11	4,28	5,08	34,7005	3,99	3,78	0,14	0,32
4	4,38	4,22	6,59	6,59	3,96	4,06	7,25	7,54	7,96	8,57	4,48	4,53	4,40	4,86	2,94	3,11	4,28	5,08	34,7005	3,99	3,78	0,09	0,37
5	11,57	12,54	6,38	5,00	11,20	14,86	7,90	6,80	18,06	25,93	0,00	0,00	5,44	12,75	8,71	6,72	10,71	12,45	35,8253	0,04	-0,03	0,27	0,49
6	11,57	12,54	6,38	5,00	11,20	14,86	7,90	6,80	18,06	25,93	0,00	0,00	5,44	12,75	8,71	6,72	10,71	12,45	35,8253	0,04	-0,03	0,15	0,34
7	11,32	9,30	5,20	4,93	12,30	10,35	8,66	9,13	14,14	12,51	0,00	0,00	5,66	13,35	7,21	6,79	9,98	12,02	35,3358	0,01	-0,83	0,2	0,32
8	10,37	11,83	4,95	5,22	9,07	10,38	5,80	5,89	11,83	11,55	0,00	0,00	4,92	6,27	7,72	4,45	7,03	7,31	37,2895	0,04	-0,05	0,44	0,21
9	4,55	6,64	3,37	3,46	6,05	7,22	6,30	6,76	7,93	11,79	39,34	39,19	4,46	43,58	9,92	4,49	7,93	10,36	45,099	2,94	0,03	0,16	0,31
10	7,34	7,98	3,55	3,13	8,55	10,19	4,88	5,20	10,05	9,28	8,31	7,28	3,00	3,73	5,36	3,41	4,68	4,89	44,817	0,01	0	0,41	0,13
11	7,47	9,30	3,74	3,76	6,58	8,26	5,31	4,47	10,42	11,51	4,54	4,21	2,34	5,00	3,62	3,71	4,67	4,62	44,4135	0,03	-0,01	0,1	0,31
12	4,84	6,73	3,02	2,37	5,89	6,84	3,70	3,25	11,67	12,40	5,66	5,79	2,06	3,84	5,87	3,95	5,15	5,51	47,3581	0,02	-0,01	0,44	0,09
13	12,46	12,05	4,65	4,21	13,85	13,02	5,38	5,27	21,52	20,07	5,79	4,98	2,93	7,69	10,29	5,85	7,38	8,03	45,0353	0,07	-0,03	0,44	0,31
14	4,35	4,78	2,67	2,27	5,42	5,74	3,03	3,46	11,22	10,03	0,00	0,00	2,03	5,48	4,44	3,64	5,00	5,66	37,094	0,05	0	0,55	0,29
15	9,21	8,41	1,93	3,72	13,68	10,98	2,28	4,33	25,32	21,84	2,76	3,66	3,07	5,47	7,46	4,67	6,16	6,36	38,9762	0,01	0	0,42	0,21
16	14,72	13,32	4,33	5,09	16,57	15,95	4,78	6,64	18,76	21,94	5,96	7,97	6,45	11,57	10,26	6,83	10,74	12,55	37,5822	0,03	-0,02	0,62	0,23
17	14,72	13,32	4,33	5,09	16,57	15,95	4,78	6,64	18,76	21,94	5,96	7,97	6,45	11,57	10,26	6,83	10,74	12,55	37,5822	0,03	-0,02	0,46	0,1
18	15,14	17,92	3,43	4,41	13,14	14,27	6,06	6,59	16,88	20,12	3,30	4,18	4,36	7,49	5,16	4,71	7,50	7,76	39,1154	0,02	-0,02	0,41	0,14
19	8,67	8,38	3,32	3,38	9,87	7,86	6,03	4,80	13,61	12,79	0,00	0,00	3,81	7,96	7,92	4,88	6,17	7,95	34,1443	0,07	-0,04	0,46	0,16
20	5,29	4,78	6,12	5,06	7,52	6,53	8,54	7,73	11,70	11,40	18,16	18,51	6,18	37,78	7,32	3,43	5,88	7,60	41,6625	0,02	-2,96	0,05	0,31
21	9,69	8,13	2,85	2,83	8,20	7,18	5,55	5,29	15,59	14,36	4,14	4,53	2,64	3,30	2,84	2,41	3,44	3,64	40,207	0,01	0	0,45	0,14
22	9,69	8,13	2,85	2,83	8,20	7,18	5,55	5,29	15,59	14,36	4,14	4,53	2,64	3,30	2,84	2,41	3,44	3,64	40,207	0,01	0	0,42	0,25
23	7,94	7,65	2,45	3,13	9,54	8,08	3,09	4,19	10,48	10,82	4,31	5,24	3,22	4,85	3,60	3,32	4,88	5,58	41,7292	0,02	0	0,48	0,2
24	2,26	2,26	4,28	3,13	3,76	3,12	6,29	4,75	6,91	5,22	0,98	0,63	3,72	2,41	2,21	1,84	2,46	3,07	37,275	0,01	0	0,07	0,38
25	2,26	2,26	4,28	3,13	3,76	3,12	6,29	4,75	6,91	5,22	0,98	0,63	3,72	2,41	2,21	1,84	2,46	3,07	37,275	0,01	0	0,11	0,31
26	2,26	2,26	4,28	3,13	3,76	3,12	6,29	4,75	6,91	5,22	0,98	0,63	3,72	2,41	2,21	1,84	2,46	3,07	37,275	0,01	0	0,07	0,4
27	2,26	2,26	4,28	3,13	3,76	3,12	6,29	4,75	6,91	5,22	0,98	0,63	3,72	2,41	2,21	1,84	2,46	3,07	37,275	0,01	0	0,12	0,35
28	2,26	2,26	4,28	3,13	3,76	3,12	6,29	4,75	6,91	5,22	0,98	0,63	3,72	2,41	2,21	1,84	2,46	3,07	37,275	0,01	0	0,12	0,36
29	2,26	2,26	4,28	3,13	3,76	3,12	6,29	4,75	6,91	5,22	0,98	0,63	3,72	2,41	2,21	1,84	2,46	3,07	37,275	0,01	0	0,07	0,31
30	2,26	2,26	4,28	3,13	3,76	3,12	6,29	4,75	6,91	5,22	0,98	0,63	3,72	2,41	2,21	1,84	2,46	3,07	37,275	0,01	0	0,09	0,45
31	2,26	2,26	4,28	3,13	3,76	3,12	6,29	4,75	6,91	5,22	0,98	0,63	3,72	2,41	2,21	1,84	2,46	3,07	37,275	0,01	0	0,12	0,3

Figura 6.10: Pasta Dados D onde são vistos os registros das acelerações verticais e horizontais (colunas V e W) associadas à respectiva condição geométrica (DP das leituras dos parâmetros) do segmento (colunas A a R), bem como a velocidade e o CV máx e CV mín (colunas S a U, respectivamente).

Para obtenção das equações ac_V e ac_H de previsão das acelerações foi empregada a operação descrita na Figura 5.6. Devido à extensão do conteúdo produzido nesse processo e visando tornar esta seção mais concisa, seu desenvolvimento está apresentado no Apêndice II, que inclui a descrição detalhada da modelagem, operações realizadas e métricas estatísticas dos modelos. A seguir são apresentados os resultados finais.

Para previsão das acelerações verticais dos veículos em relação à via permanente, a expressão matemática obtida foi:

$$\begin{aligned}
 ac_V = & -0,36 \text{ LPROF31} + 0,29 \text{ RPROF31} - 0,06 \text{ LALIGN31} \\
 & - 0,34 \text{ RALIGN31} + 0,14 \text{ LPROF62} - 0,11 \text{ RPROF62} \\
 & - 0,22 \text{ LALIGN62} + 0,67 \text{ RALIGN62} \\
 & + 0,02 \text{ LPROF124} + 0,03 \text{ RPROF124} \\
 & - 0,04 \text{ LALIGN124} - 0,72
 \end{aligned} \tag{42}$$

O coeficiente de determinação (R^2) ajustado obtido para a Equação 42 foi 0,9495, com p -valor da estatística F de $2,521 \times 10^{-8}$.

A equação para previsão das acelerações horizontais foi:

$$\begin{aligned}
 ac_H = & 0,05 \text{ LPROF31} - 0,06 \text{ RPROF31} + 0,04 \text{ LALIGN31} \\
 & + 0,15 \text{ RALIGN31} + 0,02 \text{ LPROF62} \\
 & + 3,77 \text{ LPROF124}^{-1} - 0,04 \text{ LALIGN124} \\
 & + 0,02 \text{ RALIGN124} - 0,18 \text{ GAUGE} - 0,17
 \end{aligned} \tag{43}$$

O coeficiente de determinação ajustado obtido para a Equação 43 foi de 0,7522, com p -valor da estatística F de 0,0001233.

6.4 Adaptação dos Modelos de Previsão das Acelerações

Nessa etapa, as Equações 42 e 43 foram modificadas com a substituição das variáveis correspondentes ao índice de qualidade dos parâmetros geométricos pelas respectivas equações D_{in_T} estabelecidas na primeira etapa, fazendo com que os modelos assumissem a forma $ac_{j_{nT}}$, com n sendo o segmento sob análise. Como foram 38 os

trechos válidos remanescentes da primeira etapa, nesse processo foram estabelecidas 76 equações (duas – $ac_{V_{nT}}$ e $ac_{H_{nT}}$ – por segmento).

Para ilustrar o resultado, a Equação 44 demonstra a adaptação da Equação 43 aos modelos de degradação geométrica formulados para o segmento 8.

$$\begin{aligned}
 ac_{H_{8T}} = & 0,05 (0,019T + 5,157) - 0,06 (0,013T + 5,216) \\
 & + 0,04 (0,002T + 3,360) + 0,15 (0,010T + 3,299) \\
 & + 0,02 (0,012T + 8,396) \\
 & + 3,77 (0,022T + 17,405)^{-1} \\
 & - 0,04 (0,087T + 10,933) + 0,02 (0,092T + 10,871) \\
 & - 0,18 (-0,0004T + 4,281) - 0,17
 \end{aligned} \tag{44}$$

Onde T é o intervalo entre manutenções, em dias.

6.5 Simulação de Padrões de Intervenção e Seleção da Política de Manutenção de Menor Custo

Em cada segmento válido, o correspondente ciclo mínimo de manutenção geométrica estabelecido na primeira etapa do procedimento foi reduzido de 0 a 90% em intervalos de 10%, definindo 10 possíveis alternativas gerenciais, ou seja, frequências de manutenção passíveis de adoção. Nas equações de previsão das acelerações adaptadas na etapa anterior, T foi substituído pelas frequências simuladas permitindo estimar as acelerações verticais e horizontais de cada cenário administrativo, e, a partir delas, verificar a segurança operacional sob critério dinâmico.

Para calcular a tolerância de Nadal foram empregados valores que refletem as características dos trilhos e das rodas dos veículos da ferrovia analisada, a saber, ângulo de contato roda – trilho (θ) de 65° e coeficiente de atrito (μ) de 0,3. Portanto, o L/V crítico utilizado foi de:

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan\theta - \mu}{1 + \mu \tan\theta} \rightarrow \frac{\tan 65 - 0,3}{1 + 0,3 \tan 65} \rightarrow \frac{1,84}{1,64} \cong 1,12 \tag{45}$$

O valor de 1,12 determina o ponto crítico, a partir do qual considera-se que ocorrerá o descarrilamento, por isso, os serviços de manutenção deverão ser executados,

até, no máximo, o momento em que essa condição for atingida. Atualmente é comum que as empresas do setor adotem valores de 0,8 para esse critério, contudo, entende-se que tal valor estabelece uma referência para programação das manutenções, ou seja, uma vez encontrados segmentos nessas condições haverá tempo hábil para programação e realização das intervenções sem a necessidade de fechamento imediato do trecho ou restrições de velocidade por questões de segurança. Como esse trabalho não visa estabelecer a frequência exata das manutenções, mas indicar um intervalo que será referência para as ações futuras, o valor de 1,12 foi adotado, cabendo àqueles que aplicarem este procedimento analisarem essa questão segundo suas realidades, observando, por exemplo, a disponibilidade de equipes de manutenção, a previsão de janelas operacionais para intervenção, ou outros aspectos capazes de influenciar na margem de segurança ao definir a tolerância.

As Tabelas 21 e 22 apresentam detalhadamente os resultados obtidos na simulação de padrões de manutenção nos segmentos 8, 11 e 16. Nessas tabelas a coluna frequência indica os intervalos entre manutenções geométricas considerados em cada simulação, sendo que a primeira linha (cenário 1) de cada segmento corresponde à mínima frequência de socaria possível (TM_{i_n}) que determina o tempo necessário para que o índice de qualidade do parâmetro de referência alcance a tolerância de segurança geométrica partindo da condição pós manutenção.

As acelerações foram previstas em valores absolutos tendo em vista que as medições do banco de dados que sustentou o desenvolvimento do modelo estatístico eram todas positivas. Esse entendimento também foi adotado por Ratton Neto (1985).

As colunas sob o título “Forças” apresentam a carga dinâmica vertical por roda e a força lateral (horizontal), em toneladas, já considerando a influência da aceleração vertical e horizontal, respectivamente, previstas pelos correspondentes modelos. Como nessa aplicação as acelerações foram obtidas no interior dos veículos, as acelerações estimadas pelas equações $ac_{j_{nT}}$ precisaram ser aplicadas às Equações 6 e 7 de modo a estimar as forças na região de contato entre a roda e o trilho. Essas equações foram utilizadas porque foram desenvolvidas para uma ferrovia com características muito próximas daquelas encontradas na desta aplicação.

A coluna intitulada “Nadal” apresenta a razão entre as forças laterais e verticais para verificação da segurança pelo correspondente critério.

VUT designa a vida útil dos trilhos e foi calculada segundo o método previsto no roteiro metodológico do procedimento, sendo que nesse caso em específico todos os dados dessa coluna em todas as tabelas dizem respeito à vida útil prevista por desgaste, tendo em vista que em nenhum cenário de referência (destacados em negrito nas tabelas) as cargas alcançaram patamares suficientemente altos para o desenvolvimento de fadiga, tomando como referência o cálculo apresentado no Apêndice V.

VUD designa a vida útil dos dormentes, e a avaliação mediante a Equação 21 foi utilizada porque o trecho ferroviário em questão também emprega dormentes de madeira.

Nas colunas à direita de VUD são apresentados os custos totais por tipo de manutenção, além do custo total de longo prazo (CCV). O número de intervenções e os custos em questão foram calculados tendo como referência período de análise de 30 anos.

Devido a indisponibilidade de valores unitários para execução das manutenções no trecho estudado, esse trabalho adotou as composições de custo do DNIT, tendo como referência a execução dos serviços de forma mecanizada e para via em bitola larga. O Anexo III apresenta as tabelas com o detalhamento dos valores utilizados, e a Tabela 20 resume os valores unitários utilizados para os serviços.

Tabela 20: Custos unitários utilizados para estimar as despesas com manutenção

Serviço	Custos (R\$)	
	km	200 m
Manutenção geométrica	6.160,84	1.232,168
Renovação de lastro (altura de 30 cm)	348.234,54	-
Renovação parcial de lastro (12%)	41.788,1448	8.357,62896
Renovação final de lastro (52%)	181.081,9608	36.216,39216
Renovação de trilhos	2.634.202,04	526.840,408
Renovação de dormentes	871.246,60	174.249,32

Fonte: SICRO (2023).

Devido à diferença de vida útil entre trilhos e dormentes foi assumida renovação independente entre esses componentes, com os elementos de fixação sendo substituídos juntamente com os trilhos. Quanto ao lastro, foi considerada sistemática de renovação conforme estabelecido pelo procedimento, com descarga complementar a cada serviço de conserva, com renovação de 52% no quinto serviço consecutivo.

Tendo em vista que os custos foram estimados a partir de valores unitários atualizados e referentes a uma data comum, e que esses valores são um parâmetro decisório, não tendo relevância, nesta aplicação em específico, seu valor monetário

atualizado, não foram empregadas técnicas de correção dos valores futuros para um valor presente líquido. Entende-se que essas operações apenas alterariam a ordem de grandeza dos valores, não influenciando em sua proporcionalidade, ou seja, os resultados subsidiariam as mesmas conclusões.

Tabela 21: Resultados detalhados do procedimento aplicado aos segmentos 8 e 11. Em negrito estão destacados os cenários de referência, ou seja, que atenderam aos critérios de segurança e custo

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg. ¹	Cen. ²	Freq. ³ (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert. ⁴	Hor. ⁵	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
8	1	766	0,76	0,13	13,43	1,9	0,14	11,8	8,3	17.250,35	100.291,55	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.766.403,46
8	2	689,4	0,74	0,15	13,32	2,12	0,16	12	8,4	18.482,52	100.291,55	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.803.852,02
8	3	612,8	0,71	0,16	13,19	2,33	0,18	12,2	8,5	20.946,86	117.006,81	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.823.031,61
8	4	536,2	0,68	0,18	13,03	2,53	0,19	12,5	8,6	24.643,36	133.722,06	144.865,57	522.747,96	1.053.680,82	1.879.659,77
8	5	459,6	0,64	0,19	12,84	2,71	0,21	12,9	8,7	28.339,86	158.794,95	144.865,57	522.747,96	1.053.680,82	1.908.429,16
8	6	383	0,6	0,2	12,59	2,88	0,23	13,3	8,9	34.500,70	192.225,47	181.081,96	522.747,96	1.053.680,82	1.984.236,91
8	7	306,4	0,54	0,21	12,27	3,03	0,25	13,9	9,1	43.125,88	234.013,61	253.514,75	522.747,96	1.053.680,82	2.107.083,01
8	8	229,8	0,45	0,22	11,85	3,16	0,27	14,5	9,4	57.911,90	317.589,90	325.947,53	522.747,96	1.053.680,82	2.277.878,10
8	9	153,2	0,34	0,23	11,27	3,26	0,29	15,4	9,9	87.483,93	476.384,85	507.029,49	522.747,96	526.840,41	2.120.486,64
8	10	76,6	0,18	0,23	10,42	3,33	0,32	16,5	10,7	174.967,86	952.769,70	1.014.058,98	348.498,64	526.840,41	3.017.135,59
11	1	245	0,4	0,56	11,56	8,03	0,69	15	9,6	54.215,39	300.874,64	289.731,14	522.747,96	1.053.680,82	2.221.249,95
11	2	220,5	0,36	0,53	11,35	7,56	0,67	15,3	9,8	60.376,23	334.305,16	325.947,53	522.747,96	526.840,41	1.770.217,29
11	3	196	0,32	0,49	11,14	7,1	0,64	15,6	10	67.769,24	367.735,67	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.709.224,28
11	4	171,5	0,28	0,46	10,94	6,63	0,61	15,9	10,2	77.626,58	426.239,08	434.596,71	348.498,64	526.840,41	1.813.801,41
11	5	147	0,24	0,43	10,74	6,16	0,57	16,1	10,4	91.180,43	501.457,74	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.975.006,71
11	6	122,5	0,2	0,4	10,55	5,69	0,54	16,4	10,5	109.662,95	601.749,29	615.678,67	348.498,64	526.840,41	2.202.429,95
11	7	98	0,17	0,36	10,36	5,22	0,5	16,6	10,7	136.770,65	743.828,98	796.760,63	348.498,64	526.840,41	2.552.699,30
11	8	73,5	0,13	0,33	10,16	4,76	0,47	16,8	11	182.360,86	994.557,85	1.050.275,37	348.498,64	526.840,41	3.102.533,13
11	9	49	0,08	0,3	9,92	4,29	0,43	17,1	11,2	274.773,46	1.496.015,58	1.593.521,26	348.498,64	526.840,41	4.239.649,35
11	10	24,5	0,02	0,27	9,6	3,82	0,4	17,4	11,6	549.546,93	2.983.673,54	3.223.258,90	348.498,64	526.840,41	7.631.818,42

¹ Segmento; ² Cenário; ³ Frequência; ⁴ Vertical; ⁵ Horizontal.

Tabela 22: Resultados do procedimento aplicado ao segmento 16

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
16	1	1239	0,33	1,29	11,21	18,6	1,66	15,5	9,9	9.857,34	58.503,40	36.216,39	522.747,96	526.840,41	1.154.165,51
16	2	1115,1	0,22	1,13	10,64	16,19	1,52	16,2	10,5	11.089,51	66.861,03	36.216,39	348.498,64	526.840,41	989.505,98
16	3	991,2	0,11	0,96	10,09	13,79	1,37	16,9	11	13.553,85	75.218,66	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.036.544,34
16	4	867,3	0,02	0,79	9,58	11,4	1,19	17,5	11,6	14.786,02	83.576,29	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.046.134,14
16	5	743,4	0,08	0,63	9,89	9,03	0,91	17,1	11,2	17.250,35	100.291,55	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.065.313,73
16	6	619,5	0,15	0,46	10,3	6,68	0,65	16,7	10,8	20.946,86	117.006,81	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.121.941,89
16	7	495,6	0,22	0,3	10,61	4,36	0,41	16,3	10,5	27.107,70	150.437,32	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.197.749,63
16	8	371,7	0,25	0,15	10,79	2,11	0,2	16,1	10,3	35.732,87	200.583,10	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.292.736,98
16	9	247,8	0,24	0	10,75	0,04	0	16,1	10,4	54.215,39	300.874,64	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.520.160,22
16	10	123,9	0,16	0,14	10,32	1,97	0,19	16,6	10,8	108.430,78	593.391,66	615.678,67	348.498,64	526.840,41	2.192.840,15

Identificados por meio das simulações, os intervalos de referência (em negrito), quando necessário, foram ajustados visando estabelecer a menor frequência possível capaz de atender aos três critérios (segurança geométrica, segurança dinâmica e menor custo).

O segmento 8 apresentou no padrão de menor frequência de manutenção geométrica, ou seja, com ciclo de 766 dias, índice de Nadal abaixo da tolerância de segurança, além do que essa mesma frequência resultou no menor custo de longo prazo. O segmento 11 também apresentou, como em seu predecessor, índices de Nadal seguros em todos os padrões de intervenção simulados, porém nessa seção da via a antecipação das manutenções foi capaz de resultar em benefícios financeiros, com a frequência simulada no cenário 3 apresentando o menor CCV. No segmento 16, esse perfil de comportamento dos custos também foi observado, contudo, frequências menores de manutenção a partir do cenário 4, apresentaram razão L/V insegura, portanto, embora o menor CCV tenha sido delimitado no cenário 2, como é prerrogativa deste procedimento a garantia da segurança operacional, o cenário 5 foi tomado como referência.

Estes são os únicos resultados apresentados detalhadamente, pois todos os demais segmentos apresentaram perfis de comportamento semelhantes. Assim, na Tabela 23 são apresentados os resultados finais obtidos pelo procedimento para todos os segmentos válidos analisados, inclusive, com o ajuste dos ciclos dos segmentos 11 e 16. O Apêndice VI apresenta as tabelas com o detalhamento das simulações de todos os segmentos.

Tabela 23: Resultados consolidados obtidos na aplicação do procedimento

Segmento	Freq. de man. geo. ¹			Nadal		CCV (R\$ em 30 anos)		Critério de planejamento
	TM_{in}	Proced. ²	Redução ³ (%)	Em TM_{in}	Proced.	Tradicional	Proced.	
8	766	766	0%	0,14	0,14	1.766.403,46	1.766.403,46	Geométrico
9	611	611	0%	0,15	0,15	1.121.941,89	1.121.941,89	Geométrico
11	245	196	20%	0,69	0,64	2.221.249,95	1.709.224,28	CCV
13	487	487	0%	0,87	0,87	1.197.749,63	1.197.749,63	Geométrico
15	230	138	40%	1,48	1,08	3.291.788,62	2.751.904,18	CCV
16	1239	833	33%	1,66	1,12	1.154.165,51	1.055.723,93	Nadal
35	759	720	5%	0,11	0,08	1.239.563,05	1.102.762,29	CCV
36	1910	1910	0%	0,96	0,96	951.146,80	951.146,80	Geométrico
37	245	244	0%	1,06	1,06	2.221.249,95	1.694.409,54	CCV
38	748	623	17%	0,64	0,61	1.766.403,46	1.121.941,89	CCV
39	247	177	28%	1,21	1,06	2.937.154,41	2.495.711,55	CCV
47	1076	1054	2%	0,27	0,27	1.201.203,86	1.026.954,54	CCV
73	433	48	89%	2,44	1,12	3.742.821,28	4.315.457,10	Nadal
74	1660	652	61%	0,54	0,09	2.188.666,73	1.112.352,09	CCV

(continuação)

Segmento	Freq. de man. geo. ¹			Nadal		CCV (R\$ em 30 anos)		Critério de planejamento
	TM_{in}	Proced. ²	Redução ³ (%)	Em TM_{in}	Proced.	Tradicional	Proced.	
75	864	390	55%	0,42	0,05	1.747.223,87	1.457.396,50	CCV
76	612	612	0%	0,30	0,30	1.121.941,89	1.121.941,89	Geométrico
77	791	685	13%	0,18	0,12	1.229.973,25	1.102.762,29	CCV
78	769	214	72%	0,32	0,09	2.107.083,01	1.643.006,32	CCV
79	696	696	0%	0,83	0,83	1.102.762,29	1.102.762,29	Geométrico
94	2045	2045	0%	0,38	0,38	951.146,80	951.146,80	Geométrico
97	249	116	53%	1,83	1,12	3.206.750,67	2.979.327,43	Nadal
101	371	371	0%	0,60	0,60	1.292.736,98	1.292.736,98	Geométrico
104	804	79	90%	9,89	1,12	1.756.813,66	2.950.917,63	Nadal
106	328	328	0%	0,33	0,33	1.358.954,93	1.358.954,93	Geométrico
110	281	281	0%	0,06	0,06	1.434.762,67	1.434.762,67	Geométrico
112	261	100	62%	1,43	0,79	4.572.892,68	3.206.750,67	CCV
113	501	501	0%	0,47	0,47	1.188.159,84	1.188.159,84	Geométrico
123	349	129	63%	2,23	1,12	3.373.372,34	2.300.871,52	Nadal
125	350	246	30%	0,85	0,65	3.824.405,00	2.221.249,95	CCV
210	1734	1623	6%	0,47	0,46	1.134.985,91	960.736,59	CCV
211	1545	866	44%	1,68	1,12	970.326,39	1.046.134,14	Nadal
212	6559	1508	77%	0,10	0,20	3.350.378,91	970.326,39	CCV
219	1344	1344	0%	0,48	0,48	979.916,19	979.916,19	Geométrico
220	2070	736	64%	0,56	0,07	2.880.166,66	1.065.313,73	CCV
221	1299	1299	0%	0,65	0,65	979.916,19	979.916,19	Geométrico
222	1691	1122	34%	1,04	0,74	1.661.826,32	989.505,98	CCV
223	1900	1165	39%	0,36	0,38	1.652.236,52	989.505,98	CCV
224	791	326	59%	0,55	0,46	1.756.813,66	1.533.204,25	CCV

¹ Frequência de manutenção geométrica; ² Frequência de manutenção determinada pelo procedimento;³ Redução percentual do ciclo de manutenção definido pelo procedimento em relação ao TM_{in} .

6.6 Análise dos Resultados

As distorções presentes nos registros de inspeção geométrica culminaram na eliminação da maioria dos segmentos estabelecidos no processo de subdivisão do trecho ferroviário. Não se sabe os motivos de tais distorções, entretanto, trabalhos como os de Rodrigues (2001) mencionam tais situações e a necessidade da depuração preliminar dos dados visando a eliminar tais problemas. Cada parâmetro, em cada segmento e em cada um dos relatórios de inspeção utilizados, requereria análise individual visando a averiguar as características das distorções de modo a sustentar a eliminação do segmento ou a seleção personalizada do conjunto de dados a serem utilizados. Porém, nesta aplicação, entendeu-se que a análise dos segmentos válidos em questão já cumpriu o propósito de

exemplificar o uso do procedimento, podendo seus resultados serem tomados como representativos do trecho como um todo.

Como demonstrado na Tabela 19, a frequência TM_{i_n} prevista pelos modelos de degradação variou consideravelmente entre os segmentos simulados. Tal característica corrobora o conceito de que cada segmento ferroviário pode apresentar perfil próprio de degradação como resultado de suas características particulares, o que influencia na necessidade de manutenção. A desagregação do trecho ferroviário em segmentos de menor extensão, portanto, mostrou-se pertinente, pois permitiu modelar essas particularidades, fato entendido como determinante para a obtenção de estratégias de intervenção com maior capacidade de garantir a segurança operacional, tendo em vista que análises agregadas poderiam ignorar seções cuja degradação se desenvolve sob ritmo mais acentuado.

O procedimento definiu padrões de manutenção nos segmentos analisados que podem ser distinguidos em três grupos.

O primeiro reúne 13 segmentos, cerca de 34% das seções avaliadas, identificados na Tabela 23 pelo termo “Geométrico” na coluna que discrimina o critério de manutenção. Nessa família de resultados a condição geométrica não gerou acelerações capazes de implicar em índices de Nadal inseguros nos cenários simulados. Além disso, nos cenários com maior frequência de manutenção geométrica os benefícios financeiros decorrentes do incremento da vida útil dos componentes não compensaram o aumento dos custos devido ao aumento do número de socarias, fazendo com que o menor CCV fosse obtido no cenário de menor frequência de correção geométrica. Portanto, nessas seções o padrão de intervenções segue o mesmo entendimento dos modelos correntes de planejamento, em que, respeitando o critério de segurança estabelecido pelas tolerâncias geométricas, as frequências de manutenção são guiadas pelo tempo necessário para que a degradação do parâmetro de referência atinja o respectivo limite estabelecido em norma.

