



PROCEDIMENTO PARA DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO DE VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA

Isaias Pereira Seraco

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

Orientador: Hostilio Xavier Ratton Neto

Rio de Janeiro

Abril de 2019

PROCEDIMENTO PARA DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO DE
VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA

Isaias Pereira Seraco

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

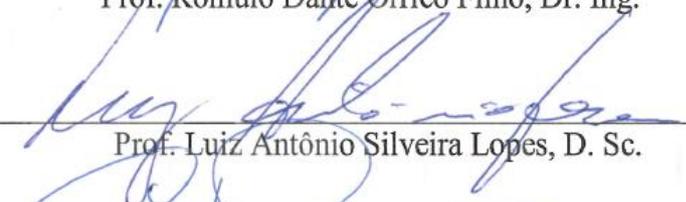
Examinada por:



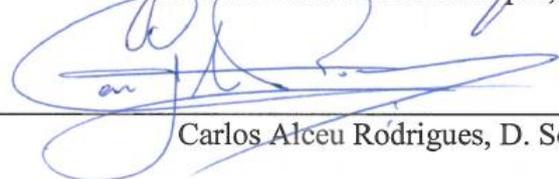
Prof. Hostilio Xavier Ratton Neto, Dr.



Prof. Romulo Dante Orrico Filho, Dr. Ing.



Prof. Luiz Antônio Silveira Lopes, D. Sc.



Carlos Alceu Rodrigues, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2019

Seraco, Isaias Pereira

Procedimento Para Definição de Políticas de
Manutenção de Via Permanente Ferroviária / Isaias
Pereira Seraco. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2019.

XII, 129 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Hostilio Xavier Rattton Neto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia de Transportes, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 121-124.

1. Planejamento de manutenções. 2. Via permanente.
3. Custos. I. Rattton Neto, Hostilio Xavier. II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE,
Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

A Deus.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

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

Ao professor Hostilio pelas valiosas orientações, atenção sempre disponível e também pelas agradáveis conversas.

Ao Sr. Carlos Alceu Rodrigues que, por meio de seus trabalhos, contribuiu de maneira substancial para a elaboração da presente pesquisa.

Ao Programa de Engenharia de Transportes – PET/COPPE/UFRJ, pelo curso de Mestrado.

Às secretárias do programa, Jane e Helena pela disponibilidade e eficiência no serviço prestado sempre com muita atenção.

Aos colegas de curso pela companhia e estímulo.

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

PROCEDIMENTO PARA DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO DE VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA

Isaias Pereira Seraco

Abril/2019

Orientador: Hostilio Xavier Rattton Neto

Programa: Engenharia de Transportes

O procedimento desenvolvido e apresentado neste trabalho destina-se ao planejamento de manutenções na via permanente ferroviária, cujo principal objetivo é estabelecer a frequência com que os serviços devem ser realizados para que, a longo prazo, os correspondentes custos sejam os menores possíveis. O fundamento básico sobre o qual se assenta o seu desenvolvimento é o estudo do comportamento que os custos de manutenção geométrica e de renovações adquirem em diversas conformações administrativas, explorando, para tanto, a relação de interferência que a condição geométrica da via possui sobre o ritmo com que os seus componentes se degradam. O método proposto analisa como diversas distribuições de processos de manutenção, ao longo da vida útil de um trecho ferroviário, impactam no custo final do ciclo de vida da via permanente, possibilitando dessa forma definir o arranjo dos serviços que representa a política de manutenção de menor custo. Esse procedimento configura-se como uma ferramenta de apoio ao planejamento de longo prazo, visando oferecer aos gestores os subsídios necessários para a correta programação das manutenções segundo as prerrogativas de desempenho e segurança preconizadas. Sua utilização é aplicável a qualquer ferrovia e conformação de via permanente.

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

PROCEDURE FOR DEFINITION OF RAILWAY TRACK MAINTENANCE
POLICIES

Isaias Pereira Seraco

April/2019

Advisor: Hostilio Xavier Ratton Neto

Department: Transportation Engineering

This work proposes a procedure for the definition of railroad track maintenance policies or programs, having as main objective to establish the frequency with which services must be performed so that the corresponding costs are the lowest possible in the long term. The development of this work is based on the study of the behavior that costs of both geometric maintenance and track renewal acquire in various configurations of maintenance programs, by exploring the interference relation that the track geometric condition has on the rate at which its components degrade. The proposed method analyzes how several distributions of maintenance processes, along the useful life of a railway segment, impact on the track lifecycle cost, making it suitable to define the service arrangement that represents lowest-cost maintenance policy. This procedure is a tool to support the long-term planning, aiming to provide managers with the necessary subsidies for the correct programming of maintenances according to the prerogatives of performance and safety. Its use is applicable to any railway and permanent way configuration.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo da Dissertação.....	5
1.2 Justificativa.....	6
1.3 Organização do Trabalho.....	8
2. VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA	10
2.1 A Degradação da Via Permanente Ferroviária	13
2.2 Inspeção da Via Permanente	17
2.3 A Manutenção da Via Permanente Ferroviária	20
3. PLANEJAMENTO PARA DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO MAIS EFICIENTES.....	26
3.1 Estimação da Degradação da Via Permanente: Geometria	27
3.2 Estimação da Degradação da Via Permanente: Desgaste das Estruturas	36
3.3 Tolerâncias de Desgaste Para Parâmetros Geométricos.....	42
3.4 Custos de Manutenção Geométrica e Estrutural.....	44
3.5 Análise do Referencial e Conclusão Pela Proposição do Método de Definição de Políticas de Manutenção Mais Econômicas	47
4. PROCEDIMENTO PARA DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO MAIS ECONÔMICAS.....	53
4.1 Estimativa da Taxa de Degradação Geométrica e do Período Máximo Entre Manutenções.....	53
4.1.1 Item 1: organização dos dados de inspeção.....	55
4.1.2 Item 2: cálculo da condição da via permanente.....	57
4.1.3 Item 3: estimativa da recuperação da qualidade da via pelos serviços de manutenção.....	60
4.1.4 Item 4: definição da taxa de desgaste e do ciclo de manutenção máximo	63
4.2 Definição da Vida Útil Padrão dos Componentes da Via Permanente.....	66

4.3	Quantificação do Aumento da Vida Útil dos Componentes Segundo a Diminuição dos Intervalos de Correção Geométrica.....	67
4.4	Estimativa dos Custos de Realização dos Serviços de Manutenção na Via Permanente	70
4.5	Determinação do Ciclo de Correção Geométrica Mais Econômico.....	76
5.	APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO	78
5.1	Aspectos Gerais e Características do Trecho Ferroviário Estudado.....	78
5.2	Estimativa da Taxa de Degradação Geométrica e do Período Máximo Entre Manutenções.....	81
5.2.1	Item 1: organização dos dados de inspeção.....	82
5.2.2	Item 2: cálculo da condição da via permanente.....	85
5.2.3	Item 3: estimativa da recuperação da qualidade da via pelos serviços de manutenção.....	86
5.2.4	Item 4: definição da taxa de desgaste e do ciclo de manutenção máximo	87
5.3	Definição da Vida Útil Padrão dos Componentes na Via Permanente.....	92
5.4	Quantificação do Aumento da Vida Útil dos Componentes Segundo a Diminuição dos Intervalos de Correção Geométrica.....	94
5.5	Estimativa de Custos de Realização dos Serviços de Manutenção da Via Permanente	96
5.6	Determinação do Ciclo de Correção Geométrica Mais Econômico.....	103
5.7	Resumo dos Resultados	110
6.	CONCLUSÃO.....	114
6.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	119
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	ANEXO I.....	125
	ANEXO II	129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Dinâmica de degradação da via permanente ferroviária com destaque para as intervenções de manutenção.....	2
Figura 1.2: Comportamento teórico dos custos de manutenção geométrica e estrutural em função da frequência de manutenções geométricas.....	4
Figura 1.3: Custo do ciclo de vida para manutenções na via permanente para diversos padrões de frequência de conservas geométricas	5
Figura 2.1: Componentes e disposição típica de uma via permanente ferroviária	10
Figura 2.2: Bitola de uma via férrea com destaque para o ponto de sua medição	14
Figura 2.3: Representação do nivelamento de uma via permanente	14
Figura 2.4: Esquema de medição do nivelamento transversal da via.....	15
Figura 2.5: Alinhamento de uma via ferroviária	16
Figura 2.6: Ilustração do método de determinação do empeno em uma via permanente	16
Figura 2.7: Superelevação em uma curva.....	17
Figura 2.8: Rodeiro instrumentado	19
Figura 2.9: Exemplo de relatório gráfico de uma inspeção geométrica realizada por carro controle.....	19
Figura 2.10: Comportamento típico das degradações e das atividades de manutenção em uma via permanente.....	22
Figura 2.11: Ciclo de conserva cíclica.....	24
Figura 4.1: Base de elevação, também conhecida como banca de socaria, e dinâmica de aplicação das forças em equipamentos de correção geométrica.....	62
Figura 4.2: Processo de socaria de lastro abaixo dos dormentes.....	62
Figura 6.1: Comportamento dos custos de manutenção geométrica e de renovação para a via 1 da linha tronco da EFVM obtidos pela aplicação do procedimento.....	116
Figura 6.2: CCV para via permanente da via 1 da linha tronco da EFVM estimado pela aplicação do procedimento	117
Figura 6.3: Comportamento das curvas de custo de manutenção, com destaque para a curva de renovações mais próxima ao previsto em teoria	118

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1: Limites de J segundo as velocidades autorizadas.....	30
Tabela 3.2: Fatores Ki estabelecidos pela B&O	31
Tabela 3.3: Vida útil dos acessórios de fixação	42
Tabela 3.4: Tolerâncias dimensionais para desvios geométricos em função da classe da ferrovia.....	42
Tabela 3.5: Tolerâncias ao empeno para vagões críticos na EFVM	44
Tabela 4.1: Exemplo de organização de dados de uma inspeção geométrica	55
Tabela 5.1: Linhas principais da EFVM no ano 2000.....	78
Tabela 5.2: Vidas úteis dos serviços e componentes da via permanente na EFVM.....	80
Tabela 5.3: Despesas com manutenção na EFVM em 1996	80
Tabela 5.4: Data de realização das inspeções geométricas disponíveis	81
Tabela 5.5: Volume acumulado de tráfego na via 1	82
Tabela 5.6: Volume acumulado de tráfego na via 2.....	82
Tabela 5.7: Exemplo de conformação do banco de dados após conversão dos arquivos de texto	83
Tabela 5.8: Trechos selecionados na via 1	84
Tabela 5.9: Trechos selecionados na via 2	84
Tabela 5.10: Resultado da condição geométrica da via 1 na primeira e última inspeções da série disponível	86
Tabela 5.11: Trechos selecionados para estimativa da capacidade de recuperação da via	86
Tabela 5.12: Recuperação da via para o trecho do km 65 via 1	87
Tabela 5.13: Proporção final de recuperação da via pelos serviços de manutenção geométrica	87
Tabela 5.14: Tolerâncias geométricas para ferrovia classe 3 (25 – 64 km/h) e desvios geométricos remanescentes após conserva geométrica.....	88
Tabela 5.15: Ciclos de manutenção para a via 1 sem divisão	89
Tabela 5.16: Ciclos de manutenção para a via 1 dividida em curva e tangente	89
Tabela 5.17: Ciclos de manutenção para as curvas na via 1	89
Tabela 5.18: Ciclos de manutenção para a via 2 sem divisão	90
Tabela 5.19: Ciclos de manutenção para a via 2 dividida em curva e tangente	90
Tabela 5.20: Ciclos de manutenção para as curvas na via 2	91

Tabela 5.21: Vidas úteis estimadas para os demais componentes.....	94
Tabela 5.22: Cálculo de RT e RC para a via 1	95
Tabela 5.23: Cálculo de RT e RC para a via 2	95
Tabela 5.24: Custo unitário para serviços de correção geométrica	98
Tabela 5.25: Custo unitário para serviços de descarga complementar de lastro	98
Tabela 5.26: Custo unitário de assentamento de trilhos	99
Tabela 5.27: Custo unitário de solda em trilhos	100
Tabela 5.28: Custo unitário para instalação de dormentes	101
Tabela 5.29: Custo unitário para descarga de lastro na via permanente.....	101
Tabela 5.30: Resultados detalhados obtidos pela análise da variação dos ciclos de conserva geométrica para a via 1 tomada como homogênea com renovação conjunta dos componentes	105
Tabela 5.31: Resultados detalhados obtidos pela análise da variação dos ciclos de conserva geométrica para a via 1 tomada como homogênea com renovação independente dos componentes	106
Tabela 5.32: Ciclos de conserva geométrica mais econômicos para a via 2 tomada como homogênea para ambos os tipos de renovação	107
Tabela 5.33: Ciclos de conserva geométrica mais econômicos para as vias 1 e 2 tendo seus trechos de mesma planimetria agrupados	107
Tabela 5.34: Ciclos de conserva geométrica mais econômicos para as curvas do trecho da via 1	108
Tabela 5.35: Ciclos de conserva geométrica mais econômicos para as curvas do trecho da via 2	109

1. INTRODUÇÃO

A produtividade do transporte ferroviário depende em grande medida das decisões tomadas em relação à operação do transporte e as condições da linha férrea. Quanto à operação, a produtividade advém de um adequado material rodante, mantido em boas condições e cujo tráfego foi programado em vistas a proporcionar eficiência e maximização do uso da capacidade da via. E, no que diz respeito à linha, o desempenho é definido por primeiro pelo projeto do trecho, pelas características dos componentes utilizados em sua construção, e, posteriormente quando de sua operação, da capacidade de se manter a linha disponível e em boas condições.

No que se refere especificamente à linha ferroviária, é sabido que sua construção demanda investimentos vultosos e que uma vez construída modifica-la no que se refere ao projeto inicial é praticamente inviável. Nesse sentido, a garantia de desempenho de um trecho ferroviário estará ligada diretamente a condição em que se encontra a via permanente, logo, ao volume e a qualidade dos serviços de manutenção de suas estruturas. Assim, quanto maior for a requisição por produtividade de uma ferrovia, maior será a necessidade de mantê-la em condições estruturais adequadas, demandando necessariamente investimentos em manutenção da via.

De maneira simplificada, duas são as principais funções da via permanente: a de guiar os veículos e a de suportá-los. O termo “suportar” é empregado aqui com o sentido de sustentar os veículos, sustentação essa realizada pelos diversos componentes dos quais a via é formada, cujas características desse modo de transporte normalmente requerem que sejam robustos de maneira a suportarem as elevadas solicitações estruturais a que estão submetidos. Guia-los, refere-se à capacidade de “dirigir” os veículos, e para tanto, a via como um todo, deve possuir uma geometria específica, ou seja, os componentes devem estar arrançados espacialmente de maneira que permitam que as composições ferroviárias superem os perfis planimétricos e altimétricos, em outras palavras, curvas e tangentes, rampas e declives, com segurança e eficiência.

Fruto do tráfego, ambas características da via se degradam. Os componentes estão expostos à fadiga de suas estruturas pela repetição das cargas, e também ao desgaste físico de suas superfícies. E o perfil da via também se desvia de sua posição adequada,

perdendo então a geometria específica. Tais degradações ocorrem de maneira concomitante, requerendo manutenções específicas: geométricas e estruturais.

As manutenções geométricas objetivam recolocar os componentes em suas posições ideais de modo a permitir o tráfego dentro do previsto. Já as manutenções estruturais objetivam substituir esses componentes quando o desgaste ou fadiga alcançam um patamar capaz de oferecer risco a segurança ou desempenho do tráfego. Esses serviços são realizados com frequências distintas, ocorrendo normalmente várias correções geométricas no intervalo entre duas manutenções estruturais, como ilustrado na Figura 1.1.

O que dita a frequência de realização de cada uma dessas manutenções é o ritmo de degradação das estruturas e as premissas administrativas adotadas pela empresa ferroviária. Ferrovias cujos objetivos de desempenho são elevados requerem velocidades operacionais maiores, e nessas circunstâncias, menores tendem a ser as tolerâncias aos desvios e desgastes das estruturas, requerendo assim, manutenções mais constantes.

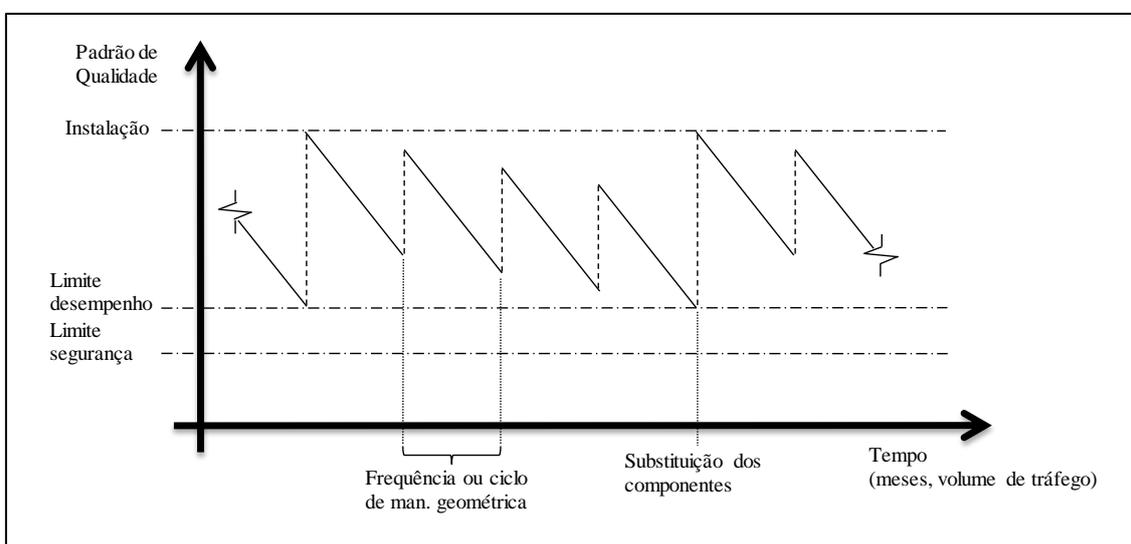


Figura 1.1: Dinâmica de degradação da via permanente ferroviária com destaque para as intervenções de manutenção

A administração das manutenções precisa conciliar demandas que vão desde a necessidade de se manter o tráfego seguro com desempenho adequado, até restrições financeiras no que se refere ao próprio volume das atividades, já que manutenções mais

frequentes são mais numerosas, logo, mais dispendiosas para a empresa, o que impacta diretamente no lucro final que teoricamente seria maior com um maior desempenho.

Por trás desse binômio financeiro que equaciona lucro fruto do maior desempenho e custo para manter tal desempenho, existe ainda uma relação técnica entre os dois processos de manutenção, cuja compreensão repercute diretamente na determinação final do modelo administrativo das manutenções.

Diversos autores – Ratton Neto (1985), Rodrigues (2001), Silva (2002), Guler *et al.* (2011) – destacam a existência de uma forte relação de interferência entre manutenções geométricas e estruturais que pode ser descrita pelo aumento do desgaste físico das estruturas quanto maiores forem os desvios geométricos. Tal relação pode ser mais bem compreendida quando se analisa a distribuição das forças resultantes do tráfego, de modo que quando a via está com sua geometria mais regular, próxima do padrão estabelecido em projeto, as forças sobre as estruturas resultantes da passagem dos trens serão mais bem distribuídas. Em contrapartida, ao se permitir alterações geométricas maiores, tais forças se distribuirão de maneira mais irregular, elevando as solicitações estruturais sobre os componentes, e, em última instância, repercutindo em uma taxa de desgaste das estruturas maior (RATTON NETO, 1985).