O segundo grupo de resultados é aquele em que a segurança dinâmica foi o parâmetro de maior relevância na determinação da frequência de manutenção. Nos segmentos 16, 73, 97, 104, 123, 211, ou seja, cerca de 16% das seções analisadas, o limite de Nadal foi atingido antes das tolerâncias de segurança geométrica, além de antes dos cenários que resultaram nos menores CCVs. Como é prerrogativa do procedimento assegurar a segurança operacional, nessas seções a frequência de manutenção foi estabelecida segundo avaliação da condição dinâmica, sendo o momento de referência

aquele em que o limite L/V de 1,12 foi atingido, e o custo de manutenção nesses casos foi o menor possível, ou seja, o menor obtido sob uma operação segura.

Dentre esses resultados, os segmentos 73 e 104 apresentaram ciclos de manutenção significativamente curtos. Tendo em vista as consequências financeiras de sua adoção, não é recomendável que as correspondentes frequências sejam tomadas como parâmetro de intervenção a longo prazo nesses segmentos. Esses resultados suscitam ações de curto prazo que permitam manter a operação segura até que se descubra as razões do comportamento em questão e sejam tomadas providências que resultem em uma condição semelhante àquela vista nos demais segmentos.

O último grupo de resultados refere-se às seções em que o critério de maior relevância para determinação dos ciclos de manutenção foi o de mínimo custo, em total de 19 segmentos (50%), identificados na Tabela 23 por meio da sigla CCV. Nesses trechos a antecipação das manutenções geométricas resultou em benefícios econômicos significativos devido à redução da quantidade de renovações, mesmo tendo o número de socarias aumentado. Embora fosse possível adotar frequências menores de intervenção sob o ponto de vista da segurança operacional (tanto dinâmica quanto geométrica), nesses segmentos o fator determinante para formulação da política de manutenção foi o custo total de longo prazo (CCV).

Portanto, as equações de previsão da vida útil dos componentes considerando o efeito das forças dinâmicas, capturaram e expressaram a ligação entre as manutenções geométricas e as renovações, subsidiando resultados que corroboraram a relevância dessa relação na obtenção de políticas de manutenção mais econômicas. As Figuras 6.11 e 6.12, relativas ao Segmento 11, apresentam, respectivamente, a variação da vida útil dos componentes em função da frequência de manutenção geométrica, e o comportamento dos custos de manutenção e do CCV em função desta mesma variável. Nota-se que o perfil dos custos é semelhante aquele apresentado na Figura 1.2, o que demonstra que o procedimento ora proposto foi capaz de se valer dessa realidade prevista conceitualmente para estabelecer estratégias de manutenção mais econômicas sem comprometer o padrão de desempenho e segurança operacional. Os demais segmentos desse grupo de resultados apresentaram perfis de degradação e custo com variação semelhante àquela demonstrada nessas figuras.

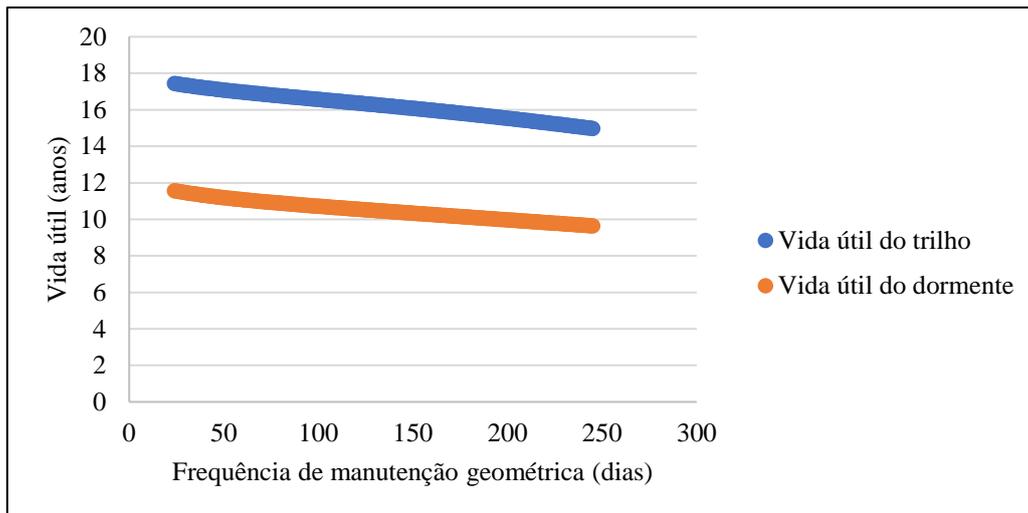


Figura 6.11: Vida útil dos componentes no Segmento 11.

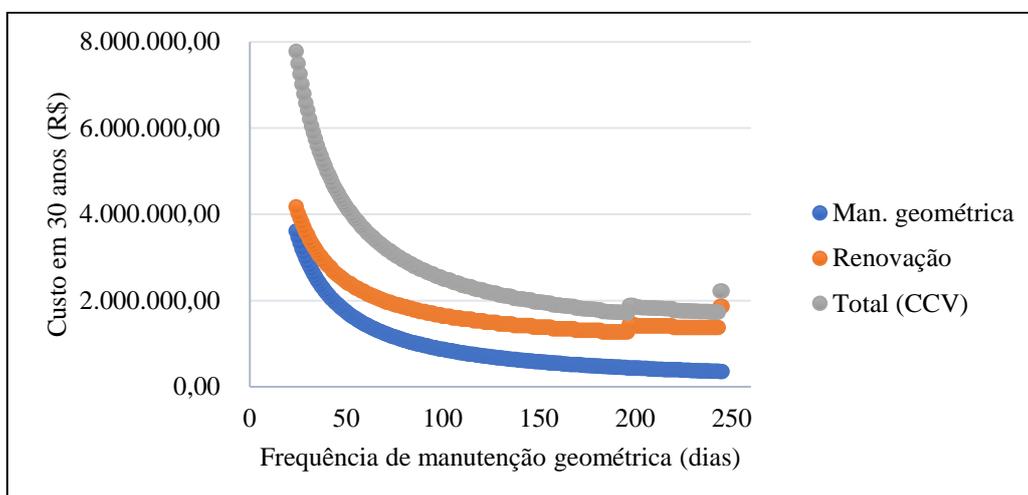


Figura 6.12: Custo do ciclo de vida do Segmento 11.

A política de manutenção definida pelo procedimento, expressa por meio das frequências de referência apresentadas na Tabela 23, gerou, no período de 30 anos considerado, o custo de ciclo de vida de R\$ 40.681.842,30, valor este definido por meio da soma dos CCVs individuais dos segmentos.

A política baseada na postergação das manutenções ao limiar das tolerâncias geométricas geraria um CCV de R\$ 45.973.229,58, o que indica que o procedimento proposto foi capaz de obter benefícios financeiros relevantes, com economia potencial da ordem de 11,5%.

Durante o período noturno em que o transporte de passageiros é interrompido, precede as manutenções o recolhimento dos trens, ações visando desenergizar as vias, preparação das equipes e o seu deslocamento até os pontos de intervenção. Feitas as

manutenções, as equipes são desmobilizadas, o sistema é energizado e os trens são posicionados para início da prestação de serviço. Essas operações influenciam no tempo disponível para manutenção, e, conseqüentemente, na extensão do trecho que pode ser mantida. Apesar de entre os segmentos válidos existirem alguns contíguos, que poderiam receber manutenções conjuntamente, não foi disponibilizado para essa aplicação dados que possibilitassem estabelecer o tempo disponível para intervenção, o que não permitiu que fossem consideradas intervenções em seções justapostas.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta um procedimento de planejamento de políticas de manutenção da superestrutura ferroviária cujo objetivo é definir a frequência de manutenção geométrica que garanta a segurança operacional ao menor custo possível, considerando para tanto o impacto da dinâmica veicular.

As principais contribuições deste método, que o diferenciam das técnicas correntes de planejamento, são a previsão das acelerações dos veículos em relação à via permanente em função da condição geométrica, o que permite estimar as forças dinâmicas sobre a via e avaliar a segurança operacional baseada no comportamento dinâmico do trem; e a consideração do impacto das forças dinâmicas sobre a degradação física dos componentes, relacionando os ciclos de renovação e a frequência de manutenção geométrica, aspecto explorado na redução do custo do ciclo de vida do sistema de manutenção.

Os resultados obtidos por meio da aplicação do procedimento corroboraram sua viabilidade bem como seus benefícios técnicos e financeiros ao obter padrões de manutenção mais seguros e econômicos. A significância estatística dos modelos de previsão das acelerações reforçou a percepção da relação entre a geometria e a dinâmica veicular, assim como com o perfil das acelerações previstas e suas implicações sobre as vidas úteis dos componentes. O número de variáveis nesses modelos também confirmou o entendimento de que as acelerações dos veículos em relação à via não são fruto de deformações isoladas, mas são função do efeito combinado dos parâmetros, dentre os quais, inclusive, destacaram-se o alinhamento e nivelamento longitudinais, identificados como de maior relevância estatística e adotados como variáveis independentes dos modelos em questão.

A segmentação da via representou as particularidades do trecho ferroviário, tendo em vista a diferença no ritmo de degradação geométrica e nas acelerações previstas nas seções analisadas. Tal individualização mostrou-se relevante na avaliação da segurança, já que em determinados segmentos a tolerância de Nadal foi atingida antes das tolerâncias geométricas.

Quanto aos custos de intervenção e à simulação de cenários para formulação da política de manutenção de menor CCV, os resultados obtidos novamente demonstraram a relevância da segmentação da via tendo em vista a definição de padrões distintos de intervenção, que puderam ser organizados em três famílias de resultados. A primeira

engloba seções em que o limite de segurança estipulado pelo critério de Nadal não foi atingido até a tolerância geométrica, assim como o incremento da vida útil dos componentes não compensou o acréscimo de custos decorrente do maior número de manutenções geométricas. Esses resultados indicam que os procedimentos correntes de planejamento de manutenções não são inadequados, mas, limitados, como demonstrado pelas demais famílias de resultados.

A segunda família reúne segmentos em que o critério de Nadal foi atingido antes das tolerâncias de segurança geométrica, evidenciando a pertinência e necessidade de métodos administrativos que contemplem a previsão das condições dinâmicas visando evitar condições operacionais inseguras e inesperadas.

A terceira família reúne as seções em que o CCV foi o critério determinante para definição da frequência de manutenção. Estes resultados demonstram que os modelos atuais de planejamento não necessariamente geram economias mediante a postergação das intervenções. Nos trechos em questão a tolerância de Nadal não foi atingida antes da geométrica e o padrão de variação das acelerações e cargas dinâmicas, e suas consequências sobre a vida útil dos componentes e o número de renovações, viabilizou economias por meio da antecipação estratégica das manutenções geométricas.

Assim, a partir das informações ora disponíveis e dos resultados obtidos, nessa aplicação recomenda-se que sejam adotadas as estratégias de manutenção personalizadas para cada segmento, ou seja, intervenções independentes em cada seção de 200 m seguindo as frequências estabelecidas pelo procedimento. Quando estiverem disponíveis dados que permitam estabelecer as janelas de intervenção e calcular os dispêndios com preparação e deslocamento dos equipamentos de manutenção até os locais de manutenção, essa decisão deve ser reavaliada tendo em vista a potencial economia de escala resultante de manutenções em segmentos contíguos.

Portanto, o procedimento proposto contribui para o aprimoramento das técnicas correntes de planejamento ao descrever de maneira mais completa o comportamento físico e financeiro da via permanente, resultando em políticas de manutenção mais eficientes tanto sob o ponto de vista da segurança operacional, quanto financeiro. A redução orçamentária potencial de 11,5% obtida na aplicação em questão corrobora essa conclusão.

Mesmo com a conjugação dos modelos técnicos com os modelos econômicos, e o uso de métodos tecnológicos para estimar o comportamento futuro da via, o que se

pretende estabelecer é uma diretriz que resultará nas melhores condições da via com o menor custo.

Todavia, a dimensão da economia obtida na aplicação não deve ser vista em sua literalidade, principalmente porque certos aspectos do procedimento podem ter sido influenciados pelas limitações encontradas ao longo de seu desenvolvimento, como por exemplo, aquelas presentes nos modelos de previsão das vidas úteis dos componentes, que requereram a adaptação de equações. Tais limitações não afetam a veracidade desta abordagem, apenas influenciam a magnitude da economia gerada, e, por isso, os resultados são um indicativo do potencial benéfico que estudos que explorem as lacunas de conhecimento identificadas podem ter, tanto no aprimoramento deste procedimento quanto para o avanço da ciência nesse campo.

Em adição, resultados inesperados, tal como segmentos com ciclos de manutenção relativamente curtos, demonstraram que determinados aspectos do método requerem atenção visando aprimoramentos, configurando-se, portanto, como oportunidades a serem exploradas em pesquisas futuras, destacadas na seção seguinte.

7.1 Sugestões de Pesquisas Futuras

As seguintes oportunidades de pesquisa foram identificadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho:

- Desenvolvimento de sistemática que permita estimar com maior precisão a capacidade de recuperação da geometria pelos serviços de manutenção, de modo a prever as deformações remanescentes na via em função da condição anterior à intervenção;
- Reaplicação do procedimento proposto a partir de inspeções dinâmicas que tenham medido de forma contínua todas as acelerações geradas durante o deslocamento do veículo;
- Reaplicação do procedimento utilizando dados de inspeções dinâmicas em que as acelerações dos veículos em relação à via foram medidas por meio de acelerômetros instalados nos *axle-boxes*;

- Avaliar a pertinência de outros critérios na definição dos ciclos de manutenção, tais como tolerâncias dinâmicas relativas ao conforto dos passageiros;
- Análise das equações de previsão de vidas úteis dos componentes adotadas no procedimento, visando identificar a necessidade de ajuste dos valores adotados em seus fatores, tendo em vista o avanço tecnológico dos componentes e as mudanças administrativas na gestão das tolerâncias de degradação;
- Avaliar como a variação do ângulo de contato e do coeficiente de atrito entre a roda e o trilho na determinação da tolerância de Nadal podem afetar os resultados do procedimento;
- Desenvolvimento de procedimento análogo ao apresentado, porém tendo como referência para previsão da vida útil dos componentes, modelos formulados estatisticamente a partir do cruzamento de dados provenientes de histórico de renovações e de inspeções geométricas. Conhecida a amplitude das deformações geométricas à qual os componentes estiveram expostos, e sabendo sua vida útil sob tais condições, tornar-se-á possível formular equações empíricas que meçam a influência da geometria sobre a degradação física;
- Estudo sobre estratégias de segmentação da via permanente no planejamento de manutenções, que considere aspectos como características construtivas do trecho ferroviário, a homogeneidade da degradação, o melhor índice para retratar as condições da via, assim como aspectos financeiros ligados à mobilização de equipes e penalidades devido às interferências no tráfego. Embora a subdivisão em seções padronizadas de 200 metros esteja consolidada, uma sistemática que resulte em seções de comprimento personalizado pode retratar particularidades técnicas e operacionais de cada ferrovia;
- Tendo em vista os segmentos analisados na aplicação do procedimento que apresentaram condição dinâmica segura até a frequência mínima de manutenção geométrica (TM_{i_n}), tornam-se relevantes estudos que investiguem quais os critérios empregados pelas agências reguladoras na definição das tolerâncias geométricas, visando averiguar a possibilidade de

relativizá-las quando as acelerações indicarem condições operacionais seguras mesmo em trechos com deformações geométricas acima dos limites em questão. Essa alternativa pode reduzir o CCV naqueles segmentos em que a antecipação das manutenções não é capaz de gerar benefícios financeiros relevantes.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, R. A., ZAREMBSKI, A. M. “On the prediction of the fatigue life of rails”. **Bulletin of the American Railway Engineering Association**, Bulletin 666, v. 79, jan-fev 1978.
- AKEEL, N.A., SAJURI, Z., ARIFFIN, A. K. “Analysis of rolling contact fatigue damage initiation at the wheel-rail interface”. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 5, n. 12, pp. 937-945, 2011.
- ALMEIDA, R. N. **O método dos mínimos quadrados: estudo e aplicações para o ensino médio**. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2015.
- AMARAL, G. D., SILVA, V. L., REIS, E. A. **Análise de Regressão Linear no Pacote R. Relatório técnico, Série Ensino, RTE 001/2009**. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Estatística, 2009. Disponível em <<http://www.est.ufmg.br/portal/arquivos/rts/RT-SE-2009.pdf>>. Acesso em 23 de março de 2023.
- ANDRADE, A. R. **Renewal decisions from a Life-cycle Cost (LCC) Perspective in Railway Infrastructure: An integrative approach using separate LCC models for rail and ballast components**. Tese de M.Sc., Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2008.
- ANDRADE, A. R., TEIXEIRA, P. F. “Statistical modelling of railway track geometry degradation using Hierarchical Bayesian models”. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 142, pp. 169–183, 2015.
- ANDREWS, J., PRESCOTT, D., ROZIÈRES, F. D. “A stochastic model for railway track asset management”. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 130, pp. 76-84, 2014.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16387: Via férrea — Classificação de vias. Rio de Janeiro, p. 25. 2020.
- BAKHTIARY, A., ZAKERI, J. A., MOHAMMADZADEH, S. “An opportunistic preventive maintenance policy for tamping scheduling of railway tracks”. **International Journal of Rail Transportation**, v. 9, n. 1, pp. 1-22, 2020.
- BARBOSA, R. S. “Safety Criterion for Railway Vehicle Derailment”. In: **8th International Heavy Haul Conference**, pp. 477-484, Rio de Janeiro, Jun. 2005.
- BARIA, I. **Sistema de gerência de pavimentos aplicado à via permanente metroferroviária auxiliado por um sistema de informações geográficas**. Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2015.
- BENEDETTO, A., CIAMPOLI, L. B. “A Computer-Aided Model for the Simulation of Railway Ballast by Random Sequential Adsorption Process”. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 33, pp. 243–257, 2018.

- Brasil, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO. Relatório Sintético de Composições de Custos – Sudeste – Rio de Janeiro – Julho/2023. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/custos-e-pagamentos/custos-e-pagamentos-dnit/sistemas-de-custos/sicro_antiga/sudeste/rio-de-janeiro/2023/julho/julho-2023>. Acesso em: 24 de novembro de 2023.
- CAETANO, L. F., TEIXEIRA, P. F. “Availability Approach to Optimizing Railway Track Renewal Operations”. **Journal of Transportation Engineering**, v. 139, n. 9, pp. 941-948, 2013.
- CAETANO, L. F., TEIXEIRA, P. F. “Optimisation model to schedule railway track renewal operations: a life-cycle cost approach”. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 11, n. 11, pp. 1524-1536, 2015.
- CARVALHO, A. X. Y., GÓES, G. S. **Introdução ao Software R e à Análise Econométrica**. Notas de Aula. Escola Nacional de Administração Pública – ENAP, 2018. Disponível em <https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/3452/4/Aula%203a%20-%20Geraldo%20Goes%20e%20Alexandre%20Ywata%20-%20Regressao_Linear_v2.pdf>. Acesso em 23 de março de 2023.
- CHIACHÍO, J., CHIACHÍO, M., PRESCOTT, D. *et al.* “A knowledge-based prognostics framework for railway track geometry degradation”. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 181, pp. 127–141, 2019.
- Code of Federal Regulations. Title 49 – Transportation, Subtitle B - Other Regulations Relating to Transportation, Chapter II - Federal Railroad Administration, Department of Transportation, Part 213 - Track Safety Standards, Subpart C. 2023.
- COIMBRA, M. V. **Modos de falha dos componentes da via permanente ferroviária e seus efeitos no meio ambiente**. Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- CONSOLI, L. R. P. **Análise do comportamento dinâmico lateral de um veículo ferroviário**. Dissertação de M.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2007.
- COSTA, F. C. B. **Estudo da resposta dinâmica de truques ferroviários através de instrumentação de trilho e comparação com resultados de simulação dinâmica de vagões**. Monografia. Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, MG, Brasil, 2016.
- DATSYSHYN, O.P., MARCHENKO, H.P., GLAZOV, A.Y. "On the special angle of surface cracks propagation in the railway rail heads". **Engineering Fracture Mechanics**, v. 206, pp. 452–462, 2019.
- DI LUCCIO, A. R. A. **Estudo dinâmico de uma composição ferroviária de carga e análise de condições de descarrilamento**. Projeto de Graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2016.

- DIANA, G., BRUNI, S., CORRADI, R. *et al.* “On the derailment of a railway vehicle. Influence of different parameters”. **Ingegneria Ferroviaria**, v. 2, pp. 109-135, 2012.
- DIRKS, B., ENBLUM, R. “Prediction model for wheel profile wear and rolling contact fatigue”. **Wear**, v. 271, pp. 210–217, 2011.
- EMILIANO, P. C. **Fundamentos e aplicações dos critérios de informação: Akaike e Bayesiano**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.
- EN 13848–5. Railway applications – track – track geometry quality – Part 5: Geometric quality levels. Brussels, Belgium: CEN (European Committee for Standardization), 2008.
- FERREIRA, J. N. A. C. **Intervenções de construção, renovação e manutenção na via-férrea**. Dissertação de M.Sc., Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.
- GIUNTA, M., BRESSI, S., D’ANGELO, G. “Life cycle cost assessment of bitumen stabilised ballast: A novel maintenance strategy for railway track-bed”. **Construction and Building Materials**, v. 172, pp. 751–759, 2018.
- GUADAGNINI, P. H., ROCHA, F. S., BARLETTE, V. E. “Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força”. **Latin-American Journal of Physics Education**, v. 5, n. 4, pp. 753-762, 2011.
- GULER, H. “Decision Support System for Railway Track Maintenance and Renewal Management”. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 27, n. 3, pp. 292 – 306, 2013.
- GULER, H. “Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms”. **Gradevinar**, v. 68, pp. 979–993, 2016.
- GULER, H., JOVANOVIC, S., EVREN, G. “Modelling railway track geometry deterioration”. **Transport**, v. 164, pp. 65–75, 2011.
- GULLERS, P., ANDERSSON, L., LUNDÉN, R. “High-frequency vertical wheel–rail contact forces—Field measurements and influence of track irregularities”. **Wear**, v. 265, pp. 1472–1478, 2008.
- GUO, Y., MARKINE, V., SONG, J. *et al.* “Ballast degradation: Effect of particle size and shape using Los Angeles Abrasion test and image analysis”. **Construction and Building Materials**, v. 169, pp. 414–424, 2018.
- HAMARAT, M. Z., KAEWUNRUEN, S., PAPAELIAS, M. “A Life-Cycle Cost Analysis of Railway Turnouts Exposed to Climate Uncertainties”. **IOP Conference Series Materials Science and Engineering**, v. 471, n. 6, 2019.
- HIGGINS, C., LIU, X. “Modeling of track geometry degradation and decisions on safety and maintenance: A literature review and possible future research directions”. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 232, n. 5, pp. 1385-1397, 2017.

- HUANG, J. Y. “Nadal’s Limit (L/V) to Wheel Climb and Two Derailment Modes”. **Engineering Physics**, v. 5, n. 1, pp. 1-8, 2021.
- INDRARATNA, B. *et al.* “Geotechnical properties of ballast and the role of geosynthetics in rail track stabilization”. **Ground Improvement**, v. 10, n. 3, pp. 91–101, 2006.
- International Standard IEC 60300-3-3. Dependability management - Part 3-3: Application guide - Life cycle costing. Geneva, 2004.
- KAEWUNRUEN, S., LEWANDROWSKI, T., CHAMNIPRASART, K. “Dynamic Responses of Interspersed Railway Tracks to Moving Train Loads”. **International Journal of Structural Stability and Dynamics**, v. 18, n. 1, 2018.
- KAEWUNRUEN, S., REMENNIKOV, A. M. “Dynamic Crack Propagations in Prestressed Concrete Sleepers in Railway Track Systems Subjected to Severe Impact Loads”. **Journal of Structural Engineering**, v. 136, n. 6, pp. 749-754, 2010.
- KHAJEHEI, H., AHMADI, A., SOLEIMANMEIGOUNI, I. *et al.* “Allocation of effective maintenance limit for railway track geometry”. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 15, n. 12, pp. 1597–1612, 2019.
- KHOUZANI, A. H. E., GOLROO, A., BAGHERI, M. “Railway Maintenance Management Using a Stochastic Geometrical Degradation Model”. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 143, n. 1, 2017.
- KOOHMISHIA, M., PALASSIB, M. “Degradation of railway ballast under impact loading considering the morphological properties of aggregate”. **Transportation Geotechnics**, v. 25, 2020.
- LEE, J. S. *et al.* “Track condition monitoring by in-service trains: a comparison between axle-box and bogie accelerometers”. **5th IET Conference on Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011)**, Derby, pp. 1-6, 2011.
- LEE, J. S., CHOI, I. Y., KIM, I. K., *et al.* “Tamping and renewal optimization of ballasted track using track measurement data and genetic algorithm”. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 144, n. 3, 2017.
- LICHTBERGER, B. **Track Compendium: Formation, Permanent Way, Maintenance, Economics**. 1 ed. Hamburg, Eurailpress, 2005.
- LIMA, H. A. D. **Procedimento para seleção de método para manutenção da geometria da superestrutura ferroviária**. Tese de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- LIMA, J. B. **Utilização de sistemas de medição com base na vibração dinâmica para análise e prevenção de descarrilamentos**. Dissertação de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.

- LIMA, J. B., LOPES, L. A. S., ARAGÃO FILHO, L. A. C. M. “Contribuição à manutenção da via permanente com acelerômetros em pacotes inerciais portáteis”. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, 2021.
- LITHERLAND, J., ANDREWS, J. A. “Petri Net Methodology for Modelling the Maintenance of Railway Route Sections”. **Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference**, Hannover, 2019.
- LIU, J. *et al.* “Effects of rail materials and axle loads on the wear behavior of wheel/rail steels”. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 8, n. 7, pp. 1–12, 2016.
- LIU, X., MARKINE, V. L. “Train Hunting Related Fast Degradation of a Railway Crossing—Condition Monitoring and Numerical Verification”. **Sensors**, v. 20, n. 8, 2020.
- MAOUT, E. L., KATO, H. “Life Cycle Cost Estimation for Building, Operating, and Maintaining High-Speed Rail”. **Asian Transport Studies**, v. 4, n. 1, pp. 245–260, 2016.
- MERHEB, A. *et al.* Desenvolvimento de Simulador para Gestão e Planejamento de Manutenção de Dormentes. **Encontro ANTF de Ferrovias**. Vitória – ES, 2015.
- MOHAMMADIB, R., HEA, Q., GHOFRANIC, F. *et al.* “Exploring the impact of foot-by-foot track geometry on the occurrence of rail defects”. **Transportation Research Part C**, v. 102, pp. 153–172, 2019.
- MOLODOVA, M., DOLLEVOET, R. “Axle box acceleration: Measurement and simulation for detection of short track defects”. **Wear**, v. 271, n. 1-2, pp. 349–356, 2011.
- MORAIS, J., SANTOS, C., MORAIS, P. *et al.* “Continuous Monitoring and Evaluation of Railway Tracks: System Description and Assessment”. **Procedia Structural Integrity**, v. 17, pp. 448–455, 2019.
- NEUHOLD, J., VIDOVIC, I., MARSCHNIG, S. “Preparing Track Geometry Data for Automated Maintenance Planning”. **Journal of Transportation Engineering Part A: Systems**, v. 146, n.5, 2020.
- NGAMKHANDONG, C., GOTO, K., KAEWUNRUEN, S. “Dynamic responses of railway ballasted track considering rail pad deterioration”. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1106, 2018.
- NIELSEN, J. C. O., LI, X. “Railway track geometry degradation due to differential settlement of ballast/subgrade e Numerical prediction by an iterative procedure”. **Journal of Sound and Vibration**, v. 412, pp. 441-456, 2018.
- NIMBALKAR, S. *et al.* “Improved Performance of Railway Ballast under Impact Loads Using Shock Mats”. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 138, n. 3, pp. 281-294, 2012.
- PAIVA, C. E. L. **Super e infraestrutura de ferrovias: critérios para projetos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

- PATRA, A. P., SÖDERHOLM, P., KUMAR, U. “Uncertainty estimation in railway track lifecycle cost: A case study from Swedish National Rail Administration”. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 223, n. 3, 2009.
- PEN, L. L. *et al.* “A model for the stochastic prediction of track support stiffness”. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 234, n. 5, 2019.
- PLASSER & THEURER. **Ballast bed cleaning**, 2023a. Disponível em <<https://www.plassertheurer.com/en/machine/ballast-cleaning-machines-with-supply-of-new-ballast/rm-802-frm-802>> e <<https://www.plassertheurer.com/en/machine/ballast-cleaning-machines-with-supply-of-new-ballast/hobcs-5>>. Acesso em 23 de março de 2023.
- PLASSER & THEURER. **Track renewal and track laying**, 2023b. Disponível em <<https://www.plassertheurer.com/en/machine/track-renewal-and-track-laying/assembly-line-method/ru-800-s#&gid=1&pid=7>>. Acesso em 23 de março de 2023.
- PLASSER DO BRASIL. **Mais rápido ao estado ideal: Estabilização e compactação**, 2023b. Disponível em <<https://www.plasser.com.br/pt/maquinas-sistemas/estabilizacao-e-compactacao.html>>. Acesso em 24 de março de 2023.
- PLASSER DO BRASIL. **O processo correto de socaria**, 2023a. Disponível em <https://www.plasser.com.br/fileadmin/user_upload/Maquinas_Sistemas/Socaria/17139_TechnStopfen_Y11-PORT-0760ansicht.pdf>. Acesso em 23 de março de 2023.
- POMBO, J. C., AMBRÓSIO, J. A. C. “Application of a wheel–rail contact model to railway dynamics in small radius curved tracks”. **Multibody System Dynamics**, v. 19, pp. 91–114, 2008.
- POMBO, J. *et al.* “Influence of track conditions and wheel wear state on the loads imposed on the infrastructure by railway vehicles”. **Computers and Structures**, v. 89, n. 21-22, pp. 1882–1894, 2011.
- POST. E. **Análise dos critérios de erros na validação do modelo matemático arimax de propulsores eletromecânicos**. Dissertação de M.Sc., Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, Brasil, 2018.
- PRATICÒ, F. G., GIUNTA, M. “Proposal of a Key Performance Indicator for Railway Track Based on LCC and RAMS Analyses”. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 144, n. 2, 2018.
- PRESCOTT, D., ANDREWS, J. “Investigating railway track asset management using a Markov analysis”. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 229, n. 4, pp. 402–416, 2015.
- RAHIMIKELARIJANI, B., MOHASSEL, A., HAMIDI, M. “Railroad Track Geometric Degradation Analysis: A BNSF Case Study”. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 146, n. 2, 2020.