Sob o olhar do Custo do Ciclo de Vida (CCV) da via permanente, ou seja, a soma de todos os custos com manutenções ao longo do tempo em que os componentes estão instalados na linha, esse vínculo entre os serviços de manutenção adquire maior relevância já que, ao se assumir padrões administrativos com correções geométricas em frequência mais elevada, partindo-se do pressuposto que o tempo de utilização dos materiais na linha será maior, têm-se um CCV elevado em decorrência do elevado número de conservas geométricas. Em compensação, à medida que se assume tolerâncias ao desvio geométrico mais brandas, repercutindo dessa maneira em ciclos de correção mais espaçados e menos numerosos, assume-se que a substituição dos componentes será antecipada em alguma medida, e, como este processo responde por um expressivo custo para realização, também nessa configuração o CCV será elevado. Essa dinâmica de combinação entre o montante de atividades de manutenção e os seus correspondentes custos pode ser ilustrada como apresentado na Figura 1.2.

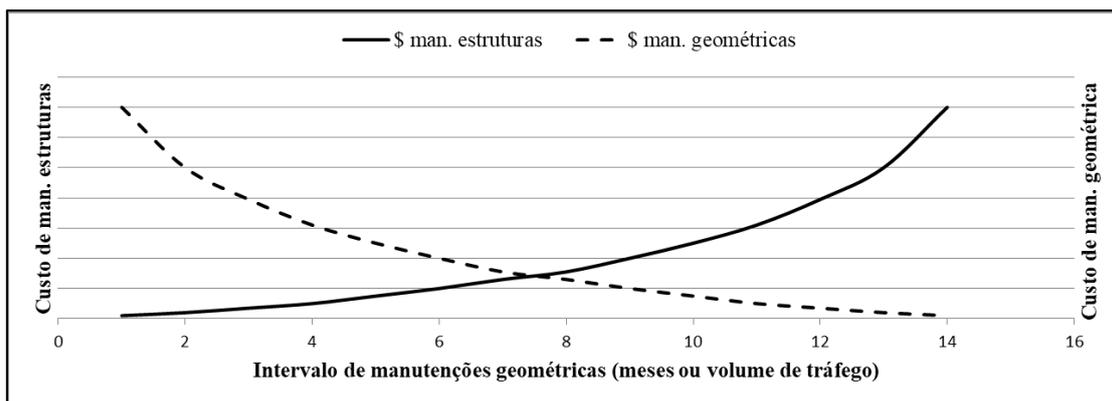


Figura 1.2: Comportamento teórico dos custos de manutenção geométrica e estrutural em função da frequência de manutenções geométricas

Desse modo, ao se definir uma política de manutenção que determinará o momento e o volume das intervenções de manutenção, deve-se buscar um equilíbrio entre o volume dessas duas atividades, de maneira que em um planejamento de longo prazo o CCV da via seja o menor possível mesmo atendendo as prerrogativas de desempenho e segurança preconizadas pela ferrovia. Em termos práticos, essa política deverá definir a frequência com que as manutenções geométricas serão realizadas de maneira a prolongar ao máximo o tempo de uso dos componentes na via, sem que as próprias conservas geométricas se tornem tão frequentes ao ponto dos seus respectivos custos elevarem o CCV, em outras palavras, encontrar o ciclo de manutenção geométrica que gere o mínimo custo do CCV, como ilustrado na Figura 1.3.

Frente a esse contexto, é crucial para os gestores de infraestrutura estabelecer uma sistemática de análise que proporcione uma administração das manutenções de tal maneira eficiente que leve a utilização dos ativos ao máximo, com o estabelecimento da frequência de manutenção geométrica que proporcione o menor custo total com manutenções para o trecho ferroviário.

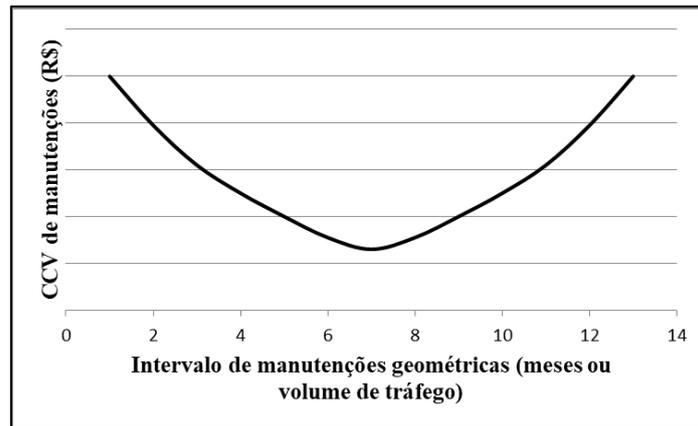


Figura 1.3: Custo do ciclo de vida para manutenções na via permanente para diversos padrões de frequência de conservas geométricas

Nesse tocante, sob esse olhar financeiro, a necessidade de ferramentas capazes de analisar como diferentes padrões de manutenções geométricas repercutem nos ciclos de manutenção estrutural, e que ainda sejam capazes de analisar essa questão a partir do comportamento dos respectivos custos, é premente e fundamental para a escolha da política de manutenções adequada à realidade da companhia ferroviária. Todavia, essa análise requer uma compreensão suficientemente capaz de avaliar como manutenções geométricas em diferentes padrões de periodicidade adiam ou antecipam a necessidade de substituição dos componentes da via, logo, a frequência das manutenções estruturais.

1.1 Objetivo da Dissertação

A relação de interferência entre a condição geométrica da via permanente e o ritmo com que os seus componentes se degradam fisicamente, bem como o impacto dessa característica sobre o planejamento das manutenções, forma, portanto, o contexto que motivou o desenvolvimento desta dissertação que teve como principal objetivo desenvolver um procedimento capaz de determinar a política de manutenção de menor custo para a via permanente ferroviária por meio da análise do impacto que a frequência dos serviços de manutenção geométrica possui sobre o tempo de uso dos componentes da via.

Esta análise centrou-se no estudo da relação entre os ciclos de correção geométrica e a frequência com que os componentes da via precisam ser substituídos, a partir da qual se buscou identificar o referido ponto de menor CCV que configura-se como o melhor

momento em que as manutenções geométricas devem ser realizadas. É importante destacar que neste procedimento as prerrogativas de desempenho e segurança preconizadas sempre foram respeitadas.

Para se chegar a tal objetivo, o procedimento se assenta na premissa básica de que a condição da geometria da via permanente tem impacto direto sobre o ritmo de degradação dos componentes, e, sendo assim, diferentes frequências de manutenções geométricas repercutiriam em diferentes taxas de degradação dos componentes. Desse modo, modelando adequadamente essa relação, seria possível calcular os custos totais de longo prazo com manutenção em diversos padrões administrativos, permitindo então escolher aquele de menor valor que representará, portanto, a política de manutenção mais econômica a ser adotada.

Para se chegar ao objetivo final foi preciso estabelecer um meio eficiente de estimar a degradação da geometria da via em qualquer momento em função de uma variável explicativa; estabelecer uma sistemática de determinação do tempo de uso dos componentes na via para o padrão de conserva geométrica vigente; e desenvolver um método de determinação dos custos de realização das manutenções geométricas e estruturais.

O procedimento ora proposto tem caráter empírico, sendo baseado em grande medida nas informações de inspeções geométricas e de serviços de manutenção realizados na ferrovia em que foi aplicado.

1.2 Justificativa

A definição de meios mais eficientes de se administrar a manutenção da via permanente ferroviária, principalmente no que diz respeito à diminuição dos gastos com esses serviços, tem sido tema recorrente em estudos desenvolvidos, tanto pelo meio acadêmico quanto por iniciativa das próprias companhias ferroviárias. Tradicionalmente, a gestão dessas manutenções é feita a partir de um enfoque preventivo, fato compreensível dada a severidade e prejuízos dos acidentes ferroviários.

Entretanto, mais recentemente, têm surgido estudos buscando maneiras de prorrogar ao máximo os serviços de correção geométrica, com foco claro em economia de custos por meio da redução de intervenções. Desse modo, a questão passa a receber um enfoque mais preditivo no sentido de estabelecer sistemáticas capazes de estimar com precisão a evolução dos desgastes e assim determinar o momento exato da intervenção antes que sejam extrapolados limites de degradação que comprometam a segurança. Tal modelo de análise pode viabilizar certo grau de economia em um horizonte administrativo de curto prazo, ou mesmo se justifique ao se desconsiderar a relação de interferência descrita anteriormente, partindo-se do pressuposto que a condição da geometria em nada impacta na vida útil dos materiais na via.

Em contrapartida, outros trabalhos chegam até a mencionar tal relação, como em Rodrigues (2001), mas não se debruçam sobre estudos mais aprofundados sobre tal. Dessa forma, apesar de se ter certa clareza quanto à influência do estado da degradação geométrica na taxa de desgaste estrutural dos materiais, não foram identificados até a ocasião do desenvolvimento desta dissertação, trabalhos que investigassem mais a fundo tal relação, muito menos que se propusessem a medi-la e formular um procedimento para administra-la de maneira conveniente quanto aos respectivos custos.

Delineou-se, dessa forma, importante oportunidade de pesquisa, seja pela contribuição acadêmica, seja pela possibilidade prática de desenvolvimento de uma ferramenta útil ao setor ferroviário. Ainda em termos pragmáticos, no que diz respeito ao setor ferroviário, as mudanças gerenciais pelas quais esse modo de transporte tem passado, como a separação em empresas diferentes da operação do transporte e da gestão da infraestrutura, têm criado demandas por ferramentas de análise de custos para a gestão das políticas de manutenção.

No Brasil, o incremento do volume de cargas transportadas pelas ferrovias após o processo de privatização também requer que as companhias sejam capazes de gerir adequadamente os custos relativos aos processos de manutenção, sob a pena de comprometerem o seu próprio equilíbrio financeiro, seja em função de elevados gastos financeiros com a realização dos procedimentos, seja pela redução do desempenho por manutenções subdimensionadas.

Nesse contexto, as empresas ferroviárias buscam ferramentas que sejam capazes de fornecer informações que possibilitem a tomada de decisão com uma visão de longo prazo, mitigando custos e ao mesmo tempo garantindo o desempenho.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho é composto por seis Capítulos, sendo o primeiro deles esta introdução, as Referências Bibliográficas, e dois Anexos.

No segundo Capítulo é apresentada a revisão bibliográfica realizada com o intuito de levantar os principais conceitos sobre o tema. Inicialmente foram definidas as principais características da via permanente no que se refere aos seus componentes e a geometria. Posteriormente, foi explorada a dinâmica de degradação, as maneiras de verificar o estado da via, bem como os arranjos típicos de manutenção.

Avançando no tema, no terceiro Capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre estudos mais ligados à problemática apresentada, investigando métodos desenvolvidos para o planejamento das manutenções, bem como quais são os principais aspectos que precisam ser observados em trabalhos que se dedicam a objetivos semelhantes. Dessa forma, foi levantada uma base referencial robusta, composta de trabalhos voltados ao planejamento das manutenções na via permanente, com o intuito de conhecer e assimilar suas formulações e formas de tratar a questão. Por fim, é feita uma análise crítica desse referencial, destacando conclusões pertinentes quanto ao modelo proposto neste trabalho.

No quarto Capítulo é apresentado o procedimento elaborado para a determinação de políticas de manutenção mais econômicas. Este procedimento é composto por cinco etapas principais, sendo as quatro primeiras destinadas a compor o banco de informações que deram suporte à quinta etapa, na qual foi determinada a frequência das correções geométricas para que se obtenha o menor CCV com manutenções.

No quinto Capítulo é feita uma aplicação do procedimento proposto, a partir do uso de dados advindos da Estrada de Ferro Vitória a Minas. Este Capítulo se desenvolve por sete subseções, culminando, ao fim, na determinação do ciclo de correção geométrica

ideal para a ferrovia em estudo segundo o previsto pelo modelo. Esta aplicação tem por objetivo ilustrar a utilização do método proposto, bem como sanar possíveis dúvidas quanto aos detalhes do procedimento, como definir aperfeiçoamentos e correções, além da identificação de oportunidades de outros aprimoramentos futuros, quando não enquadrados pelo escopo deste trabalho.

No sexto Capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho no que se refere ao procedimento proposto e sobre a aplicação realizada. Também são feitas propostas de estudos futuros, tanto para o aprimoramento do procedimento, quanto para o desenvolvimento de pesquisas em seguimentos nessa mesma linha.

No Anexo I estão presentes as tabelas para determinação de fatores a serem utilizados nas equações apresentadas no Capítulo 3.2.

O Anexo II é composto por um CD com os dados das oito inspeções geométricas utilizadas na aplicação do procedimento, bem como o cadastro de via e de manutenções realizadas no trecho analisado.

2. VIA PERMANENTE FERROVIÁRIA

As estruturas que compõem a via permanente podem ser classificadas em dois grupos (STEFFLER, 2013):

- Infraestrutura: composta por todo o conjunto de obras de terraplanagem e de arte (túneis, viadutos e pontes), servindo de suporte à superestrutura, além de garantir a drenagem, o gabarito e a transposição do relevo acidentado;
- Superestrutura: apoiada sobre a infraestrutura, é a responsável por captar as cargas transmitidas pelas rodas ferroviárias, distribuí-las pelas estruturas que a formam, e transmiti-las de maneira uniforme para a plataforma de maneira a dissipá-las.

Os principais componentes da superestrutura são: trilhos, dormentes, acessórios de fixação, e lastro. A disposição destes itens é ilustrada na Figura 2.1.

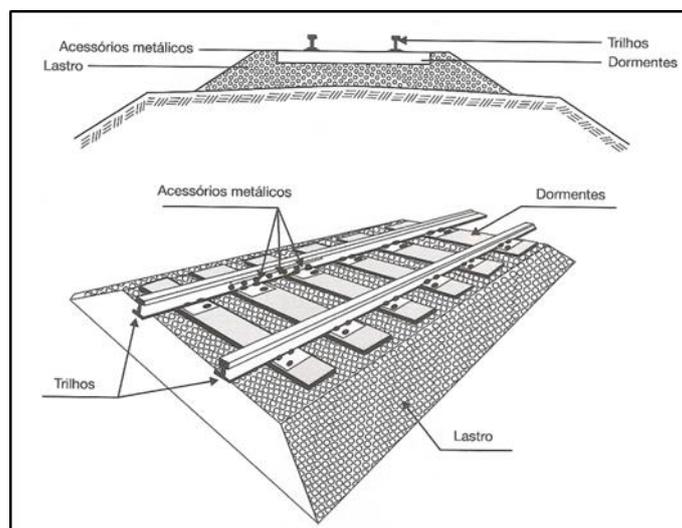


Figura 2.1: Componentes e disposição típica de uma via permanente ferroviária

Fonte: Steffler (2013).

Também são essenciais e constituem outro importante componente da via, os aparelhos de mudança de via – AMV, responsáveis pelo desvio do tráfego entre diferentes vias.

O perfil ilustrado é chamado de via elástica, ou lastrada, sendo o mais comum, empregado largamente nas ferrovias comerciais em todo o mundo. Existem, contudo,

outras conformações, como vias que não possuem lastro, tendo dormentes e trilhos assentados sobre lajes de concreto. Este tipo de via é conhecida como via rígida, vista com mais frequência em sistemas metroviários. Em outra variante da via rígida, vigas de concreto contínuas e longitudinalmente dispostas são a principal estrutura sobre a qual os trilhos são diretamente assentados.

De maneira geral, a disposição dos componentes na via é bastante lógica e permite que exista estabilidade, manutenibilidade e segurança (STEFFLER, 2013). O trilho, como viga principal de sustentação longitudinal e apoio às rodas, constitui a superfície de rolamento responsável por suportar o tráfego dos veículos, guia-los, e receber diretamente todos os esforços resultantes da passagem das composições, transmitindo-os aos dormentes. Nos segmentos em tangente, os trilhos são principalmente solicitados no sentido vertical, fruto do 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 e recebe esforços no sentido transversal a via (PAIVA, 2016).

Transversalmente dispostos e suportando os trilhos estão os dormentes, que transmitem os esforços do tráfego para o lastro, proporcionando um suporte adequadamente rígido, sem, contudo, comprometer a elasticidade necessária. Possuem dimensões padronizadas em função da bitola (espaçamento entre os trilhos), do local onde estão instalados, como pontes e AMVs, e também do material que os compõem (madeira, de lei ou tratada; concreto; aço; ou, plástico).

Além da sustentação, os dormentes se opõem aos esforços transversais e longitudinais da via, impedindo o caminhamento das estruturas nessas direções; garantem certa regularidade na geometria da via, bem como permitem a facilidade de nivelamento das estruturas (COIMBRA, 2008).

A dimensão dos dormentes permite que o ajuste da fixação ligada a eles seja suficiente para resistir aos esforços, e quanto às fixações, também chamadas de acessórios de fixação, são um conjunto de peças acessórias destinadas a fixar os trilhos aos dormentes, garantindo as características técnicas da bitola. Podem ser classificadas como rígidas, quando o trilho é preso ao dormente de maneira rígida, tolerando apenas que os trilhos se movimentem no sentido longitudinal da via; e, elástica, quando fixam o

trilho de maneira a possibilitar movimentos mínimos e restritos que proporcionam uma diminuição das tensões e vibrações decorrentes do tráfego, bem como oferecem resistência à movimentação longitudinal dos trilhos (RODRIGUES, 2001).

Estão sujeitas às cargas verticais e forças laterais no sentido transversal à via decorrentes do material rodante, além de esforços para o alargamento da bitola, e forças longitudinais de escorregamento do trilho, oferecendo dessa forma, resistência a tais deslocamentos.

Finalmente o lastro, camada composta por material granular que sustenta os dormentes, trilhos e fixações. Na maioria das vezes é constituído de pedra britada de material rochoso específico e em uma granulometria adequada para esse emprego. Além de suporte, suas funções são prover uma drenagem adequada das águas superficiais; dissipar as cargas oriundas dos trilhos e dormentes de maneira suave sem danificar a plataforma; e conter os esforços longitudinais e transversais dos trilhos, fornecendo assim uma ancoragem adequada para os dormentes. Assim, trilhos, dormentes e fixações constituem um conjunto ancorado no lastro que resiste solidariamente aos esforços do tráfego.

Para se referir à superestrutura, normalmente usam-se os termos “grade”, em função do aspecto que trilhos e dormentes adquirem após instalados, assemelhando-se a uma grade; via permanente; ou simplesmente “via”, mesmo sabendo, no caso desses dois últimos, que o conceito técnico de via permanente engloba a super e a infraestrutura. Dessa forma, ao longo desse trabalho, quando mencionado algum desses três termos se estará fazendo referência apenas aos itens e às características da superestrutura.

Ao se desenvolver um procedimento de gestão para a manutenção da via permanente ferroviária, como aquele ora proposto, deve-se lançar atenção sobre a dinâmica de degradação de cada um desses itens, seja ela física, própria de suas estruturas; seja ela geométrica. Assim, visando melhor embasar a temática, faz-se na subsequente seção a apresentação da dinâmica de degradação da via permanente.

2.1 A Degradação da Via Permanente Ferroviária

A degradação que se desenvolve nas estruturas da via permanente é função da intensidade do transporte, fazendo-se sentir tão mais elevada quanto maiores forem as velocidades, a frequência e o peso por eixo adotado, bem como quanto mais severas forem as condições ambientais as quais as estruturas estiverem expostas.

Além destes itens, Rodrigues (1984) ainda destaca que a degradação é fortemente influenciada pelas características dos materiais de que são feitos os componentes, e também das características da infraestrutura da via no que se refere principalmente às condições de drenagem e ao projeto planimétrico e altimétrico.