- RATTON NETO, H. X. Econometria. Notas de aula, Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017b.
- RATTON NETO, H. X. **Padrões para manutenção da via permanente**. Tese de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brail, 1985.
- RATTON NETO, H. X. Superestrutura ferroviária. Notas de aula, Programa de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017a.
- REMENNIKOV, A. M., KAEWUNRUEN, S. “A review of loading conditions for railway track structures due to train and track vertical interaction”. **Structural Control and Health Monitoring**, v. 15, pp.207–234, 2008.
- REMPELOS, G., ORTEGA, A., BLAINEY, S. *et al.* “A method for assessing the life cycle costs of modifications to ballasted track systems”. **Construction and Building Materials**, v. 263, 2020.
- REZAIE, F., SHIRI, M. R., FARNAM, S. M. “Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre-stressed concrete sleepers”. **Engineering Failure Analysis**, v. 26, pp. 21–30, 2012.
- RIBEIRO, F. S. **Contribuição para análise do custo do ciclo de vida de um sistema de gerência de pavimento ferroviário**. Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2017.
- RODRIGUES, C. A. **Avaliação da carga por eixo dos veículos ferroviários**. Tese de M.Sc., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1983.
- RODRIGUES, C. A. **Contribuição ao planejamento da manutenção preditiva da superestrutura ferroviária**. Tese de D.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.
- RODRIGUES, S. C. A. **Modelo de regressão linear e suas aplicações**. Dissertação de M.Sc. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2012.
- RUILIN, Y. *et al.* “Fatigue Life Assessment Method for Prestressed Concrete Sleepers”. **Frontiers in Built Environment**, v. 3, 2017.
- SADEGHI, J., ASKARINEJAD, H. “Development of improved railway track degradation models”. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 6, n. 6, pp. 675–688, 2010.
- SADEGHI, J., HEYDARI, H., DOLOEI, E. A. “Improvement of Railway Maintenance Approach by Developing a New Railway Condition Index”. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 143, n. 8, 2017.
- SALVADOR, P. *et al.* “Axlebox accelerations: Their acquisition and time–frequency characterization for railway track monitoring purposes”. **Measurement**, v. 82, pp. 301–312, 2016.

- SANTOS, G. F. M. **Análise de segurança de veículo ferroviário de carga em tangente considerando a excitação periódica da via permanente**. Tese de D.Sc., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 2015.
- SANTOS, R., TEIXEIRA, P. F., ANTUNES, A. P. “Planning and scheduling efficient heavy rail track maintenance through a Decision Rules Model”. **Research in Transportation Economics**, v. 54, pp. 20-32, 2015.
- SASIDHARAN, M., BURROW, M. P. N., GHATAORA, G. S. “A whole life cycle approach under uncertainty for economically justifiable ballasted railway track maintenance”. **Research in Transportation Economics**. V. 80, 2020.
- SAUNI, M. *et al.* “Investigating Root Causes of Railway Track Geometry Deterioration – A Data Mining Approach”. **Frontiers in Built Environment**. V. 6, 2020.
- SEMPREBONE, P. S. **Desgastes em trilhos ferroviários – Um estudo teórico**. Dissertação de M.Sc., Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil 2006.
- SERACO, I. P. **Procedimento para definição de políticas de manutenção de via permanente ferroviária**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2019.
- SHAFABI, Y., HAKHAMANESHI, R. “Application of a Maintenance Management Model for Iranian Railways Based on the Markov Chain and Probabilistic Dynamic Programming”. **Transaction A: Civil Engineering**, v. 16, n. 1, pp. 87 – 97, 2009.
- SHARMA, S. *et al.* “Data-driven optimization of railway maintenance for track geometry”. **Transportation Research Part C**, v. 90, pp. 34–58, 2018.
- SILVA FILHO, J. C. **Análise numérica do comportamento mecânico de um pavimento ferroviário para diferentes tipos de veículos de via**. Dissertação de M.Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, MG, Brasil, 2013.
- SINGH, R. P., NIMBALKAR, S., SINGH, S. *et al.* “Field assessment of railway ballast degradation and mitigation using geotextile”. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 48, pp. 275–283, 2020.
- SOLEIMANMEIGOUNI, I. *et al.* “Investigation of the effect of the inspection intervals on the track geometry condition”. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 169, n. 8, pp. 1138–1146, 2020.
- SOLEIMANMEIGOUNI, I., AHMADI, A., KUMAR, U. “Track geometry degradation and maintenance modelling: A review”. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, v. 232, n. 1, pp. 73-102, 2016.
- SOL-SÁNCHEZ, M. *et al.* “An alternative sustainable railway maintenance technique based on the use of rubber particles”. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, pp. 3850-3858, 2017.

- SOL-SÁNCHEZ, M., D'ANGELO, G. "Review of the design and maintenance technologies used to decelerate the deterioration of ballasted railway tracks". **Construction and Building Materials**, v. 157, pp. 402–415, 2017.
- SPIROIU, M. A. "Wheel-rail dynamic forces induced by random vertical track irregularities". **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 147, 2016.
- STEFFLER, F. **Via permanente aplicada: guia teórico e prático**. 1 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2013.
- STENSTRÖM, C., NORRBIN, P., PARIDA, A. *et al.* "Preventive and corrective maintenance – cost comparison and cost–benefit analysis". **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 12, n. 5, pp. 603–617, 2016.
- SU, Z., DE SCHUTTER, B. "Optimal scheduling of track maintenance activities for railway networks". **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 9, pp. 386-391, 2018.
- SU, Z., JAMSHIDI, A., NÚÑEZ, A. *et al.* "Multi-level condition-based maintenance planning for railway infrastructures – A scenario-based chance-constrained approach". **Transportation Research Part C**, v. 84, pp. 92–123, 2017.
- SUN, Y. Q., DHANASEKAR, M. "A dynamic model for the vertical interaction of the rail track and wagon system". **International Journal of Solids and Structures**, v. 39, pp. 1337–1359, 2002.
- TAYAL, C. P. **Track monitoring. Indian Railway Institute of Civil Engineering**. Byculla, 2013.
- VAN DER WESTHUIZEN, N. J., GRÄBE, P. J. "The integration of railway asset management information to ensure maintenance effectiveness". **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**, v. 55, n. 3, pp. 18–29, 2013.
- VARANDAS, J. N. *et al.* "Long-term deformation of railway tracks considering train-track interaction and non-linear resilient behaviour of aggregates – a 3D FEM implementation". **Computers and Geotechnics**, v. 126, 2020.
- WEN, M., LI, R., SALLING, K. B. "Optimization of preventive condition-based tamping for railway tracks". **European Journal of Operational Research**, v. 252, pp. 455–465, 2016.
- WESTON, P. *et al.* "Perspectives on railway track geometry condition monitoring from in-service railway vehicles". **Vehicle System Dynamics**, v. 53, n. 7, pp. 1063 – 1091, 2015.
- XU, P. *et al.* "Developing an Enhanced Short-Range Railroad Track Condition Prediction Model for Optimal Maintenance Scheduling". **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, n. 3, pp. 1-12, 2015.
- ZAREMBSKI, A. M., EINBINDER, D., OKINE, N. A. "Using multiple adaptive regression to address the impact of track geometry on development of rail defects". **Construction and Building Materials**, v. 127, pp. 546–555, 2016.

ZHAI, W. *et al.* “Experimental investigation on vibration behaviour of a CRH train at speed of 350 km/h”. **International Journal of Rail Transportation**, v. 3, n. 1, pp. 1–16, 2015.

ZHANG, Y. J., MURRAY, M., FERREIRA, L. “Modelling rail track performance: an integrated approach”. **Transport**, v. 141, n. 4, pp. 187-194, 2000.

ZHANG, Z. T., GAO, W., WANG X, *et al.* “Degradation-induced evolution of particle roundness and its effect on the shear behaviour of railway ballast”. **Transportation Geotechnics**, v. 24, 2020.

ANEXO I

Este anexo apresenta os fatores k_y para o cálculo da vida útil dos serviços de nivelamento pelo método proposto por Rodrigues (1983), apresentado na Tabela 10.

Os fatores k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , e k_6 são os mesmos adotados para o cálculo da vida útil dos dormentes, apresentados no Anexo II. Os fatores k_1 e k_7 são apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela 24: Definição do fator k_1 função do comprimento do trilho

Comprimento da barra	Fator k_1
Curta	1,0
TCS (trilho curto soldado)	1,0
TLS (trilho longo soldado)	1,2

Tabela 25: Definição do fator k_7 função do trem-tipo

Trem-tipo	Fator k_7
Unitário	0,9
Passageiro	0,8

ANEXO II

Neste Anexo são apresentados os parâmetros para determinação dos fatores K_i utilizados nas equações 14 e 21. Todo o conteúdo aqui apresentado foi adaptado de Rodrigues (1983).

Os fatores utilizados na Equação 14 para determinação da vida útil de trilhos por desgaste são definidos segundo o estipulado nas próximas oito tabelas:

Tabela 26: Determinação do fator k_1 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste

Tipo de trilho	Fator k_1		
	Peso do trilho em kg/m		
	< 50	50 - 61	> 61
Aço carbono com juntas, resfriamento controlado, novo ou usado	1,2808	0,9810	0,9538
Aço carbono usado, continuamente soldado, resfriamento controlado, novo ou usado	1,8188	1,3930	1,3544
Aço tratado novo, 24 m de comprimento	2,0493	1,5696	1,5261
Aço liga novo, 24 m de comprimento	1,5370	1,1772	1,1446
Alto teor de silício novo, 24 m de comprimento	1,4089	1,0791	1,0492

Tabela 27: Determinação do fator k_2 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste

Variação da velocidade operacional, em km/h	Velocidade adotada, em km/h	Fator k_2
108,6 - 116,6	112,6	0,80
100,6 - 108,6	104,6	0,85
92,5 - 100,6	96,5	0,90
84,5 - 95,5	88,5	0,95
76,4 - 84,5	80,5	1,00
68,4 - 76,4	72,4	1,05
60,3 - 68,4	64,4	1,10
52,3 - 60,3	56,4	1,15
42,2 - 52,3	48,4	1,20
36,2 - 42,2	40,2	1,25
28,2 - 36,2	32,2	1,30
20,1 - 28,2	24,1	1,35
12,1 - 20,1	16,1	1,40

Tabela 28: Determinação do fator k_3 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste

Variação da rampa em %	Fator k_3
0 - 0,5	1,0000
0,5 - 1,0	0,9655
1,0 - 1,5	0,9029
1,5 - 2,0	0,8010
2,0 - 2,5	0,7326
> 2,5	0,6821

Tabela 29: Determinação do fator k_4 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste

Variação do raio da curva, em m	Fator k_4	
	s/lubrificador	c/lubrificador
$\geq 3,492$	1,00	1,00
3,491 - 1,164	0,87	1,00
1,164 - 698	0,74	0,88
698 - 499	0,61	0,79
499 - 388	0,49	0,70
388 - 317	0,38	0,62
317 - 268	0,30	0,55
268 - 233	0,22	0,48
233 - 205	0,16	0,44
205 - 184	0,12	0,40
< 184	0,10	0,37

Tabela 30: Determinação do fator k_5 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste

Variação da carga por Eixo, em t	Fator k_5
$\leq 13,6$	1,1534
13,6 - 19,0	1,0000
19,0 - 21,0	0,9639
21,0 - 23,0	0,9120
23,0 - 25,0	0,8599
25,0 - 27,0	0,7739
27,0 - 29,0	0,6437
29,0 - 31,0	0,5167
31,0 - 33,0	0,3520
> 33,0	0,3254

Tabela 31: Determinação do fator k_6 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste

Trem típico	Fator k_6
Unitário	0,91
Passageiro	1,00

Para o fator k_7 é necessário inicialmente classificar a via segundo as condições do lastro, da drenagem e da consolidação da plataforma, para posteriormente definir o respectivo fator, como é apresentado a seguir:

Tabela 32: Classificação da via segundo suas condições

Classificação da via	Característica da via
1	Lastro bom, drenagem boa, plataforma consolidada
2	Lastro bom, drenagem boa, plataforma não consolidada
3	Lastro bom, drenagem ruim, plataforma consolidada
4	Lastro sujo, drenagem ruim, plataforma consolidada
5	Lastro sujo, drenagem ruim, plataforma não consolidada
6	Lastro sujo, drenagem boa, plataforma consolidada

Tabela 33: Determinação do fator k_7 para cálculo da vida útil de trilhos por desgaste

Classificação da via	Fator k_7 em função da altura de lastro, em cm		
	> 20	20 - 15	< 15
1	1,1056	1,0000	0,8910
2	0,8910	0,8228	0,7533
3	0,8228	0,7533	0,6572
4	0,7533	0,5946	0,5295
5	0,5295	0,4620	0,3907
6	0,8910	0,8228	0,7533

Para a determinação do fator k_8 é utilizada a equação:

$$k_8 = \frac{I_y \cdot EC \cdot ET}{EC + ET}$$

Onde

EC é a extensão da via em curva;

ET é a extensão da via em tangente;

$I_y = 0,9355$ para bitola de 1,60 m e 1,1844 para bitola de 1,00 m.

Para a vida útil dos dormentes estimada pela Equação 21, os fatores k_1 , k_4 e k_5 são definidos nas Tabelas 34, 35 e 36, respectivamente. Já os fatores k_2 , k_3 e k_6 são os mesmos utilizados para o cálculo da vida útil de trilhos apresentados nas Tabelas 27, 28 e 31, respectivamente.

Tabela 34: Determinação do fator k_1 para cálculo da vida útil de dormentes

Comprimento da barra de trilho	Fator k_1
Curta	1,000
Média	1,015
Longa	1,030

Tabela 35: Determinação do fator k_4 para cálculo da vida útil de dormentes

Perfil do trilho, em kg/m	Fator k_4
68	1,0185
65	1,0000
57	0,9287
45	0,8139
37	0,7138

Tabela 36: Determinação do fator k_5 para vida útil de dormentes

Variação da carga por eixo, em t	Fator k_5
$\leq 13,6$	1,2931
13,6 - 19,0	1,0000
19,0 - 21,0	0,8793
21,0 - 23,0	0,7994
23,0 - 25,0	0,7328
25,0 - 27,0	0,6764
27,0 - 29,0	0,6281
29,0 - 31,0	0,5862
31,0 - 33,0	0,5496
$> 33,0$	0,5172

ANEXO III

Neste anexo são apresentadas as composições de custo unitário definidas pelo Relatório SICRO (2023) desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT.

Tabela 37: Custo unitário para serviços de manutenção na via permanente

Código do serviço	Descrição do serviço	Unidade	Custo unitário (R\$)
2909384	Nivelamento e alinhamento de via com socadora automática e levante de até 10 cm - qualquer bitola ou dormente e taxa de dormentação de 1.750 un/km	km	5.728,06
2909148	Regularização do lastro com reguladora de lastro	km	432,78
903845	Lastro de brita comercial - espalhamento mecânico	m ³	159,54
5914704	Carga e manobra de brita para lastro com locomotiva diesel-elétrica em vagão hopper aberto com capacidade de 63 m ³ - carga com carregadeira e descarga automática - bitola larga	t	5,2
-	Carga e manobra de brita para lastro com locomotiva diesel-elétrica em vagão hopper aberto com capacidade de 63 m ³ - carga com carregadeira e descarga automática - bitola larga	m ³	7,8
3009039	Trilho TR57, comprimento de 240 m (TLS – trilho longo soldado), sobre dormente de madeira, bitola métrica ou larga, taxa de dormentação de 1.750 un/km, tala de junção de 6 furos e fixação elástica Pandrol - posicionamento e assentamento mecanizado	km	2.634.202,04
3009072	Dormente de madeira, bitola larga ou mista, taxa de dormentação de 1.750 un/km - posicionamento mecanizado com carregadeira	km	871.246,60

Fonte: SICRO (2023).

APÊNDICE I

O método utilizado para calcular a vida útil de trilhos por fadiga neste trabalho foi apresentado por Rodrigues (1983), tendo sido, contudo, proposto por Abbott e Zaremski (1978). Está baseado no conceito de dano cumulativo linear em que a cada vez que o componente sofre uma tensão em magnitude maior que seu limite de fadiga, ocorre uma quantidade fixa de dano. Esses danos acumulam-se linearmente e a falha por fadiga ocorre quando a quantidade atinge o limite de falha.

O desenvolvimento desse método está baseado na seguinte equação:

$$N_t = \frac{1}{\sum \frac{\alpha_i}{N_i}} \quad (46)$$

Onde

N_t é o número total de ciclos de carga para a ocorrência da falha sob o espectro de carregamento definido;

N_i é o número de ciclos para falha em cada nível de tensão avaliado;

α_i é a fração do número total de ciclos aplicados em cada nível de tensão.

A Equação 46 é a mesma Equação 20 apresentada na Seção 4.3, porém aqui foi utilizada a notação original empregada pelos seus autores.

Segundo Abbott e Zaremski (1978) a via férrea sofre a ação de uma variedade de carregamentos que repercute em elevada amplitude de tensões às quais os trilhos estão expostos. Este é o motivo pelo qual o modelo proposto caracteriza-se, em seu denominador, pela análise do que é chamado espectro de tensões, que se refere à análise individual das ocorrências de tensões de magnitude i acima do limite de fadiga. Como podem ser várias as magnitudes de tensões, é feito o somatório dessas ocorrências. Essa parcela do modelo refere-se às tensões e não às cargas verticais. Para converter as cargas verticais em tensões de flexão experimentadas pelo trilho, os autores utilizaram a teoria de viga apoiada sobre fundação elástica submetida a uma carga pontual. Tal teoria descreve a distribuição das tensões conforme ilustrado na Figura Apêndice I.1.

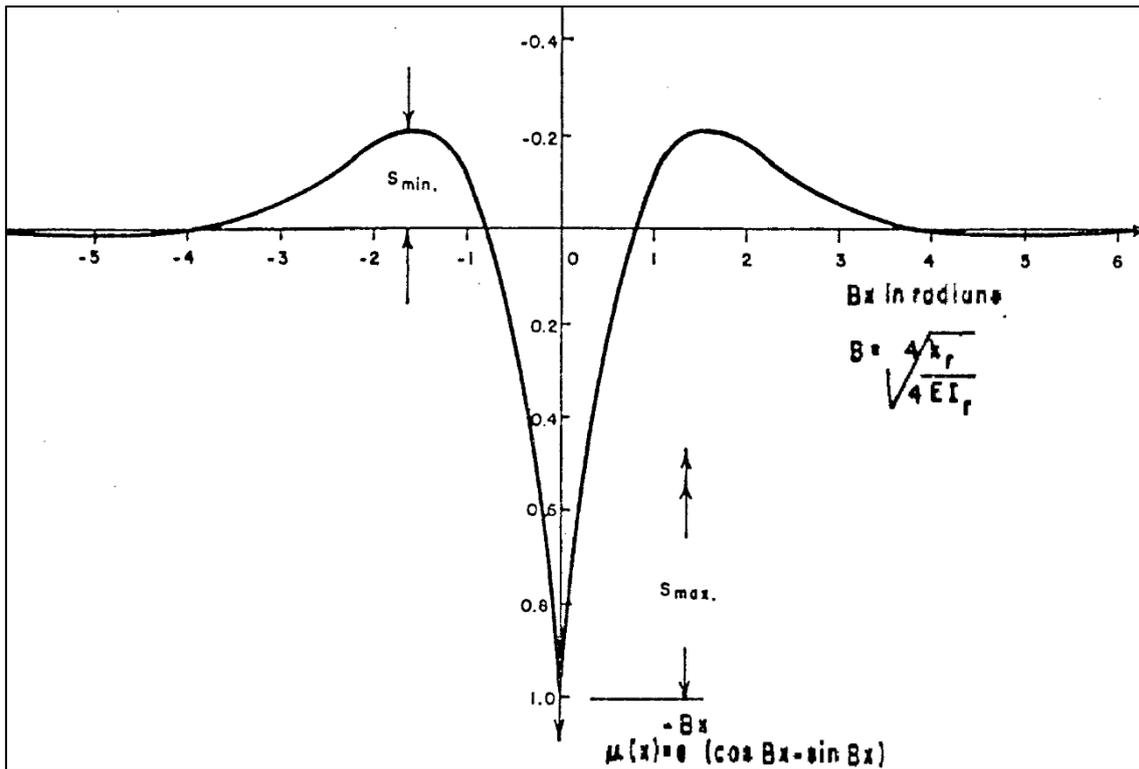


Figura Apêndice I.1: Distribuição de tensões em uma viga apoiada em fundação elástica.

Fonte: Abbott e Zaremski (1978).

Sendo que $S_{m\acute{a}x}$ é a tensão vertical máxima, definida pela equação:

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{V}{4 I_{r/c} \sqrt[4]{\frac{k_r}{4 E I_r}}} \quad (47)$$

Onde

V é a carga vertical, em kgf;

$E I_r$ é a rigidez do trilho à flexão (E = módulo de elasticidade; I = momento de inércia);

$I_{r/c}$ é o módulo da seção do trilho;

k_r é o módulo de fundação do trilho (= 1/2 módulo de fundação da via).

Considerando a necessidade do presente trabalho de avaliar a vida útil dos trilhos em função das cargas dinâmicas, a variável V na Equação 47 pode ser ajustada segundo essa demanda.

Em complemento, os autores estabelecem que:

$$R = \frac{S_{\min}}{S_{\max}} = -0,2 \quad (48)$$

A variável R é utilizada no cálculo do limite de fadiga, S_e , por meio da equação:

$$S_e = \frac{b}{1 - m R} \quad (49)$$

Onde

b é o limite de fadiga para $R = 0$ definido pelo diagrama de Goodman modificado (ponto de intercessão com o eixo y nas Figuras Apêndice I.2 e .3);

m é a inclinação da curva de fadiga analisada no diagrama de Goodman modificado.

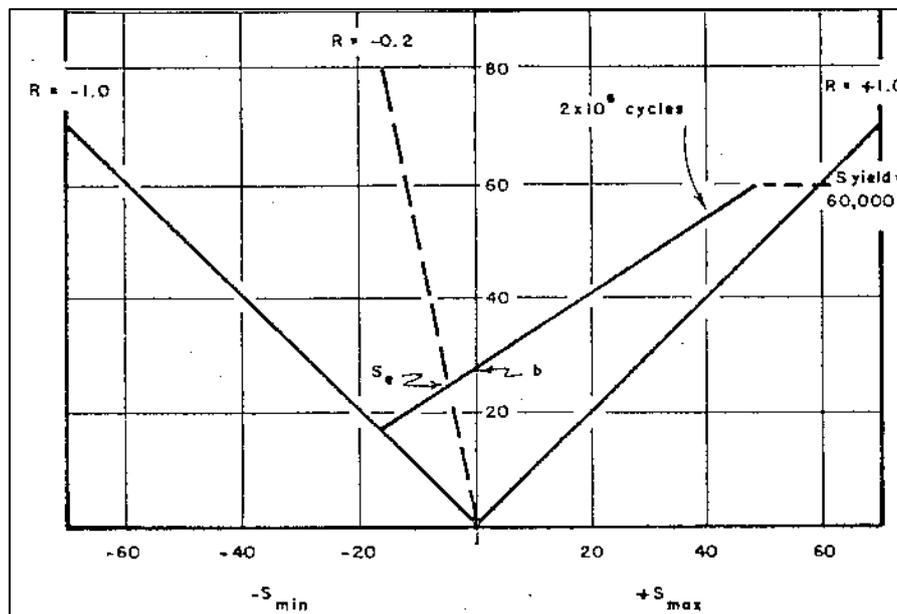


Figura Apêndice I.2: Diagrama de Goodman modificado para o trilho *standard steel*.

Fonte: Versão apresentada no trabalho original de Abbott e Zaremski (1978).

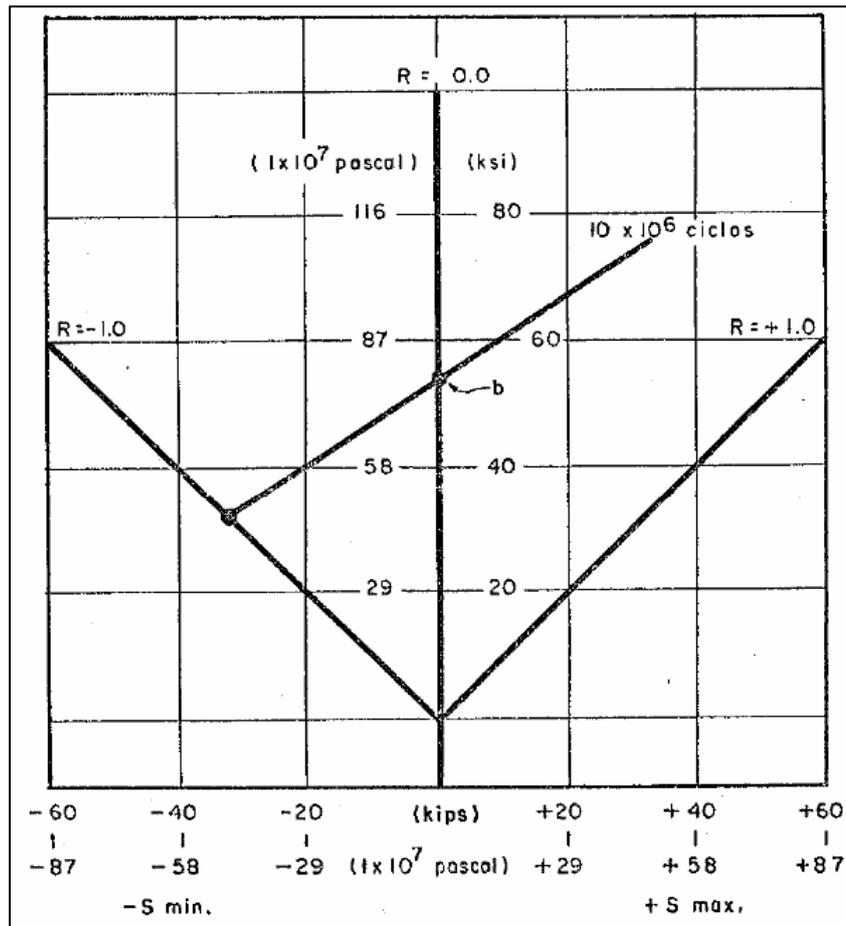


Figura Apêndice I.3: Diagrama de Goodman modificado para o trilho "standard".

Fonte: Diagrama apresentado em Rodrigues (1983).

Conhecido S_e , torna-se possível definir N_i :

$$N_i = \frac{N_e}{(S_{m\acute{a}x}/S_e)^{1/k}} \quad (50)$$

Onde

N_e é o limite de tolerância à fadiga do aço em ciclos;

$S_{m\acute{a}x}$ é a tensão de flexão máxima na seção do trilho;

k é a inclinação da curva S - N (esforço x número de ciclos necessários para provocar fadiga – referência Figura Apêndice I.4 e .5).

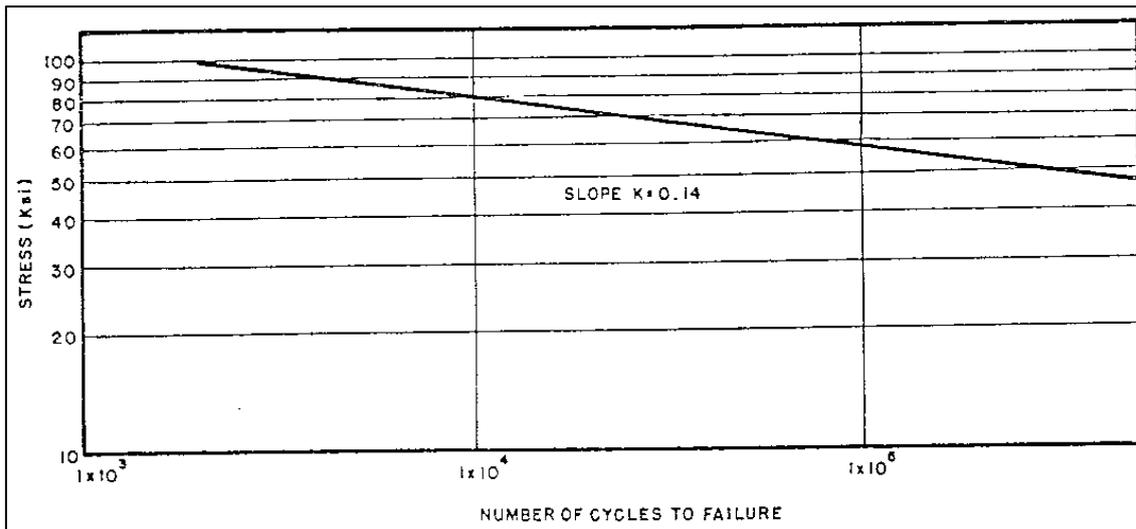


Figura Apêndice I.4: Curva S – N para trilhos em aço *standard*.

Fonte: Abbott e Zaremski (1978).