Como previamente apresentado no Capítulo introdutório, duas são as famílias de degradações a que a via está sujeita. No que diz respeito às físicas, está fortemente associado o conceito de vida útil dos materiais. Deve-se entender vida útil nesse contexto, contudo, não como o uso a exaustão ou a quebra dos itens, mas sim o tempo em que estes estarão à disposição para uso na via de maneira segura. Nesse quesito, a vida útil de uma infraestrutura pode ser determinada pelo nível de desgaste ou pela taxa de fadiga, sendo que a fadiga na via permanente se deve principalmente à ruptura progressiva do material fruto do ciclo repetitivo das tensões oriundas da passagem dos eixos ferroviários, o que, quando não detectado e removido, pode levar a quebras de componentes. Enquanto que o desgaste deve-se à perda de material dos componentes por abrasão, sendo os mais comuns o verificado na lateral do boleto dos trilhos (região superior do trilho em contato com as rodas dos veículos), e no lastro, cujas partículas vão se fraturando progressivamente, perdendo a granulometria ideal e sendo preenchido por finos resultantes do processo de abrasão.

Quanto à degradação geométrica, seu desenvolvimento é simultâneo ao desgaste físico. A geometria pode ser descrita por meio dos parâmetros bitola, nivelamento longitudinal, nivelamento transversal, alinhamento, empeno e superelevação. As características de cada um deles além das respectivas degradações são apresentadas a seguir:

- Bitola: pode ser descrita como a distância entre as faces internas dos trilhos, medida a alguns milímetros (entre 12 mm e 16 mm) abaixo de suas faces superiores. A Figura 2.2 ilustra esse parâmetro.

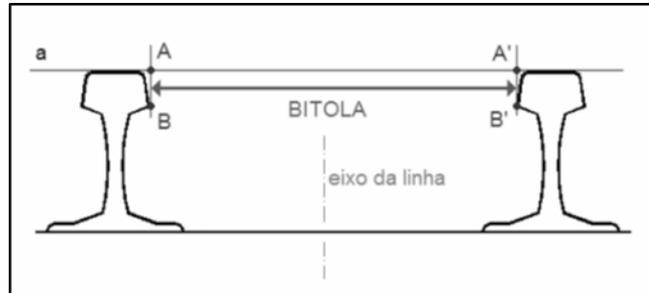


Figura 2.2: Bitola de uma via férrea com destaque para o ponto de sua medição

Quanto às anomalias, podem ser de dois tipos: alargamento de bitola, quando a distância entre os trilhos excede a tolerância máxima permitida, causada entre outros, pela degradação dos dormentes e da fixação, desgaste do boleto dos trilhos, e problemas nas talas de junção; e, estreitamento de bitola, quando a medida entre os trilhos é menor do que o limite mínimo, ocorrendo em trechos cujos dormentes possuem defeitos como empenamento, ou então em trilhos deformados e quando existem placas de apoio quebradas;

- Nivelamento longitudinal: medido em ambos os trilhos (direito e esquerdo), consiste em comparar o nivelamento da via férrea em relação ao seu plano horizontal original medindo a deformação vertical (y) de um ponto qualquer (C) na superfície de rolamento de um trilho em relação ao segmento de reta (AB), conforme ilustrado na Figura 2.3.

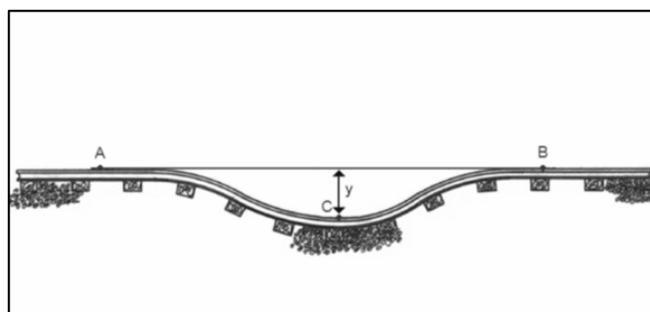


Figura 2.3: Representação do nivelamento de uma via permanente

O desnivelamento longitudinal é considerado quando o valor de (y) ultrapassa os limites de tolerância estabelecidos, sendo ocasionado normalmente por problemas de drenagem, grupo de dormentes defeituosos e juntas desniveladas. Essas irregularidades são responsáveis principalmente pela ocorrência do movimento de galope nos veículos em movimento;

- Nivelamento transversal: consiste em comparar o nivelamento da superfície de rolamento de um trilho em relação ao outro trilho medindo a deformação vertical (y) conforme é ilustrado na Figura 2.4

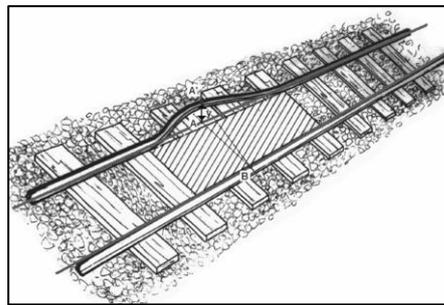


Figura 2.4: Esquema de medição do nivelamento transversal da via

O desnivelamento transversal é considerado quando o valor (y) ultrapassa os limites de tolerância estabelecidos por cada ferrovia. Este tipo de anomalia ocorre normalmente em virtude dos vazios (laqueados) observados entre a superfície inferior do dormente e o lastro (RODRIGUES, 2005);

- Alinhamento: medido em ambos os trilhos, é a distância horizontal (x) que um ponto qualquer (C) , situado na lateral do boleto de um trilho, tem de uma reta formada por outros dois pontos (AB) , sendo um subsequente e outro, antecedente, conforme apresentado na Figura 2.5.

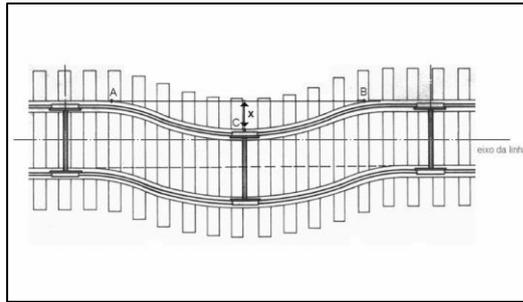


Figura 2.5: Alinhamento de uma via ferroviária

A via é considerada desalinhada quando o valor (x) ultrapassa os limites de tolerância estabelecidos. As principais causas deste tipo de anomalia são: dormentes ausentes, ombro de lastro insuficiente, desgaste ou quebra de placas de apoio e quebra ou deformação de trilhos (LIMA, 1998);

- Empeno: considerando quatro pontos sobre a superfície de rolamento dos trilhos, dois em cada trilho, formando um retângulo ABCD, define-se como empeno a distância vertical (y) dos pontos (B') ou (D') ao plano formado pelo retângulo ABCD como ilustrado na Figura 2.6.

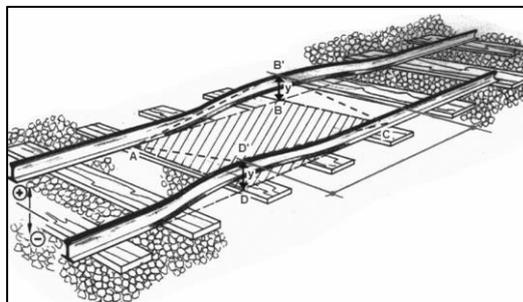


Figura 2.6: Ilustração do método de determinação do empeno em uma via permanente

Esta anomalia causa o movimento de torção no material rodante. Suas causas são as mesmas dos desnivelamentos longitudinal e transversal, sendo observada com mais frequência em vias que possuem maiores quantidades de juntas consecutivas e alternadas nos trilhos, sendo as principais consequências o descarrilamento e tombamento do material rodante (LIMA, 1998). Segundo Silva (2002), o empeno é definido tendo como referência uma base de medição de 20 metros, sendo que também pode ser utilizada uma base 10 metros, contudo, neste caso, o desvio é chamado de torção;

- **Superelevação:** É a maior altura do trilho externo em relação ao interno em uma curva com a finalidade de equilibrar o efeito da força centrífuga, conforme mostra a Figura 2.7.

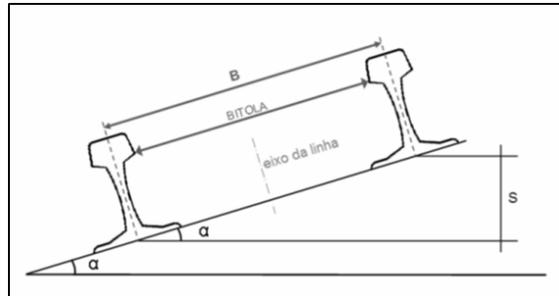


Figura 2.7: Superelevação em uma curva

Não é considerada propriamente uma anomalia de via. Entretanto, quando seu valor se altera em relação àquele previsto em projeto, pode gerar risco de acidente pelo desequilíbrio das forças quando os veículos percorrerem a curva, podendo ocorrer tombamento para a parte interna da curva ou então um descarrilamento para o lado de fora.

Todas as degradações de ambas famílias são potencialmente perigosas ao tráfego, podendo levar a acidentes caso excedam determinadas tolerâncias. Por conseguinte, é fundamental que as ferrovias mantenham esforços de inspeção sistemáticos e continuados sobre a via de maneira a manter um controle rígido do volume e distribuição dessas anomalias.

Desse modo, os procedimentos de inspeção possuem singular importância, possibilitando identificar o aparecimento das degradações, bem como servir ao planejamento das manutenções por meio do acompanhamento da evolução dos desvios. Conseqüentemente, na próxima seção se dará maior atenção aos processos de inspeção da via permanente ferroviária.

2.2 Inspeção da Via Permanente

Os procedimentos de inspeção da via permanente ferroviária se destinam a realizar um levantamento detalhado da condição em que os componentes se encontram, seja em

relação as suas estruturas, seja em relação à geometria. Como resultado é gerado um conjunto de informações que expressarão de forma objetiva o estado da via no momento da inspeção, permitindo identificar pontos cujas condições demandam medidas corretivas imediatas, e pontos cujas intervenções devem ser programadas.

Segundo Paiva (2016), três podem ser os tipos de inspeções: visual, objetiva pontual, e objetiva contínua.

Aquelas ditas visuais são realizadas por trabalhadores da ferrovia, que percorrem o trecho diariamente para detecção de problemas visíveis em sua superestrutura e no sistema de drenagem, buscando principalmente componentes quebrados ou ausentes. As objetivas pontuais são realizadas por meio de medições específicas em locais que estão sujeitos à solicitação mais intensa do tráfego ou outra origem. E a inspeção do tipo objetiva contínua é realizada por veículos especializados capazes de medir a condição da via de maneira automatizada. Cada tipo de inspeção tem sua periodicidade definida em função da intensidade do tráfego típico solicitante.