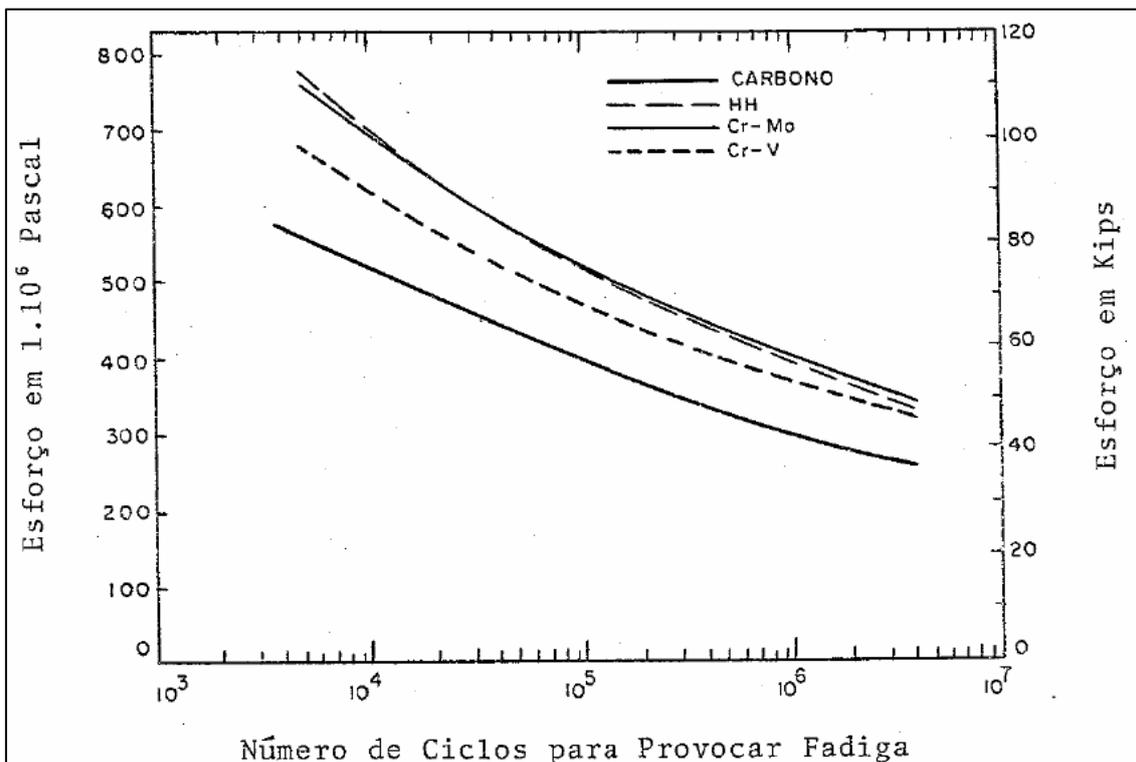


Figura Apêndice I.5: Curva S – N para diversos tipos de trilho.

Fonte: Rodrigues (1983).

α_i é a fração do número total de ciclos de carregamento aplicada com a tensão sob análise. Essa fração é determinada por meio de um gráfico que apresenta a frequência acumulada de carregamentos da via permanente (Figura Apêndice I.6).

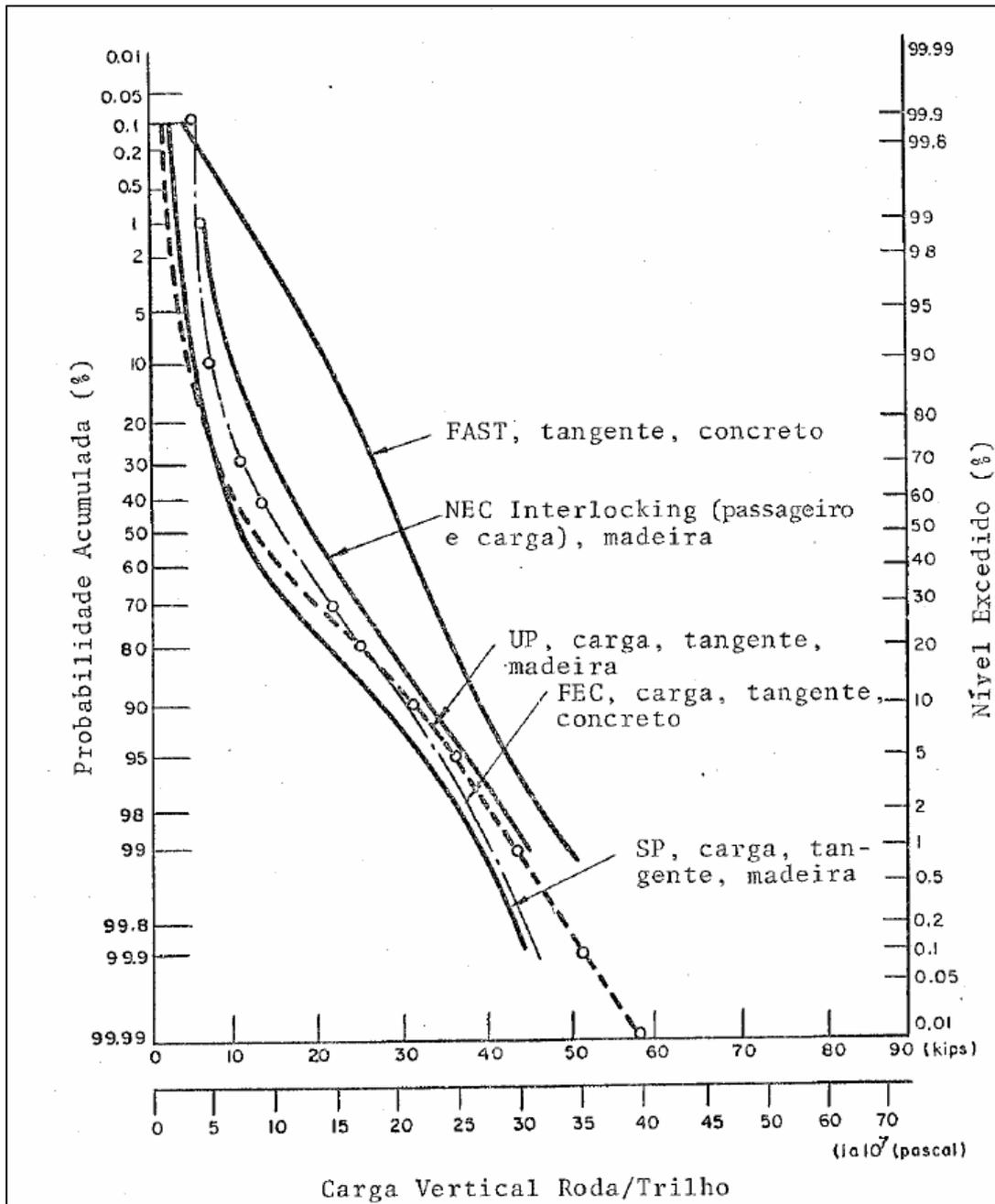


Figura Apêndice I.6: Picos de carga vertical roda/trilho em ferrovias americanas.

Fonte: Rodrigues (1983).

Por meio da Equação 46, N_t determinará a vida útil do trilho por fadiga em número de ciclos de carregamento. Para obter o resultado em MTBT, torna-se necessário dividir N_t pela quantidade de ciclos de carregamento por unidade de MTBT.

Se $S_{m\acute{a}x} < S_e$ não ocorrerá fadiga, e, portanto, essa faixa de cargas não precisa ser contabilizada.

APÊNDICE II

Este apêndice apresenta a estratégia de modelagem empregada para formulação dos modelos $ac_j = f(g, p, v)$.

Nesta pesquisa, o conteúdo aqui apresentado teve tripla função:

1. Comparar a representatividade entre modelos em que a geometria é representada pelo TQI e os modelos em que são considerados valores das deformações geométricas em verdadeira grandeza, subsidiando a decisão pela adoção de uma das abordagens como padrão do procedimento proposto;
2. Estabelecer os parâmetros geométricos e sua relação com a variável explicada dos modelos ac_j ;
3. Ilustrar o processo de concepção da estratégia de modelagem para obtenção dos referidos modelos no âmbito da aplicação do procedimento apresentada no Capítulo 6.

Os dois primeiros tópicos acima descritos subsidiaram a reflexão e desenvolvimento da estrutura do procedimento ora proposto, enquanto o terceiro configura-se como referência para aqueles que irão aplicá-lo.

O desenvolvimento deste conteúdo foi norteado por alguns aspectos fundamentais, a saber:

1. A Seção 3.1 do referencial teórico indicou que as acelerações que o material rodante adquire durante o tráfego em relação à via permanente são influenciadas pelas deformações dos parâmetros geométricos, sendo que os movimentos verticais e horizontais são afetados por parâmetros específicos. Portanto, identificou-se a necessidade de determinar quais parâmetros adotar em cada modelo ac_j ;
2. Considerando que os relatórios de inspeção geométrica utilizados na presente pesquisa apresentam leituras dos parâmetros alinhamento e nivelamento longitudinal realizadas em três bases distintas de medição (31, 62 e 124 pés), julgou-se relevante averiguar a pertinência do emprego nos modelos de parâmetros relativos a apenas um padrão de medição;

3. As leituras das deformações geométricas dos parâmetros nivelamento e alinhamento longitudinal são realizadas de maneira independente entre as fileiras de trilhos, sendo necessário, portanto, estabelecer como duas leituras relativas ao mesmo parâmetro e ao mesmo ponto de medição seriam tratadas nos modelos;
4. Alguns dos modelos de degradação vistos no referencial teórico empregam valores absolutos das deformações para retratar a geometria, enquanto outros consideram valores em verdadeira grandeza, realidade, portanto, que demandou a seleção de um dos tratamentos como referência;
5. Alguns métodos de planejamento de manutenções analisados na literatura avaliam a condição geométrica atual e preveem sua degradação por meio de índices de qualidade, enquanto em outros, as deformações e sua evolução são tratadas sob valores em verdadeira grandeza. Essa diversidade requereu estabelecer qual abordagem adotar como padrão nesta pesquisa.

Ratton Neto (1985), único autor na literatura pesquisada que desenvolveu regressões para o estabelecimento de modelos como aqueles ora almeçados, utilizou na formulação da equação destinada a prever as acelerações verticais as deformações dos parâmetros geométricos nivelamento longitudinal, torção e nivelamento transversal, enquanto que no modelo horizontal foram adotados o alinhamento, torção e nivelamento transversal. A norma EN 13848 (2003) *apud* Ferreira (2010) concorda com tal estruturação, porém acrescenta a influência do parâmetro alinhamento sobre as forças laterais e cargas verticais, enquanto que ao invés da torção, emprega o parâmetro empeno. Considerando que as medidas de empeno tomam como referência base fixa de medição, e a torção está baseada em área de medição (como explicado na Seção 2.2), entende-se que este último parâmetro pode retratar a pior condição geométrica associada a um ponto de medição. Complementando o número de variáveis, Ratton Neto (1985) ainda emprega a velocidade operacional em ambos os modelos (vertical e horizontal).

Além dos registros que apresentam de forma completa as deformações geométricas em via corrida, as inspeções também geram os chamados relatórios de exceção, que apresentam pontos com alterações acima das tolerâncias de segurança que requerem ações corretivas imediatas. Analisando os relatórios de exceção relativos ao trecho ferroviário sob análise na aplicação do procedimento (Capítulo 6), identificou-se o registro de exceções relativas somente aos parâmetros torção 10, ou seja, aferida em

base de medição de 10 metros de comprimento (aproximadamente 31 pés), e nivelamento e alinhamento 20, medidos em base (ou corda) de 20 metros de comprimento (62 pés, aproximadamente), o que permite inferir que os técnicos responsáveis atribuem à parâmetros aferidos em tais bases maior relevância no estabelecimento das condições de segurança.

Rodrigues (2001) ao tratar de índices de qualidade geométrica, afirma que embora medidos de maneira independente entre os trilhos, para retratar a condição do alinhamento ou nivelamento pode-se empregar as medidas realizadas em somente uma das fileiras. Em contrapartida, ao investigar a efetividade da recuperação da geometria pelos serviços de manutenção, Rattón Netto (1985) calculou a média aritmética das leituras realizadas nos trilhos esquerdo e direito para estabelecer o valor inicial das irregularidades desses parâmetros após os serviços de socaria.

Segundo Rodrigues (2001) ao calcular valores médios das deformações geométricas, o uso das leituras em verdadeira grandeza tende a gerar resultados próximos de zero, por consequência, difíceis de ser interpretados. Portanto, o autor indica que valores absolutos podem ser mais adequados. Rattón Netto (1985) formulou modelos de correspondência entre a condição geométrica e as acelerações utilizando leituras em valores absolutos tanto das acelerações quanto das deformações geométricas.

A diversidade de modelos de planejamento de manutenções vista no referencial teórico (Seção 4.2), além de demonstrar diferentes entendimentos a respeito do contexto, expressa como as abordagens podem ser direcionadas a um determinado tipo de plano de manutenção. Em situações em que se pretende ações voltadas à correção de defeitos isolados, normalmente decorrentes de deformações geométricas acima das tolerâncias de segurança, adota-se a simulação das degradações a partir de leituras dos parâmetros geométricos em verdadeira grandeza. Por outro lado, planos de manutenção preditiva, em que toda a extensão das seções ferroviárias tem sua geometria corrigida, requerem meios de controlar e prever a condição geral da seção sob análise, o que, normalmente, é feito por meio do uso de índices de qualidade.

Considerando o arcabouço conceitual apresentado nos capítulos de revisão bibliográfica e o observado nos parágrafos precedentes, assim como o número de parâmetros registrados nas inspeções utilizadas na aplicação do procedimento (apresentados na Tabela 17), foi concebida a estratégia de modelagem de dados apresentada na Tabela 38, destinada à formulação das equações ac_j .

Tabela 38: Estratégia de análise e modelagem de dados para formulação dos modelos de previsão das acelerações

Modelagem (Mi)	Parâmetros usados no modelo ac_j		Base de medição dos parâmetros alinhamento e nivelamento (m \cong pés)	Tratamento da leitura	Valor usado nos parâmetros medidos em ambos os trilhos	Estratégia de ajuste polinomial
	Vertical (ac_V)	Horizontal (ac_H)				
M1	Niv ¹ -alin ² -nivtrans ³ -torção10 ⁴ -vel ⁵	Bitola-alin-nivtrans-torção10-vel	20 \cong 62	Absoluto	Média	1
M2	Niv-alin-nivtrans-torção10-vel	Bitola-alin-nivtrans-torção10-vel	20 \cong 62	Absoluto	Maior valor	1
M3	Niv-alin-nivtrans-torção10-vel	Bitola-alin-nivtrans-torção10-vel	10 \cong 31	Absoluto	Maior valor	1
M4	Niv - alin - nivtrans - torção10 - vel - bitola		10 \cong 31	Absoluto	Maior valor	1
M5	Niv-alin-nivtrans-torção10-vel	Bitola-alin-nivtrans-torção10-vel	20 \cong 62	Real	Maior valor	2
M6	Niv-alin-nivtrans-torção10-vel	Bitola-alin-nivtrans-torção10-vel	10 \cong 31	Real	Maior valor	2
M7	Todos	Todos	Todas	Real	Todos	Linear
M8	Seleção	Seleção	Seleção	Real	Seleção	Própria
M9	Niv-alin-nivtrans-torção10-vel	Bitola-alin-nivtrans-torção10-vel	20 \cong 62	TQI	Maior valor	1
M10	Niv-alin-nivtrans-torção10-vel	Bitola-alin-nivtrans-torção10-vel	10 \cong 31	TQI	Maior valor	1
M11	Todos	Todos	Todas	TQI	Todos	Linear
M12	Seleção	Seleção	Seleção	TQI	Seleção	Própria

¹ Nivelamento longitudinal; ² Alinhamento longitudinal; ³ Nivelamento transversal; ⁴ Torção medida em base de 10 metros \cong 31 pés; ⁵ Velocidade.

A Tabela 38 apresenta 12 famílias de modelagens, nomeadas pelas siglas M1 a M12, que representam um determinado arranjo de dados traçado com o intuito de elucidar as características das equações ac_j , subsidiando, conseqüentemente, a identificação dos modelos de regressão ac_V e ac_H mais representativos a serem utilizados na aplicação do procedimento.

A segunda coluna da tabela identifica as variáveis explicativas adotadas no desenvolvimento das regressões de cada família. Os parâmetros geométricos adotados nas famílias M1 a M6, M9 e M10 foram escolhidos tendo em vista as conclusões tomadas a partir do referencial teórico, descritas anteriormente neste apêndice.

Considerando que os relatórios de inspeção utilizados na aplicação do procedimento apresentam outros dez parâmetros, as famílias de modelagem M7 e M11 adotaram todos os parâmetros registrados nos relatórios, enquanto que M8 e M12 utilizaram parâmetros selecionados por meio de critério de maior representatividade estatística, empregando para tal seleção método descrito na Seção Apêndice II.1.

A família M4 se difere das demais pois não foi concebida para determinar equações de previsão das acelerações verticais e horizontais, mas adota como variável explicada dos modelos de regressão a razão L/V das acelerações medidas, motivo pelo qual as variáveis explicativas foram reunidas.

A terceira coluna da tabela identifica qual padrão adotado no que se refere à base de medição dos parâmetros alinhamento e nivelamento longitudinais.

A coluna intitulada “tratamento da leitura” indica como as medidas das deformações geométricas foram utilizadas: se em valores absolutos (Absoluto); se em verdadeira grandeza (Real), tal qual registrado nos relatórios; ou se foi empregado o TQI do parâmetro. Como delimitado na Seção 5.1, foi adotado como TQI o desvio padrão calculado a partir dos registros, em verdadeira grandeza, das deformações geométricas de cada parâmetro em seções da via permanente com 200 metros de extensão.

A quinta coluna indica como as leituras dos parâmetros aferidos em ambas fileiras de trilhos foram tratadas. M1 foi o único grupo de modelos que utilizou a média, pois entende-se que em certas situações, esta abordagem ameniza a severidade das deformações, o que pode influenciar os resultados. Por conseqüência, nas demais famílias de modelagens, com exceção daquelas em que todos os parâmetros foram utilizados como variáveis explicativas dos modelos, adotou-se o valor de maior amplitude da deformação.

A última coluna indica a estratégia adotada para modelar as equações no que diz respeito à relação entre as variáveis explicativas e a variável explicada dos modelos, ou

seja, se regressões múltiplas lineares ou não lineares. Dessa forma, tomando como referência a estratégia adotada por Ratton Neto (1985) em propósito semelhante, em que foram empregados polinômios com monômios de diversos graus, assim como o logaritmo de parâmetros, foram traçadas duas estratégias de modelagem nesse sentido:

Tabela 39: Estratégias de modelagem polinomial adotadas

Estratégia	
1	2
X	X
X ²	X ²
X ³	X ³
X ^{1/2}	X ⁴
X ^{-1/2}	X ⁵
X ⁻¹	X ⁻¹
log X	X ⁻²

Cada estratégia delimita as possíveis relações que as variáveis explicativas podem assumir em relação à variável explicada no modelo de regressão. A estratégia 1 foi utilizada nas famílias de modelagens em que foram empregadas leituras absolutas da geometria ou o TQI, pois a inexistência de valores negativos viabilizou a análise de raízes quadradas e logaritmos. Por outro lado, a estratégia 2 foi empregada nas famílias de modelagem que consideraram valores em verdadeira grandeza. A Tabela 40 ilustra o resultado da aplicação de cada estratégia, utilizando como exemplo o parâmetro nivelamento.

Tabela 40: Relação do parâmetro nivelamento (niv) com a variável explicada (y) em função da estratégia de modelagem empregada

Estratégia 1		Estratégia 2	
Relação	Resultado no parâmetro	Relação	Resultado no parâmetro
X	y = niv	X	y = niv
X ²	y = niv ²	X ²	y = niv ²
X ³	y = niv ³	X ³	y = niv ³
X ^{1/2}	y = niv ^{1/2}	X ⁴	y = niv ⁴
X ^{-1/2}	y = niv ^{-1/2}	X ⁵	y = niv ⁵
X ⁻¹	y = niv ⁻¹	X ⁻¹	y = niv ⁻¹
log X	y = log niv	X ⁻²	y = niv ⁻²

Considerando que cada parâmetro pode assumir sete possíveis perfis de relação em ambas estratégias apresentadas, e que nas famílias M1, M2, M3, M5, M6, M9 e M10 são utilizados cinco parâmetros (variáveis explicativas) em cada modelo, foram testados 16.807 modelos de regressão para formulação de ac_V , e 16.807 modelos para ac_H em cada uma das referidas famílias. O número de modelos é fruto do total de possíveis combinações resultante das estratégias de relação entre as variáveis e a quantidade de parâmetros considerada. A Tabela 41 ilustra esse processo, apresentando os modelos obtidos com o emprego da estratégia 1 para a família M1.

Tabela 41: Modelos de regressão testados para formulação da equação ac_V na família M1

Modelo	Equação
1	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção + vel$
2	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção + vel^2$
3	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção + vel^3$
4	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção + vel^{1/2}$
5	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção + vel^{-1/2}$
6	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção + vel^{-1}$
7	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção + \log vel$
8	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^2 + vel$
9	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^2 + vel^2$
10	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^2 + vel^3$
11	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^2 + vel^{1/2}$
12	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^2 + vel^{-1/2}$
13	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^2 + vel^{-1}$
14	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^2 + \log vel$
15	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^3 + vel$
16	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^3 + vel^2$
17	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^3 + vel^3$
18	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^3 + vel^{1/2}$
19	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^3 + vel^{-1/2}$
20	$ac_V = niv + alin + nivtrans + torção^3 + vel^{-1}$
⋮	⋮
16807	$ac_V = \log niv + \log alin + \log nivtrans + \log torção + \log vel$

Nas estratégias de modelagem foram considerados sete possíveis perfis de relação tendo em vista o tempo e esforço computacional necessários para realizar o total de regressões resultante das possíveis combinações, bem como para o cálculo dos critérios de informação AIC e BIC de cada modelo. Todo o processo de ajuste das curvas de regressão e cálculo dos critérios em questão foi desenvolvido por meio do *software* R seguindo algoritmo apresentado na Seção Apêndice II.2.

Situações em que modelos se apresentam como candidatos para representar o mesmo fenômeno requerem instrumentos que permitam compará-los visando identificar aquele que representa de maneira mais completa a realidade. Nesse intento, soma-se ao coeficiente de determinação ajustado a utilização de métodos baseados na chamada teoria da informação, dentre os quais os critérios mais frequentemente utilizados são o de Akaike (AIC - *Akaike Information Criterion*) e o Bayesiano (BIC - *Bayesian Information Criterion*) (EMILIANO, 2009; POST, 2018).

A qualidade do ajustamento das equações de regressão aos dados analisados pode ser avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2). Os valores calculados para R^2 podem variar entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1 for o coeficiente obtido, maior é a capacidade do modelo de explicar a variação de Y pela influência de X, isto é, maior será a capacidade da função ajustada de descrever o fenômeno analisado. Ratton Neto (2017b) salienta que a interpretação do coeficiente de determinação deve limitar-se à análise do poder explicativo da equação definida, portanto, um R^2 próximo de zero apenas significa que a curva testada não possui capacidade de explicar com precisão o comportamento da variável Y a partir do comportamento da variável X. Nada impede, nessa situação, que uma curva alternativa, obtida por meio do acréscimo de mais observações, por exemplo, tenha um melhor ajuste.

A inclusão de novas variáveis explicativas ao modelo eleva o valor do coeficiente de determinação. Tal característica pode gerar interpretações equivocadas sobre o poder explicativo de ajustes quando comparadas funções simples e múltiplas (ALMEIDA, 2015; RATTON NETO, 2017b). Por este motivo, na avaliação da qualidade do ajuste de modelos de regressão múltipla, bem como quando comparados modelos alternativos, recomenda-se a utilização do coeficiente de determinação ajustado.

Nas modelagens M7 e M11 foram utilizados modelos de regressão linear múltipla considerando como variáveis explicativas todos os parâmetros aferidos durante a inspeção.

Em M8 e M12 foi empregada estratégia de modelagem personalizada, pois, com o emprego de mais parâmetros como variáveis explicativas, a quantidade de combinações resultante seria proporcionalmente maior, podendo requerer esforço e tempo computacional inviáveis para realizar o total de regressões. A personalização consistiu em reduzir o número de possíveis relações entre as variáveis explicativas e explicada.

A validade estatística dos modelos de regressão foi julgada por meio do teste de hipóteses baseado na distribuição F de Fischer-Snedecor, considerando intervalo de

confiança de 95%. A hipótese nula (H_0) estabelece a incapacidade do modelo ajustado de representar o comportamento da variável dependente, ou seja, nenhuma relação pode ser estabelecida entre a variável explicada e as variáveis explicativas consideradas. Enquanto que a hipótese alternativa (H_1) define que o modelo é representativo, ou, em outras palavras, o comportamento da variável dependente é explicado, em certa magnitude, pelo comportamento das variáveis independentes (explicativas). Assim, considerando o intervalo de confiança definido – tendo como referência Ratton Neto (1985) e Rodrigues (2001) – a hipótese nula é rejeitada se o valor de probabilidade (*p-valor*) da estatística F calculado para o modelo de regressão for inferior a 0,05. A magnitude do poder explicativo da equação obtida é avaliada pelo coeficiente de determinação ajustado.

Com exceção de M7 e M11 que estabelecem uma única equação para previsão de cada tipo de aceleração, as demais modelagens podem gerar mais do que um modelo válido por tipo de aceleração. Por consequência, fez-se necessário estabelecer critério para selecionar dentre os modelos validados, o mais representativo. Para tanto, foram adotados os critérios de informação AIC e BIC, assim como o R^2 ajustado.

Visando ilustrar as características dos dados empregados no desenvolvimento deste estudo, a Figura Apêndice II.1 apresenta o gráfico de dispersão das leituras dos parâmetros geométricos e da velocidade operacional em relação às acelerações verticais medidas no trecho ferroviário analisado. Tais dados foram utilizados na modelagem M1.

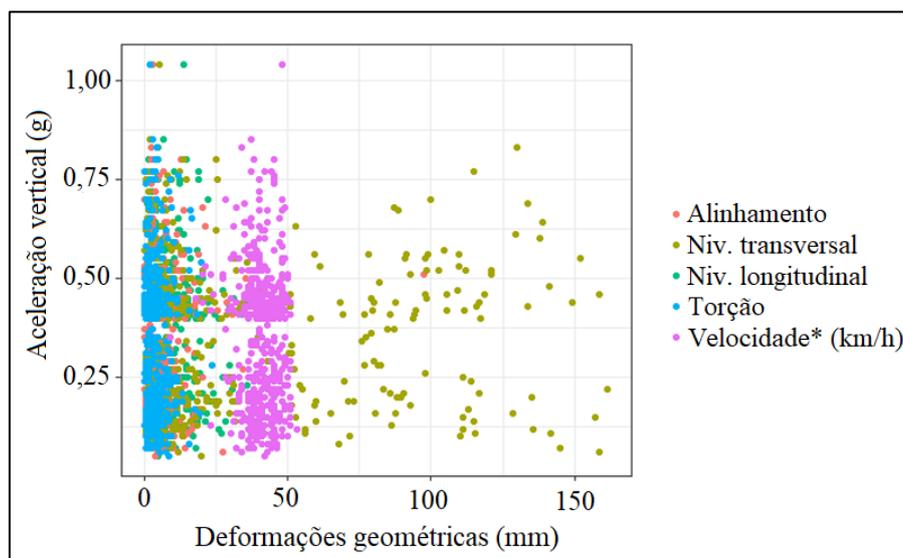


Figura Apêndice II.1: Dispersão dos dados utilizados na aplicação do procedimento.

* embora em outra unidade de medida, a velocidade foi incluída no gráfico com intuito de demonstrar sua distribuição em relação às demais variáveis.

Existem leituras relativamente distantes da região onde se concentram a maioria das observações no gráfico, relativas, sobretudo, ao parâmetro nivelamento transversal. Esses registros podem ser considerados *Outliers*, que, como repercutido por Rodrigues (2012), são observações extremas que se encontram de tal forma afastadas da maioria dos dados que despertam dúvidas sobre sua validade.

Como o processo de regressão considera todas observações do fenômeno, buscando diminuir a distância entre elas e a curva ajustada, a presença de *Outliers* pode prejudicar o ajustamento da curva, diminuindo a representatividade do modelo final.

Rodrigues (2012) indica que em um diagrama de caixa (*boxplot*), os *Outliers* são representados pelos valores que se encontram fora do intervalo $\{Q_1 - 1,5Q; Q_3 + 1,5Q\}$, em que Q_1 representa o primeiro quartil dos dados e Q é a amplitude interquartil, isto é, a diferença entre o terceiro e o primeiro quartil ($Q = Q_3 - Q_1$). Em outras palavras, abaixo ou acima do ponto mínimo ou máximo, respectivamente, do diagrama. A Figura Apêndice II.2 apresenta o gráfico *boxplot* relativo aos dados da figura precedente, em que cada círculo acima ou abaixo dos traços indicativos dos limites do diagrama representam *Outliers*.