No que se refere à prospecção da condição geométrica, os serviços de inspeção têm sido amplamente realizados com equipamentos automatizados, com medições realizadas por meios diretos ou indiretos. Nos meios indiretos são empregados acelerômetros ou rodeiros instrumentados, como o apresentado na Figura 2.8, que captam as acelerações nas diversas direções em que se apresentam durante o tráfego do veículo, e as registram para posterior análise e interpretação pelos técnicos. Já os meios diretos utilizam veículos especialmente desenvolvidos para a realização das inspeções, comumente chamados de carro controle, que são dotados de sistemas capazes de medir todos os parâmetros geométricos em marcha, ou seja, em movimento, com precisão bastante elevada. Alguns carros controle mais sofisticados possibilitam inclusive realizar medições estruturais da via concomitantemente ao levantamento do seu estado funcional.

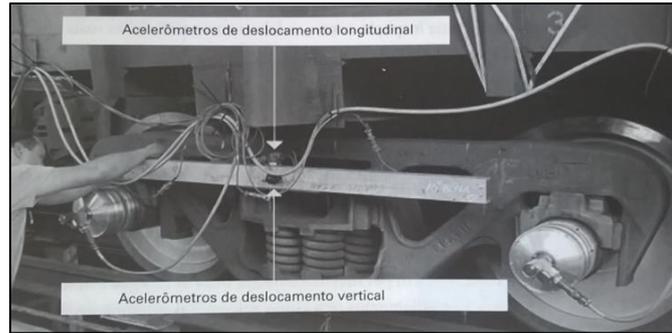


Figura 2.8: Rodeiro instrumentado

Fonte: Steffler (2013).

Nessas inspeções com carro controle é feito o levantamento detalhado de cada parâmetro geométrico ao longo da via, referenciando cada ponto de medição aos marcos quilométricos da linha férrea, bem como delimitando pontos importantes como curvas, tangentes, passagens de nível, pontes, dentre outros. Ao fim é gerado um relatório que pode ser visualizado na forma de um gráfico de leitura, como exemplificado na Figura 2.9, ou então em arquivo de dados com as medições em real grandeza de cada ponto medido. Com relação a esses pontos, os intervalos de medição são delimitados em função da capacidade do equipamento e das premissas adotadas pela ferrovia, contudo existem veículos que podem realizar medições em intervalos de apenas dez centímetros, realizando assim uma prospecção bastante completa da via permanente.

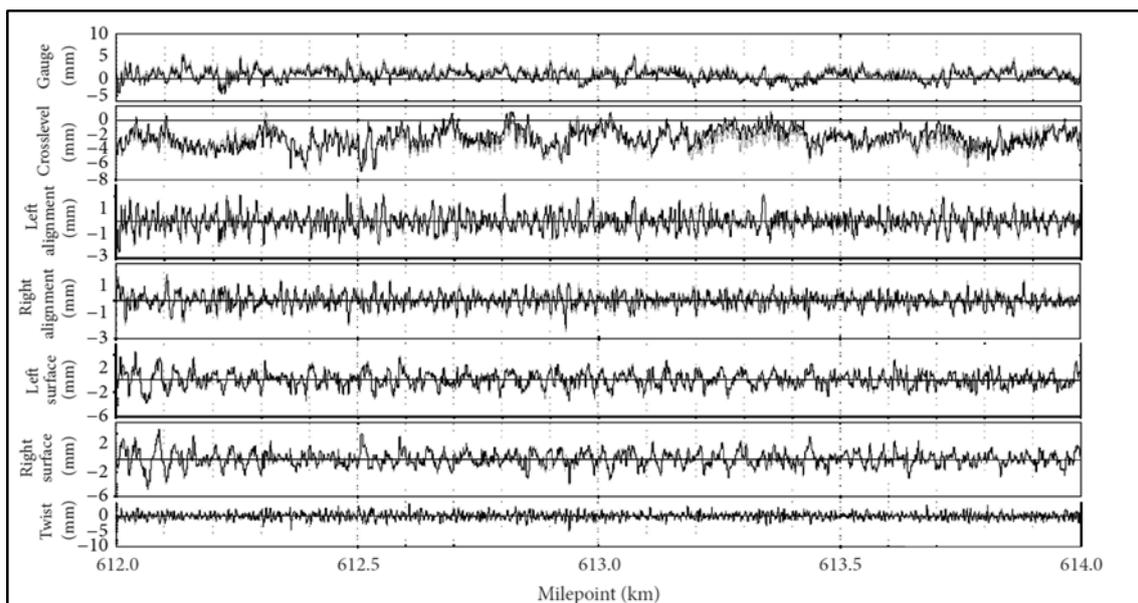


Figura 2.9: Exemplo de relatório gráfico de uma inspeção geométrica realizada por carro controle

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

Segundo Paiva (2016), a principal característica da via que precisa ser avaliada são os desvios de geometria longitudinal e vertical em relação ao projeto de engenharia, de maneira que seja possível estabelecer prioridades de manutenção ou então traçar o perfil de evolução das degradações para programação das manutenções.

Entende-se por desvio geométrico a diferença entre o parâmetro real (medido) e o definido em projeto (medida absoluta) ou a partir de uma base predefinida sob a própria via (medida relativa). Se os desvios ultrapassam valores definidos como limites de tolerância estabelecidos pela ferrovia, passam a ser considerados defeitos. A progressão desses desvios no tempo caracteriza o que se denomina de degradação da via permanente.

Desse modo, as inspeções além de indicarem objetivamente pontos de intervenção imediata, também fornecem a oportunidade de compreensão da dinâmica de degradação. Todo esse contexto, portanto, sustenta o planejamento das manutenções da via permanente, manutenções essas indispensáveis para manter a operação ferroviária e que serão apresentadas no tópico subsequente.

2.3 A Manutenção da Via Permanente Ferroviária

É possível distinguir os trabalhos de manutenção no que se refere ao propósito e as suas características. Três são eles, basicamente:

- Manutenção geométrica ou conserva geométrica;
- Renovação;
- Remodelação.

A manutenção geométrica da conta da recomposição da geometria, ou seja, dos serviços que visam recolocar os componentes da via em posições que atendam às tolerâncias estabelecidas pela ferrovia. Trata-se do serviço de menor vida útil dentre os demais, geralmente sendo realizado em ciclos que se repetem dentro de poucos anos (1 a 5, normalmente) a depender do volume de tráfego. Esses serviços podem ser realizados manualmente ou com o emprego de equipamentos de grande porte, sendo este último o

mais utilizado em função da produtividade elevada e da melhor qualidade final alcançada.

São denominadas renovações as manutenções estruturais que se destinam a substituir os componentes da via quando estes se encontram no fim de suas vidas úteis no trecho. São chamadas de renovações por realizarem a substituição de uma grande quantidade de itens, fazendo com que a condição da via retorne praticamente a mesma quando de sua construção. Normalmente, nessas intervenções os componentes são substituídos em grande número e de maneira conjunta. Essa característica, contudo, pode variar em função das condições de uso da ferrovia, uma vez que, tendo em vista que cada componente possui uma vida útil estimada diferente, algumas ferrovias podem optar por realizar renovações de maneira independente entre os componentes. Essa decisão deve se embasar em uma análise bastante criteriosa da relação custo benefício em se manter um determinado item, já que os custos para realização desse tipo de manutenção são substancialmente elevados, e também pela necessidade de interrupção total da via para realização dos serviços.

A remodelação se assemelha ao conceito de renovação, contudo, destina-se a substituir os componentes da via por outros melhores tecnologicamente, ou então, de maior robustez. Desse modo, quando a demanda pelo transporte excede os limites previstos no projeto do trecho, requerendo uma capacidade maior do que a instalada, faz-se necessário que esse trecho sofra uma remodelação de seus componentes de forma a atualiza-los para a capacidade requerida. É, portanto, um procedimento que não tem necessariamente que ocorrer em um trecho, sendo sua aplicação condicionada exclusivamente à necessidade eventual.

Desse modo, a manutenção da via permanente é composta essencialmente pelos procedimentos de correção geométrica e das renovações, solicitadas pelas degradações geométricas e estruturais, respectivamente. Assim, a dinâmica de degradação da via e as intervenções de manutenções podem ser ilustradas como apresentado na Figura 2.10.

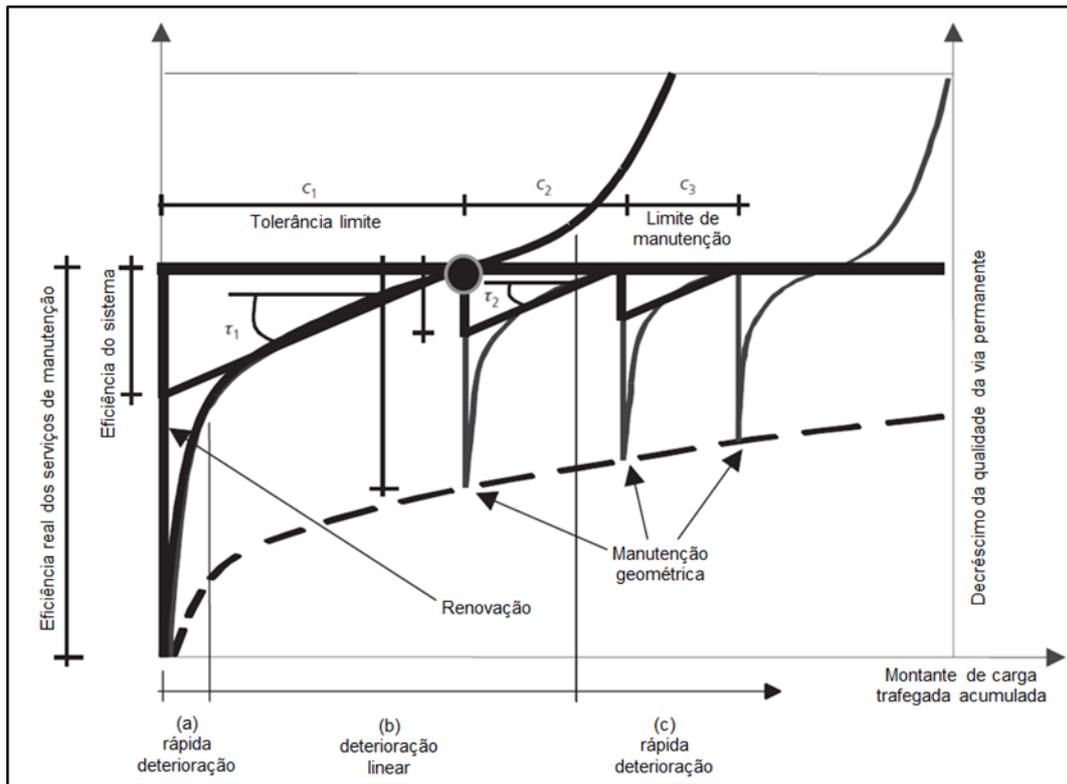


Figura 2.10: Comportamento típico das degradações e das atividades de manutenção em uma via permanente

Fonte: Adaptado de Guler *et al.* (2011).

A figura ilustra o comportamento de uma via permanente hipotética, cujas degradações se desenvolvem segundo uma determinada taxa em função do acúmulo de tráfego ao longo do tempo, e cuja dinâmica de manutenções é administrada segundo limites para manutenção e segurança. Alguns comportamentos dessa dinâmica de degradação podem ser evidenciados: percebe-se que logo após os serviços de manutenção a via se degrada a uma taxa bastante elevada, em um crescimento exponencial, restringindo-se, entretanto, a um curto período de tempo, sendo, portanto, interpretado como um período de acomodação das estruturas. Logo após, a degradação se desenvolve linearmente até que se atinja a tolerância de manutenção estabelecida; outra característica a ser destacada é a redução entre os intervalos de correção geométrica, fato esse que pode ser explicado pelo simultâneo desgaste físico das estruturas, que progressivamente perdem a capacidade de manter a geometria.

É importante destacar que cada ferrovia, com suas particularidades operacionais e volume de tráfego, possuirá sua própria curva de degradação, com perfil característico. Já quanto aos pontos de manutenção, estes deverão ser estabelecidos em função do

desempenho que a empresa pretende alcançar, assim, quanto maior o desempenho pretendido, menores deverão ser as tolerâncias aos desvios geométricos, e mais frequente será a necessidade por este tipo de manutenção.

Mesmo dentro do mesmo patamar de desempenho, ou seja, tendo-se as mesmas tolerâncias a serem observadas, o intervalo entre as manutenções geométricas pode ser variável, retratando métodos mais conservadores quando, por exemplo, se antecipam as intervenções para evitar riscos de extrapolar as tolerâncias; ou então métodos mais preditivos, quando se programam as manutenções para ocorrerem em momentos mais próximos ao patamar de tolerância. Essa definição repercute aspectos gerenciais próprios de cada companhia, que estão diretamente ligados aos valores e as políticas administrativas. Entretanto, por se tratarem de processos que possuem impacto negativo sobre o tráfego e, principalmente, representarem gastos elevados para as empresas, é patente a necessidade de, respeitadas as tolerâncias de segurança, buscar arranjos de manutenção que possibilitem economia de custos.

Nesse âmbito, três são os métodos tradicionais de administração das manutenções, como delimita Rodrigues (2001):

- Conservação eventual;
- Conservação cíclica; e
- Conservação com base no acompanhamento da degradação da via.

A conservação eventual tem caráter corretivo e consiste na reparação dos defeitos à medida que vão ocorrendo. São serviços normalmente não programados fruto de quebras ou desgastes além das tolerâncias. Uma vez detectado o problema, o tráfego é interrompido para a realização da correção, ou então, quando se trata da geometria, se aplica uma medida de restrição de velocidade naquele local até que seja possível realizar a manutenção devida.

Na conservação cíclica os serviços de manutenção são realizados em ciclos fixos em todo o trecho de maneira programada e por meio de uma grande concentração de recursos. Normalmente este ciclo é estabelecido pela experiência acumulada pelos

técnicos da manutenção em função do montante de carga transportada por dia. Na prática, a dinâmica de manutenções desse modelo segue a exemplificada na Figura 2.11.

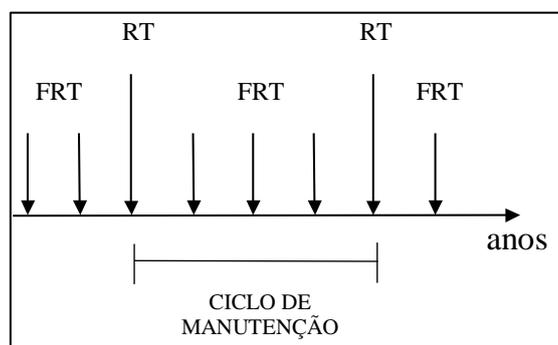


Figura 2.11: Ciclo de conserva cíclica

Fonte: Rodrigues (2001).

Onde:

- Revisão Total – RT: compreende a revisão de todos os componentes da superestrutura (materiais e serviços) e concentram os esforços num determinado trecho da via a ser mantida (trecho de RT) para que o mesmo tenha condições de suportar o tráfego ferroviário até que se complete o ciclo preestabelecido;
- Fora da Revisão Total – FRT: procuram garantir as condições mínimas para que o restante do trecho mantido suporte, com segurança, o tráfego ferroviário até que se chegue ao período em que ele será submetido à revisão total.

A conservação com base no acompanhamento da degradação da via parte do monitoramento sistemático das condições da geometria para determinar a prioridade de intervenção, só o fazendo efetivamente, quando verificada a necessidade.

Sua organização tem por base a subdivisão do trecho a ser mantido em seções de mesma extensão, normalmente 1.000 metros, atribuindo a elas índices calculados a partir da comparação das medições das amplitudes de seus parâmetros geométricos com valores máximos de tolerância. Estes índices, que traduzem o estado geral de degradação dos respectivos trechos, permitem hierarquizá-los, de maneira a definir uma ordem de

atendimento, que, por sua vez irá orientar os procedimentos de programação das atividades da manutenção. Algumas empresas ferroviárias utilizam este método para programar todos os serviços de manutenção, outras o utilizam para programar somente os serviços de correção geométrica, mantendo a filosofia do método da conservação cíclica para programar o restante dos serviços.

Conhecer os componentes, a maneira com que se degradam, como medir essa degradação e por fim como administra-las para mantê-las dentro das tolerâncias, são conceitos essenciais que formam o arcabouço de definição das políticas de manutenção. Estas questões são fundamentais na gestão das manutenções e, no próximo Capítulo, serão explorados aspectos ligados a métodos mais racionais e modernos nessa administração, tendo em vista o enfoque na maximização do desempenho a baixo custo.

3. PLANEJAMENTO PARA DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO MAIS EFICIENTES

Ratton Neto (1985) repercute que entende-se por política de manutenção da via permanente a diretriz gerencial que visa resolver o problema de se realizar os processos de manutenção geométrica e renovação em um volume que seja satisfatório dentro das tolerâncias de desempenho e segurança para o tráfego, e ao mesmo tempo seja economicamente factível à realidade financeira da empresa.

O objetivo principal dessa política centra-se na determinação do momento ideal em que as intervenções devem ocorrer para que, em um horizonte de longo prazo, os dispêndios com manutenções sejam os menores possíveis, visto que uma das principais formas de economia de recursos que pode ser obtida a partir dessa gestão é fruto de uma distribuição mais racional destes processos ao longo da vida útil de um trecho (GULER, 2013).

As diretrizes gerenciais que estabelecem uma maneira de administrar o momento e a qualidade técnica das manutenções compõem a política de manutenção, já que representam uma estratégia estabelecida pela companhia para administrar e contornar as degradações. Contudo, as técnicas mais modernas, baseadas em análises mais aprofundadas do comportamento das degradações e que assim estabelecem dinâmicas de intervenção mais estratégicas, se aderem melhor ao conceito apresentado.

Por isso, dos três métodos tradicionais apresentados no Capítulo anterior, o que representa um meio mais racional de intervenção é o último, cuja programação se assenta em meios investigativos de caráter mais preditivo. Este, portanto, é o que mais se assemelha ao que é visto modernamente, já que o desenvolvimento de novas técnicas e meios investigativos de apoio à decisão já aprimoraram o tipo de análise inerente à definição das políticas de manutenção, os distanciando mesmo deste último método.

Faz-se tal observação, pois, como será visto adiante, embora o resultado final dos métodos mais modernos se assemelhe em alguma medida àqueles estabelecidos pelos meios tradicionais, como por exemplo, a dinâmica cíclica das intervenções, sua definição atualmente, tem como fundamento um processo investigativo mais

aprofundado, analisando de maneira mais completa a dinâmica de degradação em vistas a estabelecer o exato ponto em que as manutenções devem ocorrer para que se alcancem os objetivos organizacionais da maneira mais eficiente possível.

Isto posto, dá-se início a partir desse ponto ao estudo mais aprofundado dos itens que devem compor a análise para definição da política de manutenção mais econômica. Nesse sentido as análises a serem feitas devem, segundo Guler *et al.* (2011), compreender estudos sobre três aspectos: a deterioração da via permanente; as tolerâncias máximas aceitáveis para o padrão de tráfego pretendido; e os custos associados aos respectivos processos de manutenção. Nas próximas subseções esses três principais aspectos mencionados serão explorados.

3.1 Estimação da Degradação da Via Permanente: Geometria

Entender como a via se comporta em função do carregamento tem relevância, pois permite aos gestores estimar qual é a taxa de desgaste das estruturas e assim possibilitar uma análise de longo prazo, buscando principalmente definir qual o melhor arranjo entre as atividades de manutenção para que estas sejam realizadas em um volume suficiente tanto para o desempenho, quanto para a segurança do tráfego.