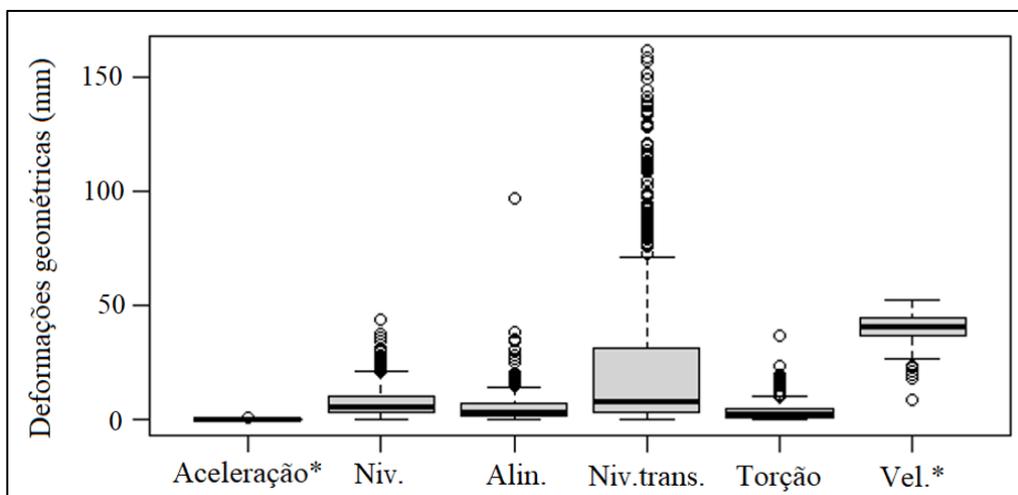


Figura Apêndice II.2: *Boxplot* dos dados apresentados na figura anterior.

* embora em unidades diferentes, essas variáveis foram incluídas no gráfico para tornar o conteúdo completo.

Tendo em vista o efeito negativo dos *Outliers* no ajustamento das curvas de regressão, essas observações foram eliminadas dos bancos de dados de cada modelagem Mi, utilizando para tanto função nativa do *software* R, como descrito no algoritmo

apresentado na Seção Apêndice II.2. O resultado obtido pela eliminação pode ser visto nas Figuras Apêndice II.3 e .4.

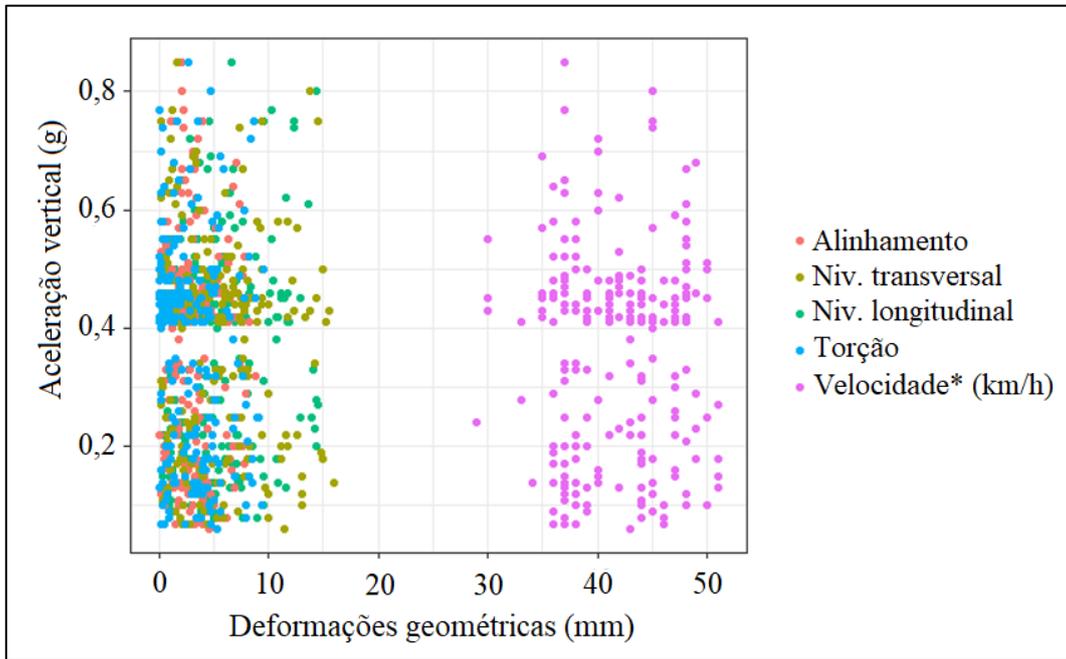


Figura Apêndice II.3: Dispersão dos dados após retirada de *Outliers*.

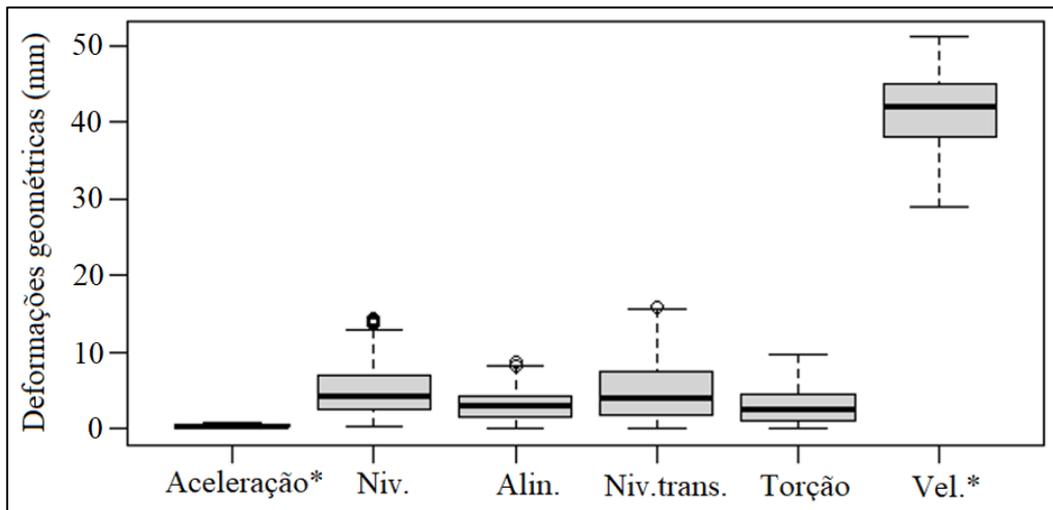


Figura Apêndice II.4: *Boxplot* resultante da retirada de *Outliers*.

As duas figuras precedentes apresentam o resultado da retirada de *Outliers* em quatro etapas consecutivas, ou seja, retirados os primeiros *Outliers*, constatou-se a presença de remanescentes, que foram retirados em mais uma etapa de eliminação, o que se repetiu até a quarta etapa, quando então, verificada a presença de número relativamente

pequeno de pontos destoantes, o processo foi interrompido de modo a não reduzir demasiadamente o número de observações do banco de dados.

Cada família de modelagem utilizou um conjunto de dados específico em decorrência de suas particularidades. Portanto, o processo de retirada de *Outliers* foi realizado no banco de dados de cada família, sendo que algumas delas, porém, requereram número menor de etapas de retirada.

Consolidados os respectivos bancos de dados, foram realizadas as regressões para cada família de modelagens M_i . As Tabelas 42 e 43 apresentam os resultados consolidados do processo de regressão para as modelagens M1 a M12 para seleção dos modelos vertical (ac_V) e horizontal (ac_H), respectivamente.

Tabela 42: Resultados consolidados para obtenção do modelo vertical (ac_V)

Modelagem	Total de modelos testados	Modelo selecionado	AIC	BIC	Estatística F	R ²	R ² ajustado
M1	16807	4648	-143,8145	-119,6572	0,05	0,047	0,026
M2	16807	3942	-119,6718	-97,12936	0.007049	0.08448	0.0589
M3	16807	2962	-105,4471	-83,29356	0.007395	0.08859	0.06162
M4*	117649	5053	516,9082	541,7557	0.02441	0.08672	0.05204
M5	16807	1	-102,4845	-80,13383	0.0813	0.05428	0.0271
M6	16807	1	-105,179	-82,56124	0.2075	0.03859	0.01203
M7	1	-	-	-	0.4784	0.1968	-0.001374
M8	78732	12	-21,69024	-8,597732	0.001933	0.8609	0.7345
M9	16807	12041	-56,60158	-46,34143	5.3e-08	0.7873	0.7464
M10	16807	246	-29,59485	-17,43116	0.0106	0.3292	0.2361
M11	1	-	-	-	0.009026	0.6628	0.4099
M12	19683	1020	-80,14771	-64,30233	0,00001789	0.9741	0.9522

* M4 não analisou as acelerações tal qual as demais famílias, mas a razão L/V sob características descritas na Tabela 38, motivo pelo qual a quantidade de modelos testados foi significativamente maior.

Tabela 43: Resultados consolidados para obtenção do modelo horizontal (ac_H)

Modelagem	Total de modelos testados	Modelo selecionado	AIC	BIC	Estatística F	R ²	R ² ajustado
M1	16807	4653	-299,6894	-274,3975	0.001238	0.0716	0.05428
M2	16807	589	-238,868	-216,1389	0,02736	0.1431	0.1198
M3	16807	729	-256,7139	-234,93	0,01163	0.1722	0.1464
M4*	-	-	-	-	-	-	-
M5	16807	176	-258,2425	-235,9308	0.0004821	0.1194	0.09397
M6	16807	7526	-268,6636	-246,2355	0.003026	0.0961 3	0.07045
M7	1	1	-	-	0.008052	0.3593	0.1969
M8	32768	969	-94,48508	-76,31717	0.000123	0.9714	0.9212
M9	16807	12041	-55,11405	-44,42953	0.04465	0.3204	0.199
M10	16807	14442	-61,76027	-49,76526	0.08161	0.2354	0.1262
M11	1	1	-	-	0.2952	0.4813	0.09235
M12	16384	13	-75,87886	-62,47122	0.0001233	0.8451	0.7522

* M4 não possui distinção entre modelos vertical e horizontal, por isso os resultados dessa família de modelagem foram apresentados somente na tabela anterior.

Considerando modelos verticais e horizontais, o estudo apresentado neste apêndice testou 500.518 regressões. No que se refere ao modelo ac_V , a modelagem M12 foi a que originou a função mais representativa, no caso, a modelo 1020. Essa família de modelagens caracteriza-se pela seleção das variáveis explicativas (parâmetros geométricos) mais relevantes estatisticamente e uso do TQI para representar a condição geométrica. A curva de regressão em questão apresenta R² ajustado de cerca de 0,95.

Quanto ao modelo ac_H , a família M8 foi a que apresentou a curva de regressão mais representativa. Essa família de modelagens caracteriza-se pela seleção dos parâmetros do modelo por meio da relevância estatística das variáveis explicativas e adota as leituras em verdadeira grandeza das deformações dos parâmetros geométricos. A função em questão (modelo 969) apresenta R² ajustado de, aproximadamente, 0,92.

Julgou-se que a adoção de modelos pertencentes a famílias de modelagens diferentes, portanto, com características distintas quanto à forma como são tratados os dados das inspeções geométricas, tornaria o uso do procedimento desnecessariamente mais complexo, tendo em vista que, além de analisar os registros de geometria de duas formas diferentes, também requereria dois tipos de modelos de degradação geométrica (em verdadeira grandeza e TQI). Por isso, como critério de seleção de apenas uma modalidade de abordagem para ambos os modelos ac_j , foram somados os valores AIC, BIC e R² ajustado relativos aos modelos mais representativos das famílias M8 e M12,

sendo escolhida então, a família, e, conseqüentemente, as correspondentes funções, que apresentaram a maior soma. A Tabela 44 apresenta os resultados obtidos nessa avaliação.

Tabela 44: Resultados para comparação e seleção da estratégia de modelagem de referência

Modelagem	AIC			BIC			R ² ajustado		
	Vert.	Hor.	Soma	Vert.	Hor.	Soma	Vert.	Hor.	Soma
M8	-21,69	-94,49	-116,18	-8,6	-76,32	-84,92	0,7345	0,9212	1,6557
M12	-80,15	-75,89	-156,04	-64,3	-62,47	-126,77	0,9522	0,7522	1,7044

O par de modelos selecionados da família M12 foi escolhido. Suas características são apresentadas nas equações que se seguem. As variáveis explicativas são identificadas segundo a denominação original dos parâmetros nos relatórios de inspeção, conforme definido na Tabela 17.

$$\begin{aligned}
 ac_V = & 4,24 \text{ LPROF31}^{-1} - 2,54 \text{ RPROF31}^{-1} - 1,19 \text{ LALIGN31}^{-1} \\
 & + 3,12 \text{ RALIGN31}^{-1} - 6,80 \text{ LPROF62}^{-1} \\
 & + 1,79 \text{ RPROF62}^{-1} + 1,85 \text{ LALIGN62}^{-1} \\
 & + 0,24 \text{ RALIGN62} + 6,51 \text{ LPROF124}^{-1} \\
 & - 6,43 \text{ RPROF124}^{-1} - 0,03 \text{ LALIGN124} - 1,25
 \end{aligned} \tag{51}$$

$$\begin{aligned}
 ac_H = & 0,05 \text{ LPROF31} - 0,06 \text{ RPROF31} + 0,04 \text{ LALIGN31} \\
 & + 0,15 \text{ RALIGN31} + 0,02 \text{ LPROF62} \\
 & + 3,77 \text{ LPROF124}^{-1} - 0,04 \text{ LALIGN124} \\
 & + 0,02 \text{ RALIGN124} - 0,18 \text{ GAUGE} - 0,17
 \end{aligned} \tag{52}$$

Após a formulação das Equações 51 e 52, foi realizada análise dos respectivos modelos visando verificar se os resultados obtidos por meio de sua aplicação aos dados analisados seriam conceitualmente coerentes com o comportamento descrito na literatura para o fenômeno sob análise. Nesse sentido, a partir do conteúdo teórico apresentado na Seção 3.1, a seguinte consideração se fez mais relevante nesse contexto:

- As acelerações dos veículos em relação à via permanente são proporcionais à amplitude das deformações geométricas e ao quadrado da velocidade dos

veículos, e inversamente proporcionais ao quadrado do comprimento da onda formada pelo defeito.

Apesar de autores (RATTON NETO, 1985; FERREIRA, 2010; LIMA, 2019) indicarem que a dinâmica veicular é afetada pela combinação das deformações dos diversos parâmetros, o que pode gerar movimentos que divergem do esperado, é razoável inferir a partir da consideração destacada acima, que quanto pior o estado de degradação da geometria, maior tende a ser as acelerações dos veículos em relação à via permanente. A estrutura da Equação 52 se adere a este perfil conceitual, com a maioria dos parâmetros relacionados de maneira diretamente proporcional à variável explicada, além do que, como visto nos resultados apresentados na Seção 6.5, suas previsões apresentaram, na maioria dos resultados, comportamento coerente com o que indica a teoria.

Por outro lado, a estrutura da Equação 51 destoou do perfil esperado, uma vez que a maioria das variáveis explicativas do modelo encontram-se arranjadas de maneira inversamente proporcional à variável explicada. Por consequência, julgou-se prudente analisar os resultados obtidos por meio dessa equação. Buscou-se então comparar as previsões feitas por esta equação com aquelas obtidas por meio de outros dois modelos, apresentados a seguir.

$$\begin{aligned} ac_v = & -0,36 \text{ LPROF31} + 0,29 \text{ RPROF31} - 0,06 \text{ LALIGN31} \\ & - 0,34 \text{ RALIGN31} + 0,14 \text{ LPROF62} - 0,11 \text{ RPROF62} \\ & - 0,22 \text{ LALIGN62} + 0,67 \text{ RALIGN62} \\ & + 0,02 \text{ LPROF124} + 0,03 \text{ RPROF124} \\ & - 0,04 \text{ LALIGN124} - 0,72 \end{aligned} \tag{53}$$

$$\begin{aligned}
ac_V = & \frac{-43,94 \text{ LPROF31}}{10^2} + \frac{33,49 \text{ RPROF31}}{10^2} - \frac{14,7 \text{ LALIGN31}}{10^2} \\
& - \frac{33,1 \text{ RALIGN31}}{10^2} + \frac{69,02 \text{ LPROF62}}{20^2} \\
& - \frac{51,21 \text{ RPROF62}}{20^2} - \frac{89,41 \text{ LALIGN62}}{20^2} \\
& + \frac{327,2 \text{ RALIGN62}}{20^2} + \frac{46,91 \text{ LPROF124}}{40^2} \\
& + \frac{66,32 \text{ RPROF124}}{40^2} - \frac{102,1 \text{ LALIGN124}}{40^2} \\
& + 0,000194 \text{ SPEED}^2 - 1,36
\end{aligned} \tag{54}$$

As equações 53 e 54 foram modeladas a partir dos dados da família M12 e suas estruturas estão mais adequadas aos pressupostos teóricos, sendo a primeira apresentando relação diretamente proporcional entre as variáveis explicativas e a variável explicada, assemelhando-se, portanto, a estrutura definida para a Equação 52 (ac_H), e a segunda seguindo estritamente a delimitação teórica fornecida pelo referencial teórico. A análise comparativa entre os modelos consistiu em avaliar qual equação apresentaria previsões de acelerações aderentes às delimitações conceituais, bem como subsidiaria a definição dos padrões de manutenção mais seguros. Para tanto, foram feitas as estimativas de acelerações para os mesmos segmentos válidos analisados na aplicação do procedimento e a segurança operacional foi avaliada por meio do critério de Nadal segundo a mesma sistemática utilizada na referida aplicação, adotando, portanto, o valor de 1,12 para a tolerância L/V. A Tabela 45 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 45: Segurança dinâmica estabelecida pelas equações avaliadas

Segmento	Frequência TM_{i_n} (dias)	Nadal		
		Equação 51	Equação 53	Equação 54
8	766	0,22	0,14	0,07
9	611	0,10	0,15	0,09
11	245	0,31	0,69	0,25
13	487	0,03	0,87	0,29
15	230	0,56	1,48	0,85
16	1239	0,33	1,66	1,02
35	759	0,18	0,11	0,07
36	1910	0,82	0,96	0,92
37	245	0,94	1,06	0,90
38	748	0,70	0,64	0,59
39	247	0,69	1,21	0,74

(Continuação)

Segmento	Frequência TM_{i_n} (dias)	Nadal		
		Equação 51	Equação 53	Equação 54
47	1076	0,30	0,27	0,15
73	433	2,99	2,44	4,92
74	1660	0,02	0,54	0,38
75	864	0,07	0,42	0,23
76	612	0,29	0,30	0,24
77	791	0,09	0,18	0,13
78	769	0,50	0,32	0,56
79	696	0,06	0,83	0,35
94	2045	0,39	0,38	0,24
97	249	2,11	1,83	3,06
101	371	0,38	0,60	0,34
104	804	5,16	9,89	6,56
106	328	0,08	0,33	0,20
110	281	0,06	0,06	0,05
112	261	0,78	1,43	1,14
113	501	0,38	0,47	0,47
123	349	0,14	2,23	0,62
125	350	0,47	0,85	0,58
210	1734	0,38	0,47	0,30
211	1545	1,70	1,68	1,57
212	6559	0,23	0,10	0,06
219	1344	0,13	0,48	0,35
220	2070	0,83	0,56	0,62
221	1299	0,55	0,65	0,47
222	1691	0,15	1,04	0,61
223	1900	0,48	0,36	0,43
224	791	0,32	0,55	0,23

Além dos resultados apresentados na tabela anterior, todas as equações apresentaram, na maioria dos segmentos simulados, magnitude de acelerações aumentando com a piora da condição geométrica.

Tomando como subsídio esses resultados e considerando que o procedimento ora proposto prima pela segurança, a Equação 53 foi escolhida como referência para previsão das acelerações verticais nesta pesquisa, pois foi aquela que resultou nas condições dinâmicas mais severas, com 9 segmentos apresentando relação L/V inseguras na frequência TM_{i_n} , contra 4 e 5 nas Equações 51 e 54, respectivamente.

O referencial teórico indica que a velocidade operacional apresenta influência sobre a dinâmica veicular, contudo, nas Equações 51, 52 e 53, essa variável não foi reconhecida como estatisticamente significativa pela técnica de seleção de variáveis empregada e, portanto, não foi incluída nos modelos. Embora destoe da literatura,

entende-se que essa característica deve-se ao fato de que a velocidade operacional não apresentou variação significativa entre os pontos de medição, logo, podendo ser considerada aproximadamente constante, e, por consequência, não influenciando na previsão das acelerações. Tendo em vista que as equações são determinadas empiricamente para cada trecho ferroviário analisado, essa característica e as próprias equações formuladas são específicas do ramal ferroviário analisado, não devendo a desconsideração da velocidade e os próprios modelos serem generalizados.

Embora a Equação 51 tenha sido substituída, a atualização das métricas de julgamento apresentadas na Tabela 44 continuou indicando a adoção da família de modelagens M12, como demonstrado pela Tabela 46.

Tabela 46: Métricas atualizadas para seleção da família de modelagem de referência

Modelagem	AIC			BIC			R ² ajustado		
	Vert.	Hor.	Soma	Vert.	Hor.	Soma	Vert.	Hor.	Soma
M8	-21,69	-94,49	-116,18	-8,6	-76,32	-84,92	0,7345	0,9212	1,6557
M12 - Equação 51	-80,15	-75,89	-156,04	-64,3	-62,47	-126,77	0,9522	0,7522	1,7044
M12 - Equação 53	-78,81	-75,89	-154,7	-62,96	-62,47	-125,43	0,9495	0,7522	1,7017
M12 - Equação 54	-78,17	-75,89	-154,06	-61,10	-62,47	-123,57	0,9482	0,7522	1,7004

Dessa forma, as Equações ac_V e ac_H escolhidas para serem utilizadas na aplicação do procedimento proposto, foram, respectivamente, as Equações 53 e 52. A seguir são apresentadas as tabelas com os dados estatísticos dos respectivos modelos.

Tabela 47: Métricas estatísticas relativas à Equação 53 (modelo ac_V)

Significância estatística do modelo				
R ²	R ² ajustado		Estatística F (p-valor)	
0,9727	0,9495		2,521x10 ⁻⁸	
Significância estatística das variáveis independentes				
Variável	Coefficiente estimado	Erro padrão	Estatística t	Nível de significância (p-valor)
LPROF31	-0.35863	0.03980	-9.011	5.94e-07
RPROF31	0.29444	0.03104	9.487	3.30e-07
LALIGN31	-0.06475	0.04657	-1.390	0.187743
RALIGN31	-0.33763	0.05750	-5.872	5.49e-05
LPROF62	0.14401	0.01591	9.051	5.65e-07
RPROF62	-0.11368	0.02075	-5.479	0.000106
LALIGN62	-0.21624	0.03027	-7.145	7.54e-06
RALIGN62	0.66792	0.06915	9.658	2.69e-07
LPROF124	0.02397	0.01869	1.282	0.222146
RPROF124	0.03356	0.01465	2.291	0.039289
LALIGN124	-0.04204	0.00600	-7.008	9.24e-06
Intercepto	-0.72485	0.15162	-4.781	0.000359

Tabela 48: Métricas estatísticas relativas à Equação 52 (modelo ac_H)

Significância estatística do modelo				
R ²	R ² ajustado		Estatística F (p-valor)	
0,8451	0,7522		0,0001233	
Significância estatística das variáveis independentes				
Variável	Coefficiente estimado	Erro padrão	Estatística t	Nível de significância (p-valor)
LPROF31	0.04834	0.01551	3.116	0.007076
RPROF31	-0.05710	0.01481	-3.855	0.001557
LALIGN31	0.04421	0.03868	1.143	0.270978
RALIGN31	0.14672	0.04805	3.053	0.008050
LPROF62	0.01682	0.01306	1.288	0.217280
LPROF124	3.76678	1.46692	2.568	0.021427
LALIGN124	-0.03885	0.03968	-0.979	0.343061
RALIGN124	0.01882	0.03836	0.491	0.630758
GAUGE	-0.18234	0.03559	-5.124	0.000125
Intercepto	-0.17390	0.14499	-1.199	0.248979

Apêndice II.1 Processo de Seleção de Variáveis Independentes Adotado nas Modelagens M8 e M12

Para determinar os parâmetros utilizados como variáveis independentes (explicativas) nas regressões para obtenção dos modelos pertencentes às famílias de modelagem M8 e M12, foi empregado o método *Stepwise*. Trata-se de abordagem que combina os procedimentos *Backward* (inclusão passo atrás) e *Forward* (inclusão passo à frente), que, em resumo, podem ser descritos como (CARVALHO e GÓES, 2018):

- Seleção *Forward*:
 1. Definir uma regressão apenas com o intercepto;
 2. Para as demais variáveis candidatas, escolher aquela cuja inclusão implica em maior aumento de R²;
 3. Se essa nova adição foi estatisticamente significativa, manter a variável, caso contrário, retirá-la, retornar ao modelo anterior, e finalizar o processo;
 4. Repetir os passos 2 e 3 até que a adição de qualquer nova variável não seja estatisticamente significativa (a um nível de significância pré-especificado).

- Seleção *Backward*:
 1. Definir regressão com todas as variáveis candidatas;

2. Se houver alguma variável cujo coeficiente é estatisticamente não significativo, eliminar a variável que tenha menor nível de significância no modelo (maior p-valor), caso contrário, este é o modelo final;
 3. Repetir o passo 2 até atingir um modelo no qual todas as variáveis são estatisticamente significantes (a um nível de significância pré-definido).
- Seleção *Stepwise*:
 1. Intercalar os passos *forward* e *backward* de forma a adicionar variáveis que sejam significativas e retirar variáveis que não são estatisticamente significativas;
 2. O algoritmo determina o resultado quando não for mais possível adicionar variáveis novas que sejam estatisticamente significativas, ou retirar variáveis incluídas que sejam estatisticamente não significativas.

O *software* R não possui função que considere o critério do p-valor, por isso a função *stepwise* considera em cada passo os critérios AIC (*Akaike Information Criterion*) ou BIC (*Bayesian Information Criterion*) (AMARAL *et al.*, 2009).

Os comandos para seleção das variáveis no R por meio do critério AIC adotados neste trabalho são apresentados abaixo e foram retirados de Amaral *et al.* (2009).

O processo iniciou-se com a importação para o *software* do arquivo que continha o banco de dados, nesse caso, planilha com o registro das leituras de aceleração e as leituras das deformações dos parâmetros geométricos considerados (ou TQI no caso de M12) correspondentes a cada ponto de medição. Como o processo foi feito para seleção das variáveis do modelo vertical e do modelo horizontal, foi necessária a formação de dois conjuntos de dados em pastas de trabalho diferentes, ou seja, uma com o registro dos parâmetros e as acelerações verticais e outra com os mesmos parâmetros, porém com as acelerações horizontais. Uma vez importado o banco de dados, foi utilizado o algoritmo abaixo, que apresenta os comandos relativos ao conjunto de dados com acelerações horizontais (Hor.). Os termos em negrito indicam a porção do código a ser alterada em função do tipo de dado analisado e também em função do nome do arquivo. No exemplo em questão, “Dados” é a denominação adotada para o arquivo.

Algoritmo utilizado no R:

```
> attach(Dados)
```

```

> nulo = lm(Hor.~1,data=Dados)
> completo = lm(Hor.~.,data=Dados)
> step(completo, data=Dados, direction="backward",trace=FALSE)
>
> step(nulo,
upper=completo),data=Dados,direction="forward",trace=FALSE)
> step(completo, data=Dados, direction="both",trace=FALSE)

```

A quarta, quinta e sexta linhas definiram as equações com as variáveis selecionadas, cujas características como *p-valor* da estatística F e R² foram consultadas por meio da função:

```
>summary(digitar a equação definida)
```

Apêndice II.2 Algoritmo empregado no *software* R para tratamento dos dados, ajuste das curvas de regressão e cálculo dos critérios AIC e BIC

A seguir são apresentados, na íntegra, os algoritmos utilizados para o tratamento dos dados (eliminação de *Outliers*), ajuste dos modelos de regressão e cálculo dos critérios de informação AIC e BIC. Em negrito são destacados os parâmetros do código específicos dos dados analisados, neste caso, relativos às modelagens M1 e que, portanto, são alterados segundo as características da família de modelagem analisada. Além disso, o código em questão corresponde ao tratamento de dados para obtenção dos modelos verticais.

- Preparação dos dados:

```

>remove(list = ls())
>setwd("digitar o endereço no qual se encontra na memória do computador
o banco de dados usado")
>library(readxl)
>A=read_excel("digitar o nome do arquivo que contém o banco de dados")

```

- Gráfico de dispersão aceleração vertical *x* deformações geométricas:

```

>library(ggplot2)
>ggplot(A,aes(y=Acvert,x=niv20))+geom_point(aes(col="nivelamento
20m"))+
  geom_point(aes(x=alin20,col="alinhamento 20m"))+
  geom_point(aes(x=nivtrans,col="niv. transversal"))+
  geom_point(aes(x=Torção10,col="Torção 10m"))+
  geom_point(aes(x=Vel,col="Velocidade (km/h)"))+
  labs(x=" Deformações geométricas (mm)",y=" Aceleração vertical (g)",title =
"Dispersão das irregularidades geométricas")+
  theme_bw()

```

- Gráfico *boxplot*:

```

>boxplot(A)

```

- Processo de eliminação de *Outliers*:

```

>out1 = c(boxplot.stats(A$niv20)$out,
  boxplot.stats(A$Acvert)$out,
  boxplot.stats(A$alin20)$out,
  boxplot.stats(A$nivtrans)$out,
  boxplot.stats(A$Torção10)$out,
  boxplot.stats(A$Vel)$out)
>A_out1 = A[-c(which(A$niv20 %in% out1),
  which(A$Acvert %in% out1),
  which(A$alin20 %in% out1),
  which(A$nivtrans %in% out1),
  which(A$Torção10 %in% out1),
  which(A$Vel %in% out1)),]
>boxplot(A_out1)

```

- Segunda rodada de remoção de *Outliers*:

```

>out2 = c(boxplot.stats(A_out1$niv20)$out,

```

```

boxplot.stats(A_out1$Acvert)$out,
boxplot.stats(A_out1$alin20)$out,
boxplot.stats(A_out1$nivtrans)$out,
boxplot.stats(A_out1$Torção10)$out,
boxplot.stats(A_out1$Vel)$out)
>A_out2 = A_out1[-c(which(A_out1$niv20 %in% out2),
  which(A_out1$Acvert %in% out2),
  which(A_out1$alin20 %in% out2),
  which(A_out1$nivtrans %in% out2),
  which(A_out1$Torção10 %in% out2),
  which(A_out1$Vel %in% out2)),]
>boxplot(A_out2)

```

- Terceira rodada de remoção de *Outliers*:

```

>out3 = c(boxplot.stats(A_out2$niv20)$out,
  boxplot.stats(A_out2$Acvert)$out,
  boxplot.stats(A_out2$alin20)$out,
  boxplot.stats(A_out2$nivtrans)$out,
  boxplot.stats(A_out2$Torção10)$out,
  boxplot.stats(A_out2$Vel)$out)
>A_out3 = A_out2[-c(which(A_out2$niv20 %in% out3),
  which(A_out2$Acvert %in% out3),
  which(A_out2$alin20 %in% out3),
  which(A_out2$nivtrans %in% out3),
  which(A_out2$Torção10 %in% out3),
  which(A_out2$Vel %in% out3)),]
>boxplot(A_out3)

```

- Quarta rodada de remoção de *Outliers*:

```

>out4 = c(boxplot.stats(A_out3$niv20)$out,
  boxplot.stats(A_out3$Acvert)$out,
  boxplot.stats(A_out3$alin20)$out,

```

```

boxplot.stats(A_out3$nivtrans)$out,
boxplot.stats(A_out3$Torção10)$out,
boxplot.stats(A_out3$Vel)$out)
>A_out4 = A_out3[-c(which(A_out3$niv20 %in% out4),
  which(A_out3$Acvert %in% out4),
  which(A_out3$alin20 %in% out4),
  which(A_out3$nivtrans %in% out4),
  which(A_out3$Torção10 %in% out4),
  which(A_out3$Vel %in% out4)),]
>boxplot(A_out4)

```

- Gráfico de dispersão aceleração vertical x irregularidades geométricas sem *Outliers*:

```

>library(ggplot2)
>ggplot(A_out4,aes(y=Acvert,x=niv20))+geom_point(aes(col="nivelamento
20m"))+
  geom_point(aes(x=alin20,col="alinhamento 20m"))+
  geom_point(aes(x=nivtrans,col="niv. transversal"))+
  geom_point(aes(x=Torção10,col="Torção 10m"))+
  geom_point(aes(x=Vel,col="Velocidade (km/h)"))+
  labs(x=" Deformações geométricas (mm)",y=" Aceleração vertical (g)",title =
"Dispersão das irregularidades geométricas")+
  theme_bw()

```

- Processo de ajuste das curvas de regressão:

```

>M1=lm(Acvert~niv20+alin20+nivtrans+Torção10+Vel,data=A_out4)
>M2=lm(Acvert~niv20+alin20+nivtrans+Torção10+Vel^2,data=A_out4)
>M3=lm(Acvert~niv20+alin20+nivtrans+Torção10+Vel^3,data=A_out4)
>M4=lm(Acvert~niv20+alin20+nivtrans+Torção10+{Vel^(1/2)},data=A_out4
)
>M5=lm(Acvert~niv20+alin20+nivtrans+Torção10+{Vel^(-
1/2)},data=A_out4)

```

```

>M6=lm(Acvert~niv20+alin20+nivtrans+Torção10+{Vel^(-1)},data=A_out4)
>M7=lm(Acvert~niv20+alin20+nivtrans+Torção10+{log10(Vel)},data=A_out
4)
>M8=lm(Acvert~niv20+alin20+nivtrans+Torção10^2+Vel,data=A_out4)
:
>M16807=lm(Acvert~{log10(niv20)}+{log10(alin20)}+{log10(nivtrans)}+{log
10(Torção10)}+{log10(Vel)},data=A_out4)

```

- Cálculo de BIC e AIC com exportação dos resultados para documento de texto com extensão .txt:

```

>sink(file = "BIC vert.txt")
>BIC(M1)
:
>BIC(M16807)
>sink(file = NULL)

```

```

>sink(file = "AIC vert.txt")
>AIC(M1)
:
>AIC(M16807)
>sink(file = NULL)

```

- Consulta das características do modelo de regressão, tais como valores estimados para os coeficientes da equação, resultado da estatística F, valores dos coeficientes de determinação, tabela ANOVA:

```

>summary(digitar o nome do modelo, por exemplo "M1")
>anova(digitar o nome do modelo, por exemplo "M1")

```

APÊNDICE III

Neste apêndice são apresentadas formulações para determinação de custos unitários a serem empregados no cálculo do custo total com manutenções na via permanente.

O custo de manutenção geométrica é estabelecido pelo somatório dos dispêndios relativos aos procedimentos e insumos necessários ao apoio, planejamento e realização propriamente, do serviço.

Para o custo direto de realização do procedimento de manutenção, utilizando socadora/niveladora e reguladora de lastro, se propõe a seguinte equação:

$$CSV = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(T_{SV} \cdot C_M \cdot L_i) + (T_{SV} \cdot C_{EQ} \cdot L_i) \cdot \left(\frac{MTBT}{MTBT_{Ti}}\right)}{(1+r)^j} \quad (55)$$

Onde

CSV = Custo de socaria de via, em R\$;

i = Segmento da via férrea analisada;

j = Período em que a manutenção está sendo avaliada;

N = Vida útil do trecho ferroviário;

T_{SV} = Tempo médio de rendimento do processo de socaria, em h/km;

C_M = Custo médio da mão de obra, em R\$/h;

L_i = Comprimento da seção de via i em manutenção, em km;

C_{EQ} = Custo de operação do equipamento, em R\$/h;

$MTBT$ = Carga acumulada, em milhões de toneladas brutas trafegadas;

$MTBT_{Ti}$ = Intervalo para realização de socaria da via, em milhões de toneladas brutas trafegadas;

r = Taxa de juros;

Nessa equação o custo médio de mão de obra (C_M) deve englobar as despesas com toda a equipe necessária tanto para a atuação na socadora quanto na reguladora de lastro, e da mesma forma, o custo de operação (C_{EQ}) engloba os valores correspondentes ao funcionamento dos dois equipamentos. Ao definir o custo médio de operação do

equipamento (C_{EQ}), pressupõe-se que os custos de lubrificante, combustível e manutenção já estejam incluídos.

Ainda dentro dos custos diretos de manutenção, é necessário contabilizar o custo de deslocamento dos equipamentos até o ponto de intervenção, levando em consideração que são veículos autopropulsados. Para tanto, a equação proposta é a seguinte:

$$CD = \left((CS_{rg} + CS_{sc}) \cdot DD \cdot P \right) + \left(C_M \cdot \frac{DD}{V} \right) \quad (56)$$

Onde

CD = Custo de deslocamento, em R\$;

CS_{rg} = Consumo de combustível em deslocamento da reguladora, em l/km;

CS_{sc} = Consumo de combustível em deslocamento da socadora, em l/km;

DD = Distância de deslocamento, em km;

P = Preço do combustível, em R\$/l;

C_M = Custo médio da mão de obra, em R\$/h;

V = Velocidade média de deslocamento dos equipamentos, em km/h.

O segundo item é o custo de inspeção da via para o planejamento das manutenções. Embora sejam formuladas equações que estimem a degradação geométrica, é necessário acompanhar as alterações tanto da geometria quanto o desgaste físico dos componentes, de maneira a monitorar tanto a eficiência dos modelos propostos quanto definir com precisão o momento da intervenção. Para tanto, a equação proposta é semelhante a primeira, diferindo, porém, quanto aos termos relativos ao equipamento utilizado, que, nesse caso, se referem à produtividade e ao custo de operação de um carro controle, por exemplo.

$$CIV = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(T_{IV} \cdot C_M \cdot L_i) + (T_{IV} \cdot C_{VI} \cdot L_i) \cdot \left(\frac{MTBT}{MTBT_{Ti}} \right)}{(1+r)^j} \quad (57)$$

Onde

C_{IV} = Custo de inspeção da via, em R\$;

T_{IV} = Tempo médio de rendimento do processo de inspeção, em h/km;

C_{VI} = Custo de operação do equipamento de inspeção, em R\$/h.

O terceiro componente de custo refere-se ao prejuízo decorrente da paralização do tráfego para realização dos serviços de manutenção. Não necessariamente toda intervenção na via gera tal custo, estando condicionado à janela operacional disponível. Sua formulação, porém, está atrelada às características operacionais e financeiras da ferrovia, por isso, a equação proposta tem caráter ilustrativo, cabendo maior adequação segundo as características da ferrovia. Dessa forma:

$$CPT = (T_{mp} - T_l) \cdot CP \quad (58)$$

Onde

CPT = Custo de paralização do tráfego, em R\$;

T_{mp} = Tempo de manutenção programada, em h;

T_l = Tempo livre entre trens, em h;

CP = Taxa em função da paralização de tráfego, em R\$/h.

O quarto e último elemento de custo relativo às manutenções geométricas diz respeito à descarga de lastro complementar para compensar o desgaste ocasionado pelo tráfego e pela própria ação de correção geométrica. O custo em questão é função da extensão a ser mantida e das premissas administrativas. A equação geral proposta é:

$$CDL = V_{l_{Km}} \cdot E_t \cdot C_{Last} + C_{Loc} \cdot T + C_M \cdot T \quad (59)$$

Onde

CDL = Custo de descarga de lastro, em R\$;

$V_{l_{Km}}$ = Consumo médio de brita para o levante em questão, em m³/km;

E_t = Extensão do trecho a receber lastro novo, em km;

C_{Last} = Custo de aquisição do lastro, em R\$/m³;

C_{Loc} = Custo de operação do trem de manutenção, em R\$/h;

T = Tempo de intervenção, em h;

C_M = Custo de mão de obra necessária para operação, em R\$/h.

Quanto às renovações, as estimativas de custo devem necessariamente compreender o preço de aquisição dos materiais e o custo para instalá-los na via.

Como são diversos componentes, a sistemática pode ser estabelecida por meio do custo individual de troca de cada um, e, para isso, são propostas algumas equações gerais adaptadas dos trabalhos de PATRA *et al.* (2009), apresentadas a seguir.

Para renovação de trilhos:

$$CRT = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_t \cdot L_i) + (T_{sti} \cdot C_m \cdot L_i) + (C_{et} \cdot T_{sti} \cdot L_i)) \cdot (m/m_{ti})}{(1+r)^j} \quad (60)$$

Onde

CRT = Custo de renovação de trilhos, em R\$/km;

C_t = Custo do trilho, em R\$/km;

L_i = Comprimento do trecho a ser renovado, em km;

T_{sti} = Tempo para substituição do trilho, em h/km;

C_m = Custo de mão-de-obra para instalação, em R\$/h;

C_{et} = Custo de equipamento para instalação, R\$/h;

m = Milhões de toneladas brutas trafegadas, em MTBT;

m_{ti} = Vida útil do trilho, em MTBT;

Para renovação de lastro:

$$CRL = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_l \cdot L_i) + (T_{sli} \cdot C_m \cdot L_i) + (C_{el} \cdot T_{sli} \cdot L_i)) \cdot (m/m_{li})}{(1+r)^j} \quad (61)$$

Onde

CRL = Custo de renovação do lastro, em R\$/km;

C_l = Custo do lastro, em R\$/km;

T_{sli} = Tempo para renovação do lastro, em h/km;

C_{el} = Custo do equipamento para renovação do lastro, em R\$/h;

m_{li} = Vida útil do lastro, em MTBT.

Para renovação de dormentes:

$$CRD = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_d \cdot L_i) + (T_{sdi} \cdot C_m \cdot L_i) + (C_{ed} \cdot T_{sdi} \cdot L_i)) \cdot (m/m_{di})}{(1+r)^j} \quad (62)$$

Onde

CRD = Custo de renovação de dormentes, em R\$/km;

C_d = Custo do dormente, em R\$/km;

T_{sdi} = Tempo para renovação dos dormentes, em h/km

C_{ed} = Custo do equipamento para troca de dormentes, em R\$/h;

m_{di} = Vida útil do dormente, em MTBT.

Para renovação das fixações:

$$CRF = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_f \cdot L_i) + (T_{sfi} \cdot C_m \cdot L_i) + (C_{ef} \cdot T_{sfi} \cdot L_i)) \cdot (m/m_{fi})}{(1+r)^j} \quad (63)$$

Onde

CRF = Custo de renovação das fixações em R\$/km;

C_f = Custo das fixações, em R\$/km;

T_{sfi} = Tempo para renovação das fixações, em h/km;

C_{ef} = Custo do equipamento para renovação das fixações, em R\$/h;

m_{fi} = Vida útil das fixações, em MTBT.

A utilização das equações está condicionada à conformação da renovação, ou seja, aos procedimentos que serão realizados, uma vez que em função das diferenças de vida

útil dos materiais na via, não necessariamente é preciso que sejam trocados todos os itens ao mesmo tempo.

As equações apresentadas possuem formulações gerais, ou seja, mesmo que os procedimentos sejam manuais ou automatizados, a relação a ser avaliada é a mesma, cabendo adequação dos valores correspondentes a cada situação, como os custos de equipamentos.

Caso os dados necessários para a utilização nos modelos não estejam disponíveis, o Relatório Sintético de Composições de Custos, desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, intitulado SICRO (2023), apresenta composições de custos unitários para serviços de manutenção de via permanente, configurando-se, portanto, como fonte alternativa de informações, com valores estabelecidos para praticamente todos os serviços analisados nessa etapa.

APÊNDICE IV

Este apêndice apresenta as tolerâncias do desvio padrão (DP) utilizadas na aplicação do procedimento. Os valores foram determinados a partir da norma ABNT NBR 16387:2020 empregando a sistemática descrita a seguir.

A norma em questão não fornece tolerâncias para o desvio padrão, e, por não se ter clareza quanto à forma como os valores das normas internacionais foram definidos, fica desaconselhada sua adoção no contexto nacional. Portanto, quando da aplicação do procedimento nacionalmente, propõe-se que as tolerâncias do DP sejam determinadas utilizando sistemática proposta por Rodrigues (2001). Segundo o autor, quando são adotados índices de qualidade como a média ou o desvio padrão para caracterizar a qualidade da geometria, o seu limite admissível E_{LA} pode ser estabelecido com base na probabilidade de ocorrência máxima aceitável de 0,5% de, pelo menos, um dos valores do parâmetro medido na seção ultrapassar seu limite fixado em norma para o nível de tolerância definido. Assim:

$$F(x) = P(|E_{LA}| \leq \text{limite fixado pela norma}) \geq 0,995 \quad (64)$$

Onde

$F(x)$ é a função de distribuição de probabilidade;

P é a probabilidade de ocorrência do evento.

Citando JARTS (1980), Ratton Neto (1987), Takeshita (1992) e Riessberger *et al.* (1995), Rodrigues (2001) afirma que as frequências das medidas relativas de um parâmetro geométrico em um determinado segmento ferroviário são distribuídas segundo uma curva normal de média μ e desvio padrão σ . Sendo assim, o autor indica que o valor E_{LA} pode ser definido por meio da equação:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} dv \quad (65)$$

Onde

x é o valor limite fixado em norma;

μ é a média da amostra;

σ é o desvio padrão da amostra.

Seguindo esse entendimento, a Figura Apêndice IV.1 apresenta a operação para obtenção das tolerâncias do DP.

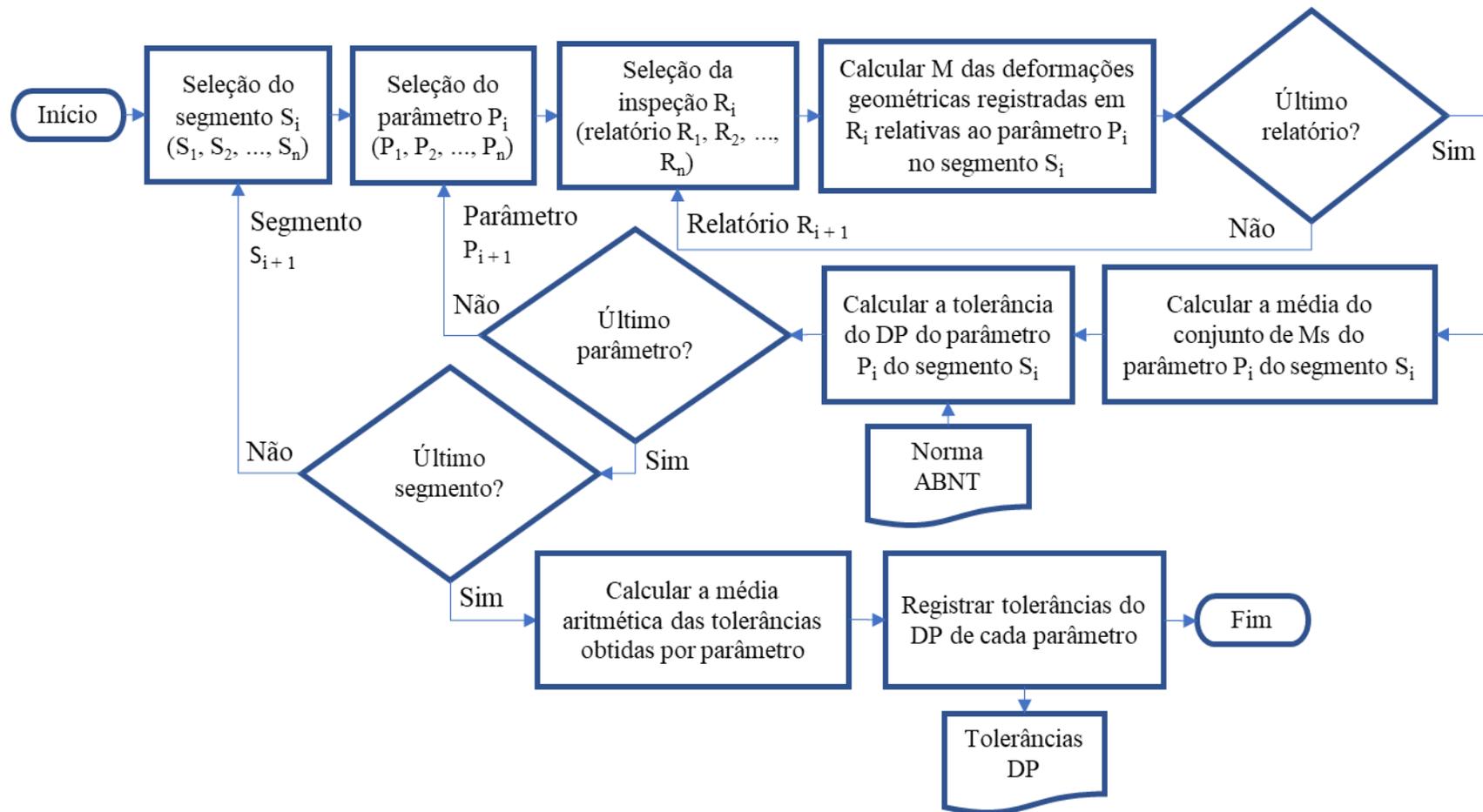


Figura Apêndice IV.1: Operação para determinação das tolerâncias do DP.

O objetivo do processo descrito na figura anterior é obter as tolerâncias geométricas do DP para cada parâmetro analisado. Inicialmente, o primeiro segmento do trecho ferroviário analisado e o primeiro parâmetro geométrico do conjunto inspecionado são selecionados. Posteriormente, é calculada a média (M) das deformações geométricas do respectivo parâmetro e segmento em cada um dos relatórios de inspeção utilizados na primeira etapa do procedimento. Em seguida é calculada a média dos valores obtidos de modo a estabelecer valor referencial que represente de forma consolidada as observações. A partir desse dado e em conjunto com a tolerância em inteira grandeza fornecida pela norma ABNT, é calculada a tolerância do DP por meio da Equação 65. O processo é então repetido de forma iterativa para todos os parâmetros do segmento, e depois para todos os segmentos. Em seguida, a média aritmética dos resultados estabelece a tolerância para cada parâmetro geométrico analisado.

A Tabelas 49 apresenta as tolerâncias calculadas na aplicação apresentada neste trabalho.

Tabela 49: Tolerâncias do DP (mm) calculadas para os segmentos válidos

Segmento	Parâmetro										
	LPROF31	RPROF31	LALIGN31	RALIGN31	LPROF62	RPROF62	LALIGN62	RALIGN62	GAUGE	WARP_62	TWIST_S
8	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	10,5	16,8	12,4
9	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	10,5	18,4	12,8
11	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	10,5	13,2	12,8
13	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	9	17,6	12,6
15	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17	9	18,4	12,8
16	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	8,5	15,2	12,2
35	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	12	17,2	12,6
36	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	11	17,2	12,4
37	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	11,5	17,2	12,6
38	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	11,5	16	12,2
39	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	10,5	18,4	12,6
47	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	11,5	17,2	12,6
73	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	10,5	17,2	12,4
74	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	11,5	17,2	12,6
75	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	11	16,8	12,4
76	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	11	17,2	12,6
77	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	11	16,8	12,4
78	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	10	17,2	12,4
79	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	11	16,8	12,4
94	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	8	20,8	13,2
97	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17	7	17,2	12,6
101	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17	7,5	19,2	12,8
104	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	7,5	17,2	12,4
106	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	7,5	18	12,6

(continuação)

Segmento	Parâmetro										
	LPROF31	RPROF31	LALIGN31	RALIGN31	LPROF62	RPROF62	LALIGN62	RALIGN62	GAUGE	WARP_62	TWIST_S
110	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	8	16,8	12,4
112	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	12,5	17,2	12,4
113	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	12,5	16,8	12,4
123	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	9	15,6	12,2
125	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	9	16,8	12,4
210	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	9	17,2	12,6
211	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	9	19,2	12,8
212	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17	9	16,8	12,4
219	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	11	17,2	12,6
220	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	10,5	16	12,2
221	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17	17	9	18,4	12,8
222	19,8	19,8	12	12	22,2	22,2	17,3	17,3	10	17,2	12,6
223	19,8	19,8	12	12	22,8	22,2	17	17	10,5	17,2	12,4
224	19,8	19,8	12	12	21,6	22,2	17	17	10	17,6	12,6
Média	19,8	19,8	12,0	12,0	22,2	22,2	17,2	17,1	9,7	17,3	12,5

APÊNDICE V

Este apêndice apresenta o cálculo de vida útil dos trilhos por fadiga do trecho ferroviário analisado na aplicação do procedimento ora proposto. Para tanto, foi empregada a Equação 20, seguindo o método estabelecido no Apêndice I, e os seguintes valores foram adotados para as variáveis de interesse:

$V = 16000 \text{ kgf} (\cong 16 \text{ t})$ – Maior sobrecarga dinâmica identificada nos cenários que atenderam aos três critérios para definição da frequência de manutenção na aplicação do procedimento;

$k_r = 8 \text{ kgf/cm}^2 \cdot \text{cm}$ – coeficiente de lastro (lastro em pedra britada comprimida e consolidada);

$E = 2100000 \text{ kgf/cm}^2$ – módulo de elasticidade do trilho TR-57 utilizado no trecho;

$I = 2730,5 \text{ cm}^4$ – momento de inércia do trilho TR-57.

Com relação à variável $I_{r/c}$ – módulo de resistência do trilho TR-57 – foram adotados dois valores, a saber, 295 cm^3 para o boleto, e $360,7 \text{ cm}^3$ para o patim, visando com isso calcular a ocorrência de fadiga no boleto (do tipo RCF – *Rolling Contact Fatigue*) e no patim (trinca por flexão do trilho). Abaixo são apresentados os valores obtidos para $S_{m\acute{a}x}$:

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{V}{4 I_{r/c} \sqrt[4]{\frac{k_r}{4 E I_r}}} \rightarrow \frac{16000}{4 \cdot 295 \cdot \sqrt[4]{\frac{8}{4 \cdot 2100000 \cdot 2730,5}}} = 3137,587 \text{ kgf/cm}^2 \quad (66)$$

$$S_{m\acute{a}x} = \frac{V}{4 I_{r/c} \sqrt[4]{\frac{k_r}{4 E I_r}}} \rightarrow \frac{16000}{4 \cdot 360,7 \cdot \sqrt[4]{\frac{8}{4 \cdot 2100000 \cdot 2730,5}}} = 2566,089 \text{ kgf/cm}^2 \quad (67)$$

Uma vez conhecido o nível de tensão no trilho devido à carga de 16 t, é necessário definir a tensão de referência para o desenvolvimento de fadiga à flexão, ou seja, o valor abaixo do qual não se desenvolve fadiga no trilho. Para tanto, foi utilizada a Equação 49. Vale notar que a Figura Apêndice I.2 não define a unidade de medida do eixo y, enquanto na Figura Apêndice I.3 adotam-se duas possíveis, sendo pascal e ksi (*kilopound per*

square inch, sendo que 1 ksi equivale a 1000 psi, que, por sua vez, equivale a, aproximadamente, 70,31 kgf/cm²). Assim, foram assumidos os seguintes valores para as variáveis de interesse:

$m = 0,667$ – valor adotado por Abbott e Zaremski (1978) e Rodrigues (1983);

$R = -0,2$ – valor adotado por Abbott e Zaremski (1978) e Rodrigues (1983);

$b \cong 52,998$ ksi – valor adotado por Rodrigues (1983).

S_e foi calculado por meio da Equação 49 como:

$$S_e = \frac{b}{1 - m R} \rightarrow \frac{52,998}{1 - 0,667 \cdot (-0,2)} = 46,76 \text{ ksi} \cong 3290,5 \text{ kgf/cm}^2 \quad (68)$$

Se $S_{m\acute{a}x} < S_e$ não ocorrerá fadiga, portanto, no caso estudado, considerando que a maior sobrecarga alcançou cerca de 16 t, o que originou tensões máximas de 3137,587 kgf/cm², conclui-se que não se desenvolve fadiga nos trilhos da ferrovia analisada, por consequência, os trilhos são substituídos somente pelo critério de desgaste.

APÊNDICE VI

Este apêndice apresenta os resultados detalhados obtidos na simulação dos dez cenários administrativos de cada segmento válido analisado na aplicação do procedimento.

Os segmentos 15, 39, 73, 78, 97, 112, 123, 125 e 212, apresentaram nos cenários de menor frequência de manutenção geométrica, ou seja, em TM_{i_n} (cenário 1), vidas úteis de trilhos e dormentes significativamente curtas devido à magnitude das cargas dinâmicas previstas. Caso o CCV desses cenários fosse tomado como parâmetro para comparar o custo de longo prazo resultante das estratégias de manutenção correntes, baseadas na postergação das intervenções, com aquele fruto da política de manutenção definida pelo procedimento, a redução de custos obtida na aplicação do procedimento seria acentuada, por este motivo, mantendo abordagem conservadora, estes cenários foram desconsiderados no cálculo dos benefícios financeiros obtidos na aplicação.

Tabela 50: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg. ¹	Cen. ²	Freq. ³ (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert. ⁴	Hor. ⁵	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
8	1	766	0,76	0,13	13,43	1,90	0,14	11,8	8,3	17.250,35	100.291,55	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.766.403,46
8	2	689,4	0,74	0,15	13,32	2,12	0,16	12,0	8,4	18.482,52	100.291,55	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.803.852,02
8	3	612,8	0,71	0,16	13,19	2,33	0,18	12,2	8,5	20.946,86	117.006,81	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.823.031,61
8	4	536,2	0,68	0,18	13,03	2,53	0,19	12,5	8,6	24.643,36	133.722,06	144.865,57	522.747,96	1.053.680,82	1.879.659,77
8	5	459,6	0,64	0,19	12,84	2,71	0,21	12,9	8,7	28.339,86	158.794,95	144.865,57	522.747,96	1.053.680,82	1.908.429,16
8	6	383	0,60	0,20	12,59	2,88	0,23	13,3	8,9	34.500,70	192.225,47	181.081,96	522.747,96	1.053.680,82	1.984.236,91
8	7	306,4	0,54	0,21	12,27	3,03	0,25	13,9	9,1	43.125,88	234.013,61	253.514,75	522.747,96	1.053.680,82	2.107.083,01
8	8	229,8	0,45	0,22	11,85	3,16	0,27	14,5	9,4	57.911,90	317.589,90	325.947,53	522.747,96	1.053.680,82	2.277.878,10
8	9	153,2	0,34	0,23	11,27	3,26	0,29	15,4	9,9	87.483,93	476.384,85	507.029,49	522.747,96	526.840,41	2.120.486,64
8	10	76,6	0,18	0,23	10,42	3,33	0,32	16,5	10,7	174.967,86	952.769,70	1.014.058,98	348.498,64	526.840,41	3.017.135,59
9	1	611	0,01	0,10	9,56	1,41	0,15	17,5	11,6	20.946,86	117.006,81	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.121.941,89
9	2	549,9	0,03	0,12	9,67	1,66	0,17	17,4	11,5	23.411,19	133.722,06	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.141.121,48
9	3	488,8	0,05	0,13	9,75	1,90	0,20	17,3	11,4	27.107,70	150.437,32	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.197.749,63
9	4	427,7	0,06	0,15	9,83	2,14	0,22	17,2	11,3	30.804,20	167.152,58	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.254.377,79
9	5	366,6	0,07	0,16	9,88	2,37	0,24	17,1	11,2	35.732,87	200.583,10	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.292.736,98
9	6	305,5	0,08	0,18	9,91	2,58	0,26	17,1	11,2	43.125,88	234.013,61	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.405.993,28
9	7	244,4	0,08	0,19	9,91	2,78	0,28	17,1	11,2	54.215,39	300.874,64	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.520.160,22
9	8	183,3	0,07	0,21	9,86	2,96	0,30	17,2	11,3	72.697,91	401.166,19	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.747.583,46
9	9	122,2	0,05	0,22	9,74	3,12	0,32	17,3	11,4	109.662,95	601.749,29	615.678,67	348.498,64	526.840,41	2.202.429,95
9	10	61,1	0,00	0,23	9,51	3,25	0,34	17,5	11,7	220.558,07	1.203.498,57	1.267.573,73	348.498,64	526.840,41	3.566.969,42

¹ Segmento; ² Cenário; ³ Frequência; ⁴ Vertical; ⁵ Horizontal (lateral).

Tabela 51: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
11	1	245	0,40	0,56	11,56	8,03	0,69	15,0	9,6	54.215,39	300.874,64	289.731,14	522.747,96	1.053.680,82	2.221.249,95
11	2	220,5	0,36	0,53	11,35	7,56	0,67	15,3	9,8	60.376,23	334.305,16	325.947,53	522.747,96	526.840,41	1.770.217,29
11	3	196	0,32	0,49	11,14	7,10	0,64	15,6	10,0	67.769,24	367.735,67	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.709.224,28
11	4	171,5	0,28	0,46	10,94	6,63	0,61	15,9	10,2	77.626,58	426.239,08	434.596,71	348.498,64	526.840,41	1.813.801,41
11	5	147	0,24	0,43	10,74	6,16	0,57	16,1	10,4	91.180,43	501.457,74	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.975.006,71
11	6	122,5	0,20	0,40	10,55	5,69	0,54	16,4	10,5	109.662,95	601.749,29	615.678,67	348.498,64	526.840,41	2.202.429,95
11	7	98	0,17	0,36	10,36	5,22	0,50	16,6	10,7	136.770,65	743.828,98	796.760,63	348.498,64	526.840,41	2.552.699,30
11	8	73,5	0,13	0,33	10,16	4,76	0,47	16,8	11,0	182.360,86	994.557,85	1.050.275,37	348.498,64	526.840,41	3.102.533,13
11	9	49	0,08	0,30	9,92	4,29	0,43	17,1	11,2	274.773,46	1.496.015,58	1.593.521,26	348.498,64	526.840,41	4.239.649,35
11	10	24,5	0,02	0,27	9,60	3,82	0,40	17,4	11,6	549.546,93	2.983.673,54	3.223.258,90	348.498,64	526.840,41	7.631.818,42
13	1	487	0,02	0,58	9,59	8,34	0,87	17,5	11,6	27.107,70	150.437,32	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.197.749,63
13	2	438,3	0,02	0,49	9,60	7,11	0,74	17,4	11,6	29.572,03	167.152,58	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.216.929,23
13	3	389,6	0,05	0,41	9,77	5,90	0,60	17,3	11,4	34.500,70	192.225,47	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.283.147,18
13	4	340,9	0,08	0,33	9,91	4,69	0,47	17,1	11,2	39.429,38	217.298,35	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.349.365,13
13	5	292,2	0,10	0,24	10,03	3,49	0,35	17,0	11,1	45.590,22	250.728,87	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.425.172,88
13	6	243,5	0,12	0,16	10,11	2,31	0,23	16,9	11,0	54.215,39	300.874,64	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.520.160,22
13	7	194,8	0,12	0,08	10,15	1,14	0,11	16,8	11,0	69.001,41	376.093,30	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.718.814,07
13	8	146,1	0,12	0,00	10,11	0,02	0,00	16,9	11,0	91.180,43	501.457,74	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.975.006,71
13	9	97,4	0,09	0,08	9,96	1,16	0,12	17,1	11,2	138.002,82	752.186,61	796.760,63	348.498,64	526.840,41	2.562.289,10
13	10	48,7	0,03	0,16	9,66	2,27	0,23	17,4	11,5	276.005,63	1.504.373,21	1.593.521,26	348.498,64	526.840,41	4.249.239,15

Tabela 52: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
15	1	230	1,82	1,95	18,93	28,05	1,48	-2,5	6,0	57.911,90	317.589,90	325.947,53	871.246,60	-5.795.244,49	-4.222.548,56
15	2	207	1,59	1,73	17,72	24,90	1,41	1,3	6,4	64.072,74	351.020,42	362.163,92	696.997,28	12.117.329,38	13.591.583,74
15	3	184	1,36	1,51	16,53	21,76	1,32	4,6	6,8	72.697,91	401.166,19	398.380,31	696.997,28	3.161.042,45	4.730.284,14
15	4	161	1,14	1,30	15,38	18,62	1,21	7,6	7,3	83.787,42	459.669,59	470.813,10	696.997,28	1.580.521,22	3.291.788,62
15	5	138	0,92	1,08	14,26	15,47	1,08	10,1	7,9	97.341,27	534.888,25	543.245,88	522.747,96	1.053.680,82	2.751.904,18
15	6	115	0,72	0,86	13,20	12,33	0,93	12,2	8,5	117.055,96	635.179,80	688.111,45	522.747,96	1.053.680,82	3.016.775,99
15	7	92	0,52	0,64	12,21	9,19	0,75	14,0	9,1	146.627,99	802.332,38	832.977,02	522.747,96	1.053.680,82	3.358.366,17
15	8	69	0,35	0,42	11,32	6,06	0,54	15,3	9,9	194.682,54	1.061.418,88	1.122.708,16	522.747,96	526.840,41	3.428.397,95
15	9	46	0,21	0,20	10,57	2,92	0,28	16,3	10,5	293.255,98	1.596.307,13	1.702.170,43	348.498,64	526.840,41	4.467.072,59
15	10	23	0,11	0,02	10,05	0,22	0,02	17,0	11,1	586.511,97	3.184.256,63	3.440.557,26	348.498,64	526.840,41	8.086.664,90
16	1	1239	0,33	1,29	11,21	18,60	1,66	15,5	9,9	9.857,34	58.503,40	36.216,39	522.747,96	526.840,41	1.154.165,51
16	2	1115,1	0,22	1,13	10,64	16,19	1,52	16,2	10,5	11.089,51	66.861,03	36.216,39	348.498,64	526.840,41	989.505,98
16	3	991,2	0,11	0,96	10,09	13,79	1,37	16,9	11,0	13.553,85	75.218,66	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.036.544,34
16	4	867,3	0,02	0,79	9,58	11,40	1,19	17,5	11,6	14.786,02	83.576,29	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.046.134,14
16	5	743,4	0,08	0,63	9,89	9,03	0,91	17,1	11,2	17.250,35	100.291,55	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.065.313,73
16	6	619,5	0,15	0,46	10,30	6,68	0,65	16,7	10,8	20.946,86	117.006,81	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.121.941,89
16	7	495,6	0,22	0,30	10,61	4,36	0,41	16,3	10,5	27.107,70	150.437,32	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.197.749,63
16	8	371,7	0,25	0,15	10,79	2,11	0,20	16,1	10,3	35.732,87	200.583,10	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.292.736,98
16	9	247,8	0,24	0,00	10,75	0,04	0,00	16,1	10,4	54.215,39	300.874,64	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.520.160,22
16	10	123,9	0,16	0,14	10,32	1,97	0,19	16,6	10,8	108.430,78	593.391,66	615.678,67	348.498,64	526.840,41	2.192.840,15

Tabela 53: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
35	1	759	0,34	0,08	11,27	1,22	0,11	15,4	9,9	17.250,35	100.291,55	72.432,78	522.747,96	526.840,41	1.239.563,05
35	2	683,1	0,29	0,05	11,02	0,65	0,06	15,7	10,1	19.714,69	108.649,18	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.112.352,09
35	3	607,2	0,25	0,01	10,79	0,10	0,01	16,1	10,3	22.179,02	125.364,43	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.131.531,68
35	4	531,3	0,21	0,03	10,56	0,44	0,04	16,3	10,5	24.643,36	133.722,06	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.178.570,04
35	5	455,4	0,16	0,07	10,35	0,96	0,09	16,6	10,7	29.572,03	167.152,58	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.216.929,23
35	6	379,5	0,13	0,10	10,17	1,47	0,14	16,8	10,9	34.500,70	192.225,47	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.283.147,18
35	7	303,6	0,10	0,14	10,01	1,94	0,19	17,0	11,1	44.358,05	242.371,24	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.415.583,08
35	8	227,7	0,07	0,17	9,89	2,39	0,24	17,1	11,2	59.144,06	325.947,53	325.947,53	348.498,64	526.840,41	1.586.378,17
35	9	151,8	0,06	0,19	9,81	2,78	0,28	17,2	11,3	88.716,10	484.742,48	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.955.827,11
35	10	75,9	0,06	0,22	9,81	3,11	0,32	17,2	11,3	177.432,19	969.484,96	1.014.058,98	348.498,64	526.840,41	3.036.315,18
36	1	1910	0,19	0,70	10,48	10,11	0,96	16,4	10,6	6.160,84	33.430,52	36.216,39	348.498,64	526.840,41	951.146,80
36	2	1719	0,19	0,66	10,50	9,46	0,90	16,4	10,6	7.393,01	41.788,14	36.216,39	348.498,64	526.840,41	960.736,59
36	3	1528	0,19	0,61	10,51	8,80	0,84	16,4	10,6	8.625,18	50.145,77	36.216,39	348.498,64	526.840,41	970.326,39
36	4	1337	0,20	0,57	10,51	8,14	0,77	16,4	10,6	9.857,34	58.503,40	36.216,39	348.498,64	526.840,41	979.916,19
36	5	1146	0,19	0,52	10,50	7,47	0,71	16,4	10,6	11.089,51	66.861,03	36.216,39	348.498,64	526.840,41	989.505,98
36	6	955	0,19	0,47	10,48	6,80	0,65	16,4	10,6	13.553,85	75.218,66	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.036.544,34
36	7	764	0,18	0,43	10,45	6,12	0,59	16,5	10,7	17.250,35	100.291,55	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.065.313,73
36	8	573	0,17	0,38	10,38	5,44	0,52	16,6	10,7	23.411,19	133.722,06	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.141.121,48
36	9	382	0,15	0,33	10,29	4,75	0,46	16,7	10,8	34.500,70	192.225,47	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.283.147,18
36	10	191	0,12	0,28	10,14	4,05	0,40	16,9	11,0	70.233,58	384.450,93	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.728.403,87

Tabela 54: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
37	1	245	0,40	0,85	11,55	12,23	1,06	15,0	9,7	54.215,39	300.874,64	289.731,14	522.747,96	1.053.680,82	2.221.249,95
37	2	220,5	0,36	0,80	11,35	11,49	1,01	15,3	9,8	60.376,23	334.305,16	325.947,53	522.747,96	526.840,41	1.770.217,29
37	3	196	0,32	0,75	11,15	10,73	0,96	15,6	10,0	67.769,24	367.735,67	398.380,31	522.747,96	526.840,41	1.883.473,60
37	4	171,5	0,28	0,69	10,95	9,96	0,91	15,9	10,2	77.626,58	426.239,08	434.596,71	348.498,64	526.840,41	1.813.801,41
37	5	147	0,24	0,64	10,74	9,17	0,85	16,1	10,4	91.180,43	501.457,74	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.975.006,71
37	6	122,5	0,20	0,58	10,52	8,35	0,79	16,4	10,6	109.662,95	601.749,29	615.678,67	348.498,64	526.840,41	2.202.429,95
37	7	98	0,15	0,52	10,29	7,50	0,73	16,7	10,8	136.770,65	743.828,98	796.760,63	348.498,64	526.840,41	2.552.699,30
37	8	73,5	0,11	0,46	10,05	6,61	0,66	17,0	11,1	182.360,86	994.557,85	1.050.275,37	348.498,64	526.840,41	3.102.533,13
37	9	49	0,05	0,39	9,78	5,65	0,58	17,2	11,4	274.773,46	1.496.015,58	1.593.521,26	348.498,64	526.840,41	4.239.649,35
37	10	24,5	0,01	0,32	9,53	4,58	0,48	17,5	11,7	549.546,93	2.983.673,54	3.223.258,90	348.498,64	526.840,41	7.631.818,42
38	1	748	0,42	0,52	11,69	7,45	0,64	14,8	9,5	17.250,35	100.291,55	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.766.403,46
38	2	673,2	0,36	0,49	11,36	7,07	0,62	15,3	9,8	19.714,69	108.649,18	108.649,18	522.747,96	526.840,41	1.286.601,41
38	3	598,4	0,30	0,46	11,04	6,68	0,60	15,7	10,1	22.179,02	125.364,43	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.131.531,68
38	4	523,6	0,24	0,44	10,75	6,29	0,58	16,1	10,4	24.643,36	133.722,06	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.178.570,04
38	5	448,8	0,19	0,41	10,48	5,89	0,56	16,5	10,6	29.572,03	167.152,58	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.216.929,23
38	6	374	0,14	0,38	10,24	5,48	0,54	16,7	10,9	35.732,87	200.583,10	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.292.736,98
38	7	299,2	0,10	0,35	10,04	5,07	0,51	17,0	11,1	44.358,05	242.371,24	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.415.583,08
38	8	224,4	0,07	0,32	9,89	4,66	0,47	17,1	11,2	59.144,06	325.947,53	325.947,53	348.498,64	526.840,41	1.586.378,17
38	9	149,6	0,06	0,29	9,80	4,23	0,43	17,2	11,3	89.948,26	493.100,11	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.965.416,91
38	10	74,8	0,06	0,26	9,80	3,79	0,39	17,2	11,3	179.896,53	977.842,59	1.050.275,37	348.498,64	526.840,41	3.083.353,54

Tabela 55: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
39	1	247	1,33	1,38	16,40	19,78	1,21	5,0	6,9	54.215,39	300.874,64	289.731,14	696.997,28	3.161.042,45	4.502.860,90
39	2	222,3	1,19	1,26	15,65	18,15	1,16	6,9	7,2	60.376,23	334.305,16	325.947,53	696.997,28	2.107.361,63	3.524.987,83
39	3	197,6	1,05	1,15	14,91	16,51	1,11	8,7	7,5	67.769,24	367.735,67	398.380,31	522.747,96	1.580.521,22	2.937.154,41
39	4	172,9	0,90	1,03	14,17	14,88	1,05	10,3	7,9	77.626,58	426.239,08	434.596,71	522.747,96	1.053.680,82	2.514.891,14
39	5	148,2	0,76	0,92	13,43	13,24	0,99	11,8	8,3	89.948,26	493.100,11	507.029,49	522.747,96	1.053.680,82	2.666.506,64
39	6	123,5	0,62	0,81	12,70	11,60	0,91	13,1	8,8	108.430,78	593.391,66	615.678,67	522.747,96	1.053.680,82	2.893.929,88
39	7	98,8	0,48	0,69	11,96	9,95	0,83	14,4	9,3	135.538,48	735.471,35	796.760,63	522.747,96	1.053.680,82	3.244.199,23
39	8	74,1	0,34	0,58	11,24	8,31	0,74	15,5	9,9	181.128,70	986.200,22	1.050.275,37	522.747,96	526.840,41	3.267.192,65
39	9	49,4	0,20	0,46	10,51	6,66	0,63	16,4	10,6	272.309,13	1.479.300,33	1.593.521,26	348.498,64	526.840,41	4.220.469,76
39	10	24,7	0,06	0,35	9,80	5,01	0,51	17,2	11,3	545.850,42	2.966.958,28	3.187.042,51	348.498,64	526.840,41	7.575.190,26
47	1	1076	0,33	0,21	11,19	2,98	0,27	15,5	10,0	12.321,68	66.861,03	72.432,78	522.747,96	526.840,41	1.201.203,86
47	2	968,4	0,29	0,21	10,98	3,04	0,28	15,8	10,1	13.553,85	75.218,66	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.036.544,34
47	3	860,8	0,25	0,22	10,79	3,09	0,29	16,1	10,3	14.786,02	83.576,29	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.046.134,14
47	4	753,2	0,22	0,22	10,62	3,14	0,30	16,3	10,5	17.250,35	100.291,55	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.065.313,73
47	5	645,6	0,19	0,22	10,46	3,19	0,30	16,5	10,6	19.714,69	108.649,18	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.112.352,09
47	6	538	0,16	0,22	10,32	3,23	0,31	16,6	10,8	24.643,36	133.722,06	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.178.570,04
47	7	430,4	0,13	0,23	10,20	3,27	0,32	16,8	10,9	30.804,20	167.152,58	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.254.377,79
47	8	322,8	0,12	0,23	10,10	3,30	0,33	16,9	11,0	40.661,54	225.655,98	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.358.954,93
47	9	215,2	0,10	0,23	10,02	3,32	0,33	17,0	11,1	61.608,40	334.305,16	362.163,92	348.498,64	526.840,41	1.633.416,53
47	10	107,6	0,09	0,23	9,97	3,34	0,33	17,0	11,2	124.448,97	676.967,95	724.327,84	348.498,64	526.840,41	2.401.083,80

Tabela 56: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					Total (CCV)
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
73	1	433	3,79	4,95	29,12	71,10	2,44	-48,2	3,9	30.804,20	167.152,58	181.081,96	1.219.745,24	0,00	1.598.783,98
73	2	389,7	3,94	4,48	29,86	64,33	2,15	-52,5	3,8	34.500,70	192.225,47	181.081,96	1.219.745,24	0,00	1.627.553,37
73	3	346,4	4,34	4,00	31,93	57,55	1,80	-65,1	3,6	38.197,21	208.940,72	217.298,35	1.393.994,56	0,00	1.858.430,84
73	4	303,1	5,55	3,53	38,19	50,78	1,33	-109,7	3,0	44.358,05	242.371,24	253.514,75	1.568.243,88	0,00	2.108.487,91
73	5	259,8	13,77	3,06	80,74	44,00	0,54	-662,6	1,4	51.751,06	284.159,38	289.731,14	3.484.986,40	0,00	4.110.627,98
73	6	216,5	5,72	2,59	39,06	37,23	0,95	-116,7	2,9	61.608,40	334.305,16	362.163,92	1.742.493,20	0,00	2.500.570,68
73	7	173,2	1,17	2,12	15,57	30,45	1,96	7,1	7,2	77.626,58	426.239,08	434.596,71	696.997,28	2.107.361,63	3.742.821,28
73	8	129,9	0,27	1,65	10,91	23,68	2,17	15,9	10,2	103.502,11	568.318,77	579.462,27	348.498,64	526.840,41	2.126.622,20
73	9	86,6	0,00	1,18	9,51	16,90	1,78	17,5	11,7	155.253,17	844.120,52	905.409,80	348.498,64	526.840,41	2.780.122,54
73	10	43,3	0,04	0,70	9,69	10,12	1,05	17,3	11,5	310.506,34	1.688.241,05	1.810.819,61	348.498,64	526.840,41	4.684.906,04
74	1	1660	0,95	0,54	14,41	7,72	0,54	9,8	7,8	7.393,01	41.788,14	36.216,39	522.747,96	1.580.521,22	2.188.666,73
74	2	1494	0,84	0,46	13,84	6,60	0,48	11,0	8,1	8.625,18	50.145,77	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.671.416,12
74	3	1328	0,73	0,38	13,27	5,48	0,41	12,1	8,4	9.857,34	58.503,40	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.681.005,91
74	4	1162	0,62	0,30	12,72	4,36	0,34	13,1	8,8	11.089,51	66.861,03	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.690.595,71
74	5	996	0,52	0,23	12,18	3,25	0,27	14,0	9,2	12.321,68	66.861,03	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.728.044,27
74	6	830	0,42	0,15	11,67	2,14	0,18	14,8	9,6	16.018,18	91.933,92	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.756.813,66
74	7	664	0,32	0,07	11,18	1,03	0,09	15,5	10,0	19.714,69	108.649,18	108.649,18	522.747,96	526.840,41	1.286.601,41
74	8	498	0,24	0,01	10,73	0,07	0,01	16,1	10,4	25.875,53	142.079,69	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.188.159,84
74	9	332	0,16	0,08	10,35	1,17	0,11	16,6	10,8	39.429,38	217.298,35	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.349.365,13
74	10	166	0,11	0,16	10,05	2,26	0,23	17,0	11,1	80.090,92	434.596,71	470.813,10	348.498,64	526.840,41	1.860.839,77

Tabela 57: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
75	1	864	0,68	0,38	13,00	5,48	0,42	12,6	8,6	14.786,02	83.576,29	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.747.223,87
75	2	777,6	0,63	0,32	12,74	4,59	0,36	13,1	8,8	17.250,35	100.291,55	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.766.403,46
75	3	691,2	0,58	0,26	12,48	3,70	0,30	13,5	9,0	18.482,52	100.291,55	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.803.852,02
75	4	604,8	0,52	0,20	12,21	2,82	0,23	14,0	9,1	22.179,02	125.364,43	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.832.621,41
75	5	518,4	0,47	0,13	11,95	1,94	0,16	14,4	9,3	25.875,53	142.079,69	144.865,57	522.747,96	1.053.680,82	1.889.249,56
75	6	432	0,42	0,07	11,68	1,05	0,09	14,8	9,6	30.804,20	167.152,58	181.081,96	522.747,96	1.053.680,82	1.955.467,52
75	7	345,6	0,37	0,01	11,40	0,17	0,02	15,2	9,8	38.197,21	208.940,72	217.298,35	522.747,96	526.840,41	1.514.024,65
75	8	259,2	0,31	0,05	11,10	0,71	0,06	15,6	10,0	51.751,06	284.159,38	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.500.980,63
75	9	172,8	0,25	0,11	10,78	1,59	0,15	16,1	10,3	77.626,58	426.239,08	434.596,71	348.498,64	526.840,41	1.813.801,41
75	10	86,4	0,17	0,17	10,39	2,47	0,24	16,6	10,7	155.253,17	844.120,52	905.409,80	348.498,64	526.840,41	2.780.122,54
76	1	612	0,04	0,20	9,69	2,92	0,30	17,3	11,5	20.946,86	117.006,81	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.121.941,89
76	2	550,8	0,04	0,21	9,70	2,99	0,31	17,3	11,5	23.411,19	133.722,06	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.141.121,48
76	3	489,6	0,04	0,21	9,70	3,05	0,31	17,3	11,5	27.107,70	150.437,32	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.197.749,63
76	4	428,4	0,04	0,22	9,69	3,11	0,32	17,3	11,5	30.804,20	167.152,58	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.254.377,79
76	5	367,2	0,03	0,22	9,67	3,16	0,33	17,4	11,5	35.732,87	200.583,10	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.292.736,98
76	6	306	0,03	0,22	9,63	3,21	0,33	17,4	11,5	43.125,88	234.013,61	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.405.993,28
76	7	244,8	0,02	0,23	9,58	3,25	0,34	17,5	11,6	54.215,39	300.874,64	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.520.160,22
76	8	183,6	0,00	0,23	9,51	3,29	0,35	17,5	11,7	72.697,91	401.166,19	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.747.583,46
76	9	122,4	0,02	0,23	9,59	3,32	0,35	17,4	11,6	109.662,95	601.749,29	615.678,67	348.498,64	526.840,41	2.202.429,95
76	10	61,2	0,04	0,23	9,73	3,34	0,34	17,3	11,4	219.325,90	1.195.140,94	1.267.573,73	348.498,64	526.840,41	3.557.379,62

Tabela 58: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					Total (CCV)
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
77	1	791	0,37	0,14	11,43	2,07	0,18	15,2	9,8	16.018,18	91.933,92	72.432,78	522.747,96	526.840,41	1.229.973,25
77	2	711,9	0,33	0,10	11,21	1,49	0,13	15,5	9,9	18.482,52	100.291,55	108.649,18	522.747,96	526.840,41	1.277.011,61
77	3	632,8	0,29	0,06	11,01	0,91	0,08	15,8	10,1	20.946,86	117.006,81	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.121.941,89
77	4	553,7	0,25	0,02	10,82	0,33	0,03	16,0	10,3	23.411,19	133.722,06	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.141.121,48
77	5	474,6	0,22	0,02	10,64	0,23	0,02	16,3	10,5	28.339,86	158.794,95	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.207.339,43
77	6	395,5	0,19	0,05	10,47	0,78	0,07	16,5	10,6	33.268,54	183.867,84	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.273.557,38
77	7	316,4	0,16	0,09	10,32	1,33	0,13	16,6	10,8	41.893,71	234.013,61	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.368.544,72
77	8	237,3	0,13	0,13	10,18	1,86	0,18	16,8	10,9	56.679,73	309.232,27	325.947,53	348.498,64	526.840,41	1.567.198,58
77	9	158,2	0,11	0,17	10,07	2,37	0,24	16,9	11,0	85.019,59	468.027,22	470.813,10	348.498,64	526.840,41	1.899.198,96
77	10	79,1	0,09	0,20	9,98	2,87	0,29	17,0	11,1	170.039,18	927.696,81	977.842,59	348.498,64	526.840,41	2.950.917,63
78	1	769	1,41	0,37	16,78	5,30	0,32	4,0	6,7	17.250,35	100.291,55	72.432,78	696.997,28	3.687.882,86	4.574.854,82
78	2	692,1	1,53	0,31	17,42	4,41	0,25	2,1	6,5	18.482,52	100.291,55	108.649,18	696.997,28	7.375.765,71	8.300.186,24
78	3	615,2	1,81	0,25	18,87	3,53	0,19	-2,3	6,0	20.946,86	117.006,81	108.649,18	871.246,60	-6.848.925,30	-5.731.075,87
78	4	538,3	2,60	0,18	22,96	2,65	0,12	-17,6	4,9	24.643,36	133.722,06	144.865,57	1.045.495,92	-526.840,41	821.886,50
78	5	461,4	9,07	0,12	56,43	1,77	0,03	-293,5	2,1	28.339,86	158.794,95	144.865,57	2.439.490,48	0,00	2.771.490,86
78	6	384,5	2,93	0,06	24,65	0,90	0,04	-25,1	4,6	34.500,70	192.225,47	181.081,96	1.045.495,92	-526.840,41	926.463,64
78	7	307,6	0,89	0,00	14,12	0,04	0,00	10,4	7,9	43.125,88	234.013,61	253.514,75	522.747,96	1.053.680,82	2.107.083,01
78	8	230,7	0,38	0,06	11,47	0,82	0,07	15,1	9,7	57.911,90	317.589,90	325.947,53	522.747,96	526.840,41	1.751.037,69
78	9	153,8	0,15	0,12	10,29	1,67	0,16	16,7	10,8	87.483,93	476.384,85	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.946.237,32
78	10	76,9	0,02	0,17	9,59	2,51	0,26	17,4	11,6	174.967,86	952.769,70	1.014.058,98	348.498,64	526.840,41	3.017.135,59

Tabela 59: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
79	1	696	0,09	0,57	9,99	8,25	0,83	17,0	11,1	18.482,52	100.291,55	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.102.762,29
79	2	626,4	0,07	0,49	9,85	7,08	0,72	17,2	11,3	20.946,86	117.006,81	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.121.941,89
79	3	556,8	0,04	0,41	9,71	5,91	0,61	17,3	11,4	23.411,19	133.722,06	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.141.121,48
79	4	487,2	0,02	0,33	9,60	4,75	0,49	17,4	11,6	27.107,70	150.437,32	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.197.749,63
79	5	417,6	0,00	0,25	9,51	3,59	0,38	17,5	11,7	32.036,37	175.510,21	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.263.967,58
79	6	348	0,01	0,17	9,56	2,43	0,25	17,5	11,6	38.197,21	208.940,72	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.339.775,33
79	7	278,4	0,02	0,09	9,60	1,27	0,13	17,4	11,6	48.054,55	267.444,13	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.444.352,47
79	8	208,8	0,02	0,01	9,59	0,11	0,01	17,4	11,6	64.072,74	351.020,42	362.163,92	348.498,64	526.840,41	1.652.596,12
79	9	139,2	0,00	0,07	9,52	1,05	0,11	17,5	11,7	96.109,10	526.530,62	543.245,88	348.498,64	526.840,41	2.041.224,66
79	10	69,6	0,03	0,15	9,63	2,20	0,23	17,4	11,5	193.450,38	1.053.061,25	1.122.708,16	348.498,64	526.840,41	3.244.558,83
94	1	2045	0,21	0,28	10,61	4,08	0,38	16,3	10,5	6.160,84	33.430,52	36.216,39	348.498,64	526.840,41	951.146,80
94	2	1840,5	0,25	0,29	10,81	4,20	0,39	16,0	10,3	6.160,84	33.430,52	36.216,39	348.498,64	526.840,41	951.146,80
94	3	1636	0,29	0,30	11,00	4,32	0,39	15,8	10,1	7.393,01	41.788,14	36.216,39	348.498,64	526.840,41	960.736,59
94	4	1431,5	0,32	0,31	11,15	4,42	0,40	15,6	10,0	8.625,18	50.145,77	36.216,39	522.747,96	526.840,41	1.144.575,71
94	5	1227	0,34	0,31	11,27	4,50	0,40	15,4	9,9	9.857,34	58.503,40	36.216,39	522.747,96	526.840,41	1.154.165,51
94	6	1022,5	0,35	0,32	11,33	4,56	0,40	15,3	9,8	12.321,68	66.861,03	72.432,78	522.747,96	526.840,41	1.201.203,86
94	7	818	0,35	0,32	11,31	4,58	0,40	15,3	9,9	16.018,18	91.933,92	72.432,78	522.747,96	526.840,41	1.229.973,25
94	8	613,5	0,32	0,32	11,18	4,54	0,41	15,5	10,0	20.946,86	117.006,81	108.649,18	522.747,96	526.840,41	1.296.191,21
94	9	409	0,26	0,31	10,87	4,40	0,41	16,0	10,3	32.036,37	175.510,21	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.263.967,58
94	10	204,5	0,15	0,28	10,26	4,08	0,40	16,7	10,8	65.304,90	359.378,05	362.163,92	348.498,64	526.840,41	1.662.185,92

Tabela 60: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
97	1	249	1,70	2,33	18,29	33,43	1,83	-0,5	6,2	52.983,22	292.517,01	289.731,14	696.997,28	-34.244.626,52	-32.912.397,87
97	2	224,1	1,47	2,07	17,09	29,74	1,74	3,1	6,6	59.144,06	325.947,53	325.947,53	696.997,28	4.741.563,67	6.149.600,07
97	3	199,2	1,24	1,81	15,91	26,05	1,64	6,2	7,1	66.537,07	367.735,67	362.163,92	696.997,28	2.107.361,63	3.600.795,58
97	4	174,3	1,02	1,56	14,76	22,36	1,52	9,0	7,6	76.394,42	417.881,45	434.596,71	522.747,96	1.580.521,22	3.032.141,75
97	5	149,4	0,80	1,30	13,65	18,68	1,37	11,4	8,2	89.948,26	493.100,11	507.029,49	522.747,96	1.053.680,82	2.666.506,64
97	6	124,5	0,60	1,04	12,59	15,00	1,19	13,3	8,9	107.198,62	585.034,03	615.678,67	522.747,96	1.053.680,82	2.884.340,09
97	7	99,6	0,41	0,79	11,60	11,32	0,98	14,9	9,6	134.306,31	735.471,35	760.544,24	522.747,96	1.053.680,82	3.206.750,67
97	8	74,7	0,24	0,53	10,73	7,65	0,71	16,1	10,4	179.896,53	977.842,59	1.050.275,37	348.498,64	526.840,41	3.083.353,54
97	9	49,8	0,10	0,28	10,04	3,98	0,40	17,0	11,1	269.844,79	1.470.942,70	1.557.304,86	348.498,64	526.840,41	4.173.431,40
97	10	24,9	0,03	0,02	9,67	0,31	0,03	17,4	11,5	540.921,75	2.941.885,39	3.150.826,12	348.498,64	526.840,41	7.508.972,31
101	1	371	0,11	0,42	10,05	6,06	0,60	17,0	11,1	35.732,87	200.583,10	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.292.736,98
101	2	333,9	0,10	0,40	10,03	5,79	0,58	17,0	11,1	39.429,38	217.298,35	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.349.365,13
101	3	296,8	0,10	0,38	10,02	5,52	0,55	17,0	11,1	44.358,05	242.371,24	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.415.583,08
101	4	259,7	0,10	0,36	10,01	5,25	0,52	17,0	11,1	51.751,06	284.159,38	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.500.980,63
101	5	222,6	0,10	0,35	10,01	4,98	0,50	17,0	11,1	60.376,23	334.305,16	325.947,53	348.498,64	526.840,41	1.595.967,97
101	6	185,5	0,10	0,33	10,02	4,70	0,47	17,0	11,1	72.697,91	401.166,19	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.747.583,46
101	7	148,4	0,10	0,31	10,03	4,43	0,44	17,0	11,1	89.948,26	493.100,11	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.965.416,91
101	8	111,3	0,10	0,29	10,04	4,16	0,41	17,0	11,1	120.752,46	660.252,69	688.111,45	348.498,64	526.840,41	2.344.455,65
101	9	74,2	0,11	0,27	10,05	3,89	0,39	17,0	11,1	181.128,70	986.200,22	1.050.275,37	348.498,64	526.840,41	3.092.943,33
101	10	37,1	0,10	0,25	10,03	3,62	0,36	17,0	11,1	363.489,56	1.972.400,43	2.136.767,14	348.498,64	526.840,41	5.347.996,18

Tabela 61: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					Total (CCV)
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
104	1	804	0,90	9,75	14,18	140,15	9,89	10,3	7,9	16.018,18	91.933,92	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.756.813,66
104	2	723,6	0,81	8,75	13,71	125,80	9,18	11,2	8,2	18.482,52	100.291,55	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.803.852,02
104	3	643,2	0,72	7,75	13,23	111,45	8,43	12,2	8,5	20.946,86	117.006,81	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.823.031,61
104	4	562,8	0,63	6,76	12,74	97,10	7,62	13,1	8,8	23.411,19	133.722,06	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.842.211,21
104	5	482,4	0,53	5,76	12,25	82,75	6,76	13,9	9,1	27.107,70	150.437,32	144.865,57	522.747,96	1.053.680,82	1.898.839,36
104	6	402	0,43	4,76	11,74	68,40	5,83	14,7	9,5	33.268,54	183.867,84	181.081,96	522.747,96	1.053.680,82	1.974.647,11
104	7	321,6	0,33	3,76	11,23	54,05	4,81	15,5	9,9	41.893,71	234.013,61	217.298,35	522.747,96	526.840,41	1.542.794,04
104	8	241,2	0,23	2,76	10,70	39,70	3,71	16,2	10,4	55.447,56	300.874,64	325.947,53	348.498,64	526.840,41	1.557.608,78
104	9	160,8	0,13	1,76	10,17	25,35	2,49	16,8	10,9	83.787,42	459.669,59	470.813,10	348.498,64	526.840,41	1.889.609,16
104	10	80,4	0,02	0,77	9,63	11,00	1,14	17,4	11,5	167.574,85	910.981,56	977.842,59	348.498,64	526.840,41	2.931.738,04
106	1	328	0,20	0,25	10,55	3,52	0,33	16,4	10,5	40.661,54	225.655,98	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.358.954,93
106	2	295,2	0,17	0,20	10,37	2,83	0,27	16,6	10,7	45.590,22	250.728,87	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.425.172,88
106	3	262,4	0,13	0,15	10,20	2,14	0,21	16,8	10,9	50.518,89	275.801,76	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.491.390,83
106	4	229,6	0,10	0,10	10,04	1,45	0,14	17,0	11,1	57.911,90	317.589,90	325.947,53	348.498,64	526.840,41	1.576.788,37
106	5	196,8	0,08	0,05	9,90	0,77	0,08	17,1	11,2	67.769,24	367.735,67	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.709.224,28
106	6	164	0,05	0,01	9,78	0,08	0,01	17,3	11,4	81.323,09	442.954,33	470.813,10	348.498,64	526.840,41	1.870.429,57
106	7	131,2	0,04	0,04	9,69	0,61	0,06	17,3	11,5	102.269,94	559.961,14	579.462,27	348.498,64	526.840,41	2.117.032,41
106	8	98,4	0,03	0,09	9,64	1,29	0,13	17,4	11,5	136.770,65	743.828,98	796.760,63	348.498,64	526.840,41	2.552.699,30
106	9	65,6	0,03	0,14	9,64	1,98	0,21	17,4	11,5	204.539,89	1.111.564,65	1.195.140,94	348.498,64	526.840,41	3.386.584,53
106	10	32,8	0,04	0,19	9,72	2,67	0,27	17,3	11,4	410.311,94	2.231.486,93	2.390.281,88	348.498,64	526.840,41	5.907.419,81

Tabela 62: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
110	1	281	0,09	0,04	9,95	0,65	0,06	17,1	11,2	46.822,38	259.086,50	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.434.762,67
110	2	252,9	0,09	0,02	9,94	0,23	0,02	17,1	11,2	52.983,22	292.517,01	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.510.570,42
110	3	224,8	0,08	0,01	9,93	0,19	0,02	17,1	11,2	59.144,06	325.947,53	325.947,53	348.498,64	526.840,41	1.586.378,17
110	4	196,7	0,08	0,04	9,90	0,60	0,06	17,1	11,2	67.769,24	367.735,67	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.709.224,28
110	5	168,6	0,07	0,07	9,86	1,01	0,10	17,2	11,3	78.858,75	434.596,71	434.596,71	348.498,64	526.840,41	1.823.391,21
110	6	140,5	0,06	0,10	9,80	1,41	0,14	17,2	11,3	94.876,94	518.173,00	543.245,88	348.498,64	526.840,41	2.031.634,86
110	7	112,4	0,04	0,13	9,72	1,81	0,19	17,3	11,4	119.520,30	651.895,06	688.111,45	348.498,64	526.840,41	2.334.865,85
110	8	84,3	0,02	0,15	9,61	2,20	0,23	17,4	11,6	158.949,67	869.193,41	905.409,80	348.498,64	526.840,41	2.808.891,94
110	9	56,2	0,00	0,18	9,52	2,59	0,27	17,5	11,7	239.040,59	1.303.790,12	1.376.222,90	348.498,64	526.840,41	3.794.392,66
110	10	28,1	0,04	0,21	9,70	2,97	0,31	17,3	11,5	479.313,35	2.607.580,24	2.788.662,20	348.498,64	526.840,41	6.750.894,83
112	1	261	2,91	2,44	24,57	35,02	1,43	-24,7	4,6	50.518,89	275.801,76	289.731,14	1.045.495,92	-526.840,41	1.134.707,29
112	2	234,9	2,59	2,17	22,88	31,18	1,36	-17,2	5,0	56.679,73	309.232,27	325.947,53	1.045.495,92	-526.840,41	1.210.515,04
112	3	208,8	2,26	1,90	21,19	27,34	1,29	-10,5	5,3	64.072,74	351.020,42	362.163,92	871.246,60	-1.053.680,82	594.822,86
112	4	182,7	1,93	1,63	19,51	23,50	1,20	-4,4	5,8	72.697,91	401.166,19	398.380,31	871.246,60	-3.161.042,45	-1.417.551,43
112	5	156,6	1,61	1,37	17,83	19,66	1,10	0,9	6,3	85.019,59	468.027,22	470.813,10	696.997,28	16.858.893,06	18.579.750,25
112	6	130,5	1,29	1,10	16,17	15,83	0,98	5,6	7,0	102.269,94	559.961,14	579.462,27	696.997,28	2.634.202,04	4.572.892,68
112	7	104,4	0,98	0,83	14,55	11,99	0,82	9,5	7,7	128.145,47	702.040,83	724.327,84	522.747,96	1.580.521,22	3.657.783,33
112	8	78,3	0,67	0,57	12,99	8,15	0,63	12,6	8,6	171.271,35	936.054,44	977.842,59	522.747,96	1.053.680,82	3.661.597,16
112	9	52,2	0,40	0,30	11,56	4,32	0,37	15,0	9,7	257.523,11	1.404.081,67	1.484.872,08	522.747,96	1.053.680,82	4.722.905,63
112	10	26,1	0,17	0,03	10,39	0,48	0,05	16,6	10,7	516.278,39	2.808.163,33	3.005.960,55	348.498,64	526.840,41	7.205.741,32

Tabela 63: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
113	1	501	0,23	0,35	10,69	5,02	0,47	16,2	10,4	25.875,53	142.079,69	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.188.159,84
113	2	450,9	0,18	0,29	10,42	4,14	0,40	16,5	10,7	29.572,03	167.152,58	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.216.929,23
113	3	400,8	0,13	0,23	10,17	3,28	0,32	16,8	10,9	33.268,54	183.867,84	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.273.557,38
113	4	350,7	0,09	0,17	9,95	2,42	0,24	17,1	11,2	38.197,21	208.940,72	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.339.775,33
113	5	300,6	0,05	0,11	9,76	1,56	0,16	17,3	11,4	44.358,05	242.371,24	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.415.583,08
113	6	250,5	0,02	0,05	9,61	0,72	0,07	17,4	11,6	52.983,22	292.517,01	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.510.570,42
113	7	200,4	0,00	0,01	9,51	0,12	0,01	17,5	11,7	66.537,07	367.735,67	362.163,92	348.498,64	526.840,41	1.671.775,72
113	8	150,3	0,01	0,07	9,54	0,94	0,10	17,5	11,6	88.716,10	484.742,48	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.955.827,11
113	9	100,2	0,00	0,12	9,50	1,76	0,19	17,5	11,7	134.306,31	735.471,35	760.544,24	348.498,64	526.840,41	2.505.660,94
113	10	50,1	0,03	0,18	9,64	2,56	0,27	17,4	11,5	268.612,62	1.462.585,07	1.557.304,86	348.498,64	526.840,41	4.163.841,60
123	1	349	1,63	2,78	17,94	40,00	2,23	0,6	6,3	38.197,21	208.940,72	217.298,35	696.997,28	25.288.339,58	26.449.773,15
123	2	314,1	1,41	2,48	16,81	35,67	2,12	3,9	6,7	41.893,71	234.013,61	217.298,35	696.997,28	3.687.882,86	4.878.085,81
123	3	279,2	1,20	2,18	15,71	31,33	1,99	6,8	7,2	48.054,55	267.444,13	253.514,75	696.997,28	2.107.361,63	3.373.372,34
123	4	244,3	0,99	1,88	14,62	27,00	1,85	9,3	7,7	54.215,39	300.874,64	289.731,14	522.747,96	1.580.521,22	2.748.090,36
123	5	209,4	0,79	1,58	13,57	22,66	1,67	11,5	8,3	64.072,74	351.020,42	362.163,92	522.747,96	1.053.680,82	2.353.685,85
123	6	174,5	0,59	1,27	12,55	18,32	1,46	13,4	8,9	76.394,42	417.881,45	434.596,71	522.747,96	1.053.680,82	2.505.301,35
123	7	139,6	0,41	0,97	11,60	13,99	1,21	14,9	9,6	96.109,10	526.530,62	543.245,88	522.747,96	1.053.680,82	2.742.314,39
123	8	104,7	0,24	0,67	10,74	9,65	0,90	16,1	10,4	128.145,47	702.040,83	724.327,84	348.498,64	526.840,41	2.429.853,20
123	9	69,8	0,10	0,37	10,03	5,32	0,53	17,0	11,1	192.218,21	1.044.703,62	1.122.708,16	348.498,64	526.840,41	3.234.969,03
123	10	34,9	0,02	0,07	9,60	0,99	0,10	17,4	11,6	385.668,58	2.097.764,87	2.245.416,31	348.498,64	526.840,41	5.604.188,81

Tabela 64: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
125	1	350	1,50	1,02	17,28	14,72	0,85	2,5	6,5	38.197,21	208.940,72	217.298,35	696.997,28	5.795.244,49	6.956.678,05
125	2	315	1,30	0,90	16,25	12,91	0,79	5,4	6,9	41.893,71	234.013,61	217.298,35	696.997,28	2.634.202,04	3.824.405,00
125	3	280	1,11	0,77	15,24	11,10	0,73	7,9	7,4	48.054,55	267.444,13	253.514,75	696.997,28	1.580.521,22	2.846.531,93
125	4	245	0,92	0,65	14,25	9,29	0,65	10,1	7,9	54.215,39	300.874,64	289.731,14	522.747,96	1.053.680,82	2.221.249,95
125	5	210	0,74	0,52	13,31	7,49	0,56	12,0	8,4	64.072,74	351.020,42	362.163,92	522.747,96	1.053.680,82	2.353.685,85
125	6	175	0,56	0,40	12,41	5,68	0,46	13,6	9,0	76.394,42	417.881,45	434.596,71	522.747,96	1.053.680,82	2.505.301,35
125	7	140	0,40	0,27	11,57	3,87	0,33	15,0	9,6	96.109,10	526.530,62	543.245,88	522.747,96	1.053.680,82	2.742.314,39
125	8	105	0,26	0,14	10,83	2,07	0,19	16,0	10,3	128.145,47	702.040,83	724.327,84	348.498,64	526.840,41	2.429.853,20
125	9	70	0,14	0,02	10,24	0,26	0,03	16,7	10,9	192.218,21	1.044.703,62	1.122.708,16	348.498,64	526.840,41	3.234.969,03
125	10	35	0,07	0,11	9,88	1,54	0,16	17,1	11,3	384.436,42	2.089.407,24	2.245.416,31	348.498,64	526.840,41	5.594.599,02
210	1	1734	0,35	0,37	11,29	5,26	0,47	15,4	9,9	7.393,01	41.788,14	36.216,39	522.747,96	526.840,41	1.134.985,91
210	2	1560,6	0,30	0,35	11,06	5,09	0,46	15,7	10,1	8.625,18	50.145,77	36.216,39	348.498,64	526.840,41	970.326,39
210	3	1387,2	0,26	0,34	10,84	4,92	0,45	16,0	10,3	8.625,18	50.145,77	36.216,39	348.498,64	526.840,41	970.326,39
210	4	1213,8	0,22	0,33	10,63	4,75	0,45	16,3	10,5	11.089,51	66.861,03	36.216,39	348.498,64	526.840,41	989.505,98
210	5	1040,4	0,18	0,32	10,44	4,57	0,44	16,5	10,7	12.321,68	66.861,03	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.026.954,54
210	6	867	0,15	0,30	10,27	4,38	0,43	16,7	10,8	14.786,02	83.576,29	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.046.134,14
210	7	693,6	0,12	0,29	10,12	4,19	0,41	16,9	11,0	18.482,52	100.291,55	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.102.762,29
210	8	520,2	0,10	0,28	10,00	3,99	0,40	17,0	11,1	25.875,53	142.079,69	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.188.159,84
210	9	346,8	0,08	0,26	9,92	3,79	0,38	17,1	11,2	38.197,21	208.940,72	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.339.775,33
210	10	173,4	0,07	0,25	9,89	3,57	0,36	17,1	11,2	77.626,58	426.239,08	434.596,71	348.498,64	526.840,41	1.813.801,41

Tabela 65: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
211	1	1545	0,04	1,14	9,71	16,36	1,68	17,3	11,4	8.625,18	50.145,77	36.216,39	348.498,64	526.840,41	970.326,39
211	2	1390,5	0,03	1,05	9,66	15,08	1,56	17,4	11,5	8.625,18	50.145,77	36.216,39	348.498,64	526.840,41	970.326,39
211	3	1236	0,02	0,96	9,61	13,81	1,44	17,4	11,6	9.857,34	58.503,40	36.216,39	348.498,64	526.840,41	979.916,19
211	4	1081,5	0,01	0,87	9,55	12,52	1,31	17,5	11,6	12.321,68	66.861,03	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.026.954,54
211	5	927	0,00	0,78	9,51	11,24	1,18	17,5	11,7	13.553,85	75.218,66	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.036.544,34
211	6	772,5	0,02	0,69	9,58	9,94	1,04	17,5	11,6	17.250,35	100.291,55	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.065.313,73
211	7	618	0,03	0,60	9,65	8,64	0,90	17,4	11,5	20.946,86	117.006,81	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.121.941,89
211	8	463,5	0,04	0,51	9,72	7,33	0,75	17,3	11,4	28.339,86	158.794,95	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.207.339,43
211	9	309	0,06	0,42	9,79	6,01	0,61	17,2	11,4	43.125,88	234.013,61	253.514,75	348.498,64	526.840,41	1.405.993,28
211	10	154,5	0,07	0,33	9,86	4,69	0,48	17,2	11,3	86.251,76	468.027,22	507.029,49	348.498,64	526.840,41	1.936.647,52
212	1	6559	1,63	0,13	17,94	1,87	0,10	0,6	6,3	1.232,17	8.357,63	0,00	696.997,28	26.342.020,40	27.048.607,48
212	2	5903,1	1,45	0,09	17,00	1,34	0,08	3,3	6,6	1.232,17	8.357,63	0,00	696.997,28	4.214.723,26	4.921.310,34
212	3	5247,2	1,27	0,06	16,06	0,80	0,05	5,9	7,0	2.464,34	16.715,26	0,00	696.997,28	2.634.202,04	3.350.378,91
212	4	4591,3	1,09	0,02	15,14	0,27	0,02	8,1	7,4	2.464,34	16.715,26	0,00	696.997,28	1.580.521,22	2.296.698,10
212	5	3935,4	0,91	0,02	14,23	0,26	0,02	10,2	7,9	2.464,34	16.715,26	0,00	522.747,96	1.053.680,82	1.595.608,37
212	6	3279,5	0,74	0,05	13,34	0,78	0,06	12,0	8,4	3.696,50	25.072,89	0,00	522.747,96	1.053.680,82	1.605.198,17
212	7	2623,6	0,58	0,09	12,49	1,30	0,10	13,5	8,9	4.928,67	33.430,52	0,00	522.747,96	1.053.680,82	1.614.787,96
212	8	1967,7	0,42	0,13	11,67	1,82	0,16	14,8	9,6	6.160,84	33.430,52	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.652.236,52
212	9	1311,8	0,28	0,16	10,93	2,34	0,21	15,9	10,2	9.857,34	58.503,40	36.216,39	348.498,64	526.840,41	979.916,19
212	10	655,9	0,16	0,20	10,31	2,84	0,28	16,7	10,8	19.714,69	108.649,18	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.112.352,09

Tabela 66: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			Total (CCV)
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
219	1	1344	0,28	0,37	10,94	5,30	0,48	15,9	10,2	9.857,34	58.503,40	36.216,39	348.498,64	526.840,41	979.916,19
219	2	1209,6	0,25	0,31	10,80	4,41	0,41	16,0	10,3	11.089,51	66.861,03	36.216,39	348.498,64	526.840,41	989.505,98
219	3	1075,2	0,23	0,24	10,66	3,52	0,33	16,2	10,4	12.321,68	66.861,03	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.026.954,54
219	4	940,8	0,20	0,18	10,54	2,64	0,25	16,4	10,6	13.553,85	75.218,66	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.036.544,34
219	5	806,4	0,18	0,12	10,41	1,76	0,17	16,5	10,7	16.018,18	91.933,92	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.055.723,93
219	6	672	0,15	0,06	10,29	0,89	0,09	16,7	10,8	19.714,69	108.649,18	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.112.352,09
219	7	537,6	0,13	0,00	10,18	0,03	0,00	16,8	10,9	24.643,36	133.722,06	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.178.570,04
219	8	403,2	0,11	0,06	10,08	0,83	0,08	16,9	11,0	33.268,54	183.867,84	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.273.557,38
219	9	268,8	0,10	0,12	10,00	1,68	0,17	17,0	11,1	49.286,72	267.444,13	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.481.801,03
219	10	134,4	0,08	0,18	9,93	2,52	0,25	17,1	11,2	99.805,61	543.245,88	579.462,27	348.498,64	526.840,41	2.097.852,81
220	1	2070	1,16	0,60	15,50	8,66	0,56	7,2	7,2	6.160,84	33.430,52	36.216,39	696.997,28	2.107.361,63	2.880.166,66
220	2	1863	1,02	0,52	14,76	7,42	0,50	9,0	7,6	6.160,84	33.430,52	36.216,39	522.747,96	1.580.521,22	2.179.076,93
220	3	1656	0,88	0,43	14,03	6,18	0,44	10,6	8,0	7.393,01	41.788,14	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.661.826,32
220	4	1449	0,74	0,34	13,32	4,96	0,37	12,0	8,4	8.625,18	50.145,77	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.671.416,12
220	5	1242	0,61	0,26	12,64	3,73	0,30	13,2	8,8	9.857,34	58.503,40	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.681.005,91
220	6	1035	0,48	0,18	12,00	2,52	0,21	14,3	9,3	12.321,68	66.861,03	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.728.044,27
220	7	828	0,37	0,09	11,39	1,32	0,12	15,2	9,8	16.018,18	91.933,92	72.432,78	522.747,96	526.840,41	1.229.973,25
220	8	621	0,26	0,01	10,85	0,13	0,01	16,0	10,3	20.946,86	117.006,81	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.121.941,89
220	9	414	0,17	0,07	10,39	1,05	0,10	16,6	10,7	32.036,37	175.510,21	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.263.967,58
220	10	207	0,11	0,15	10,05	2,21	0,22	17,0	11,1	64.072,74	351.020,42	362.163,92	348.498,64	526.840,41	1.652.596,12

Tabela 67: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					Total (CCV)
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
221	1	1299	0,20	0,48	10,52	6,86	0,65	16,4	10,6	9.857,34	58.503,40	36.216,39	348.498,64	526.840,41	979.916,19
221	2	1169,1	0,16	0,47	10,35	6,72	0,65	16,6	10,8	11.089,51	66.861,03	36.216,39	348.498,64	526.840,41	989.505,98
221	3	1039,2	0,13	0,46	10,20	6,57	0,64	16,8	10,9	12.321,68	66.861,03	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.026.954,54
221	4	909,3	0,11	0,45	10,06	6,41	0,64	16,9	11,1	14.786,02	83.576,29	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.046.134,14
221	5	779,4	0,08	0,43	9,94	6,24	0,63	17,1	11,2	17.250,35	100.291,55	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.065.313,73
221	6	649,5	0,06	0,42	9,83	6,04	0,61	17,2	11,3	19.714,69	108.649,18	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.112.352,09
221	7	519,6	0,04	0,40	9,73	5,80	0,60	17,3	11,4	25.875,53	142.079,69	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.188.159,84
221	8	389,7	0,03	0,38	9,65	5,50	0,57	17,4	11,5	34.500,70	192.225,47	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.283.147,18
221	9	259,8	0,02	0,35	9,61	5,10	0,53	17,4	11,6	51.751,06	284.159,38	289.731,14	348.498,64	526.840,41	1.500.980,63
221	10	129,9	0,03	0,31	9,64	4,49	0,47	17,4	11,5	103.502,11	568.318,77	579.462,27	348.498,64	526.840,41	2.126.622,20
222	1	1691	0,79	0,99	13,60	14,19	1,04	11,4	8,2	7.393,01	41.788,14	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.661.826,32
222	2	1521,9	0,64	0,86	12,83	12,41	0,97	12,9	8,7	8.625,18	50.145,77	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.671.416,12
222	3	1352,8	0,50	0,74	12,09	10,63	0,88	14,2	9,2	9.857,34	58.503,40	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.681.005,91
222	4	1183,7	0,37	0,62	11,39	8,86	0,78	15,2	9,8	11.089,51	66.861,03	36.216,39	522.747,96	526.840,41	1.163.755,30
222	5	1014,6	0,24	0,49	10,73	7,09	0,66	16,1	10,4	12.321,68	66.861,03	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.026.954,54
222	6	845,5	0,12	0,37	10,14	5,33	0,53	16,9	11,0	14.786,02	83.576,29	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.046.134,14
222	7	676,4	0,03	0,25	9,63	3,57	0,37	17,4	11,5	19.714,69	108.649,18	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.112.352,09
222	8	507,3	0,05	0,13	9,74	1,83	0,19	17,3	11,4	25.875,53	142.079,69	144.865,57	348.498,64	526.840,41	1.188.159,84
222	9	338,2	0,08	0,01	9,92	0,09	0,01	17,1	11,2	39.429,38	217.298,35	217.298,35	348.498,64	526.840,41	1.349.365,13
222	10	169,1	0,05	0,11	9,78	1,64	0,17	17,3	11,4	78.858,75	434.596,71	434.596,71	348.498,64	526.840,41	1.823.391,21

Tabela 68: Resultados detalhados das simulações feitas nos segmentos válidos analisados no Capítulo 6 (continuação)

Características dos padrões de manutenção e simulação da vida útil										Custos (R\$ em 30 anos)					Total (CCV)
Seg.	Cen.	Freq. (dias)	Acelerações		Forças (t)		Nadal	VUT (anos)	VUD (anos)	Man. geométrica		Renovação			
			Vert.	Hor.	Vert.	Hor.				Socaria	lastro (12%)	Lastro (52%)	Dormente	Trilho	
223	1	1900	0,61	0,32	12,63	4,59	0,36	13,3	8,8	6.160,84	33.430,52	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.652.236,52
223	2	1710	0,53	0,31	12,22	4,50	0,37	13,9	9,1	7.393,01	41.788,14	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.661.826,32
223	3	1520	0,45	0,31	11,83	4,40	0,37	14,6	9,4	8.625,18	50.145,77	36.216,39	522.747,96	1.053.680,82	1.671.416,12
223	4	1330	0,38	0,30	11,45	4,30	0,38	15,1	9,7	9.857,34	58.503,40	36.216,39	522.747,96	526.840,41	1.154.165,51
223	5	1140	0,31	0,29	11,10	4,19	0,38	15,6	10,0	11.089,51	66.861,03	36.216,39	348.498,64	526.840,41	989.505,98
223	6	950	0,25	0,28	10,77	4,08	0,38	16,1	10,3	13.553,85	75.218,66	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.036.544,34
223	7	760	0,19	0,28	10,48	3,95	0,38	16,4	10,6	17.250,35	100.291,55	72.432,78	348.498,64	526.840,41	1.065.313,73
223	8	570	0,14	0,27	10,23	3,82	0,37	16,7	10,9	23.411,19	133.722,06	108.649,18	348.498,64	526.840,41	1.141.121,48
223	9	380	0,10	0,26	10,04	3,68	0,37	17,0	11,1	34.500,70	192.225,47	181.081,96	348.498,64	526.840,41	1.283.147,18
223	10	190	0,08	0,24	9,92	3,52	0,35	17,1	11,2	70.233,58	384.450,93	398.380,31	348.498,64	526.840,41	1.728.403,87
224	1	791	0,65	0,49	12,85	7,03	0,55	12,9	8,7	16.018,18	91.933,92	72.432,78	522.747,96	1.053.680,82	1.756.813,66
224	2	711,9	0,62	0,47	12,68	6,77	0,53	13,2	8,8	18.482,52	100.291,55	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.803.852,02
224	3	632,8	0,58	0,45	12,50	6,49	0,52	13,5	8,9	20.946,86	117.006,81	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.823.031,61
224	4	553,7	0,54	0,43	12,29	6,20	0,50	13,8	9,1	23.411,19	133.722,06	108.649,18	522.747,96	1.053.680,82	1.842.211,21
224	5	474,6	0,50	0,41	12,07	5,90	0,49	14,2	9,3	28.339,86	158.794,95	144.865,57	522.747,96	1.053.680,82	1.908.429,16
224	6	395,5	0,45	0,39	11,81	5,57	0,47	14,6	9,5	33.268,54	183.867,84	181.081,96	522.747,96	1.053.680,82	1.974.647,11
224	7	316,4	0,39	0,36	11,51	5,22	0,45	15,1	9,7	41.893,71	234.013,61	217.298,35	522.747,96	526.840,41	1.542.794,04
224	8	237,3	0,32	0,34	11,14	4,84	0,43	15,6	10,0	56.679,73	309.232,27	325.947,53	348.498,64	526.840,41	1.567.198,58
224	9	158,2	0,23	0,31	10,67	4,41	0,41	16,2	10,4	85.019,59	468.027,22	470.813,10	348.498,64	526.840,41	1.899.198,96
224	10	79,1	0,10	0,27	10,03	3,92	0,39	17,0	11,1	170.039,18	927.696,81	977.842,59	348.498,64	526.840,41	2.950.917,63