As abordagens que objetivam estimar a evolução das anomalias geométricas normalmente utilizam formulações baseadas em uma taxa que expressa a evolução das alterações em função da densidade acumulada de tráfego, expressa em milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT) em um período de tempo. Existe, contudo, um elevado número de modelos que foram desenvolvidos, seja pelas próprias companhias ferroviárias, seja por empresas independentes e universidades, e que diferem sobremaneira quanto à forma como os dados são tratados. É possível distinguir pelo menos três tipos básicos de formulações quanto à forma que estabelecem esse tratamento: aqueles baseados em tratamentos determinísticos, com uso de equações fixas replicáveis a qualquer ferrovia; aqueles que determinam a condição da via por meio de índices representativos, a partir dos quais o estado da via é classificado dentro de certos padrões pré-estabelecidos e a manutenção então é programada; e aqueles pautados em tratamentos estatísticos, que consideram que cada via possui sua própria

dinâmica de degradação e que, portanto possuirá sua própria equação representativa de desgaste que precisará ser estabelecida mediante análise de dados históricos.

Para formulação deste trabalho, buscou-se estudar os principais representantes de cada um destes tipos de formulações. Todos aqueles estudados serão mencionados, sendo apresentados, entretanto, apenas aqueles mais relevantes em relação ao objetivo foco dessa pesquisa, ou seja, cujo tratamento das variáveis e os resultados obtidos se assemelham aqueles ora buscados. Isso se faz necessário pelo elevado número de formulações que tornariam esse Capítulo exageradamente extenso.

Com relação aos modelos determinísticos, geralmente são desenvolvidos a partir de observações feitas em trechos ferroviários experimentais ou então em laboratórios específicos, cujas formulações levam diferentes variáveis em consideração bem como a experiência de técnicos do setor. Como exemplo, têm-se os modelos desenvolvidos por Rodrigues (1983), López Pita, visto em Ratton Neto (1985), e o modelo proposto pela Universidade Técnica de Munique, visto em Guler *et al.* (2011). Este último foi desenvolvido a partir de experimentos em condições controladas que observaram o impacto da passagem de veículos ferroviários sobre a via para estabelecer equações para o cálculo da taxa de degradação. Nessa formulação, a pressão no lastro é multiplicada pelo número de passagens de eixos pelo ponto estudado, como demonstrado:

$$S_{opt} = 1,57 \cdot p_b \cdot \Delta N + 3,04 \cdot p_b^{1,21} \cdot \ln N \quad (3.1)$$

$$S_{pess} = 2,33 \cdot p_b \cdot \Delta N + 15,20 \cdot p_b^{1,21} \cdot \ln N \quad (3.2)$$

$$S_{med} = 1,89 \cdot p_b \cdot \Delta N + 5,15 \cdot p_b^{1,21} \cdot \ln N \quad (3.3)$$

Onde

S_{opt} = crescimento das irregularidades em um cenário ótimo, em mm/100 dias;

S_{pess} = crescimento das irregularidades em um cenário pessimista, em mm/100 dias;

S_{med} = crescimento das irregularidades em um cenário intermediário, em mm/100 dias;

p_b = pressão no lastro calculada pelo método Zimmermann, em Pascal;

ΔN = tráfego medido em passagens de eixos, no período imediatamente após os serviços de correção geométrica (≤ 10.000);

N = Tráfego medido em passagens de eixos, após ΔN .

A primeira parte da equação refere-se à degradação iniciada imediatamente após a correção geométrica, caracterizando-se por um desgaste elevado em um curto período de tempo, e a segunda parte refere-se ao desgaste de longo prazo, mais gradual, que se inicia após cerca de 10.000 passagens de eixos.

Apesar das equações utilizarem como variável representativa do tráfego o número de passagens de eixos, é importante destacar que eixos com pesos diferentes exercem forças diferentes sobre a via, o que repercute em taxas de degradação diferentes. Desse modo, apesar de se apresentar como uma equação determinística, na prática sua aplicabilidade é restrita já que as formulações foram estabelecidas a partir de um eixo padrão, com seu peso tomado como referência.

Quanto aos modelos pautados em índices representativos, ou simplesmente TQI, abreviação do termo americano *Track Quality Index*, estes se embasam na definição de índices numéricos que expressam em uma determinada escala a condição de degradação geométrica da via permanente. Normalmente são calculados com base nos valores dos desvios geométricos medidos nas inspeções. Assim como os anteriores, estes também foram desenvolvidos por diversas instituições e sob diversas conformações, como o índice definido pela *Polish State Railways* – PKP, chamado índice J. Esse índice é calculado periodicamente para cada quilômetro de via a partir de medições executadas por carros controle, com o intuito de definir uma hierarquia de trechos que receberão a manutenção segundo o nível de desgaste que apresentarem. Sua fórmula geral é (RODRIGUES, 2001):

$$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0,5S_e}{3,5} \quad (3.4)$$

Onde

S_z = é o desvio padrão encontrado na bitola do trecho avaliado;

S_y = é o desvio padrão das irregularidades horizontais no trecho avaliado;

S_w = é o desvio padrão da torção no trecho avaliado;

S_e = é o desvio padrão das irregularidades verticais no trecho avaliado.

A avaliação do índice J se dá por meio do uso da Tabela 3.1, com aplicabilidade em função da velocidade do trecho (BARIA, 2015). Esses valores expressam os limites máximos tolerados para a condição da via. Caso os valores calculados estejam muito próximos ou extrapolem esses valores, medidas de manutenção deverão ser programadas ou então requeridas imediatamente, respectivamente.

Tabela 3.1: Limites de J segundo as velocidades autorizadas

Velocidade (km/h)	30	40	90	120	160	200
Índice J	12	11	6,2	4	2	1,4

Fonte: Baria (2015).

O sistema desenvolvido pela *Baltimore and Ohio* (B&O), antiga empresa ferroviária americana, denominado *Track-priority and Quality System*, tem por objetivo determinar a prioridade de manutenção para cada quilômetro da via em função do estado de deterioração da via e do volume de tráfego (RODRIGUES, 2001).

Este método foi desenvolvido para aplicação a partir do uso dos registros de cada um dos parâmetros geométricos medidos nas inspeções de carro controle, determinando para cada um dos parâmetros registrados, o número de vezes que ele ultrapassa sua tolerância fixada em função das características do tráfego no trecho. Calcula-se, então, um fator de estado chamado *PTC*, que expressa o estado geométrico da via. A equação utilizada é a seguinte:

$$PTC = E^{-1} \cdot \sum K_i \cdot N_i \quad (3.5)$$

Onde

E = a extensão real do quilômetro nominal;

N_i = a quantidade de pontos do parâmetro i fora da tolerância;

K_i = peso correspondente ao parâmetro i .

Os fatores K_i foram estabelecidos pela *Baltimore and Ohio* de acordo com a importância relativa de cada parâmetro na segurança da circulação. Seus valores são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Fatores K_i estabelecidos pela B&O

Parâmetro	Valor de K
Empenamento	0,7
Bitola	0,5
Nivelamento	1
Alinhamento em tangente	0,3
Alinhamento em curva de concordância	1,1
Alinhamento em curva circular	0,7

Fonte: Rodrigues (2001)

Partindo do fator de estado PTC , a prioridade para a realização de conserva nos vários quilômetros será determinada pelo valor do fator de prioridade, que será tanto maior quanto pior for o estado da via:

$$FP = PTC \cdot FC \quad (3.6)$$

A influência do tráfego é introduzida através do fator de conserva FC dado por:

$$FC = 0,407 + 0,145 \cdot T^{0,75} \quad (3.7)$$

Onde T é a tonelagem bruta anual que circula na via, em milhões de toneladas.

Outros métodos internacionais são os desenvolvidos pela *Japanese National Railway – JNR*; *Société Nationale des Chemins de Fer – SNCF*; *Polish State Railways – PKP*; *Red Nacional de Los Ferrocarriles Españoles – RENFE*; *PLASSER & THEURER*; *Tokaido Shinkansen Maintenance System – TOSMA*; *German Federal Railway – DB*; *British Rail – BR*; *Swiss Federal Railways – CFF/SBB*; *Ferrovias Holandesas – NS*; *Hungarian State Railways – MAV*; *Burlington Northern Rail – BN*; *CSX – Corporation*; *CONRAIL*; *Canadian National – CN*; *Union Pacific – UP*; *Canadian Pacific – CP Rail*; *Shinkansen Japan Rail e ECOTRACK – Economical Track*. Todos estes são apresentados em Rodrigues (2001).

Em Ratton Neto (1985), é apresentado outro modelo de TQI desenvolvido pela agência americana *Federal Railroad Administration* (FRA), desenvolvido a partir de estudos em linhas comerciais.

Quanto às ferrovias nacionais, listam-se os métodos desenvolvidos pela 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 Carajás – EFC, vistos também em Rodrigues (2001).

Cabe destaque para o TQI definido pela extinta RFFSA, que consistia em utilizar o método proposto pela B&O, substituindo o número de vezes que cada parâmetro registrado ultrapassasse sua tolerância fixada, pela extensão total em metros de via, nos quais a tolerância do parâmetro considerado era ultrapassada. Com este índice se definia a priorização dos trechos a serem mantidos.

Numa primeira evolução deste modelo, o fator de conserva FC foi substituído pelo logaritmo de $T/100$, onde T representava a tonelage transportada por dia envolvendo o tráfego de carga e passageiros. Deixa de considerar o parâmetro bitola no cálculo do índice e elimina-se o fator de ponderação K_i (peso correspondente ao defeito) dos demais parâmetros, resultando na expressão abaixo apresentada, que estabelece o valor do Índice de Prioridade IP . Convencionou-se denominar este modelo de RFFSA-1, visto em Rodrigues (2001):

$$IP = 100 \cdot (E^{-1} \cdot \text{Log} \left(\frac{T}{100} \right) \cdot (AL + Tor + Niv)) \quad (3.8)$$

Onde

IP = índice de prioridade;

E = extensão real do trecho;

T = tonelage/dia transportada;

AL = extensão total em metros, em que a tolerância do parâmetro alinhamento é ultrapassada dentro do quilômetro considerado;

Tor = extensão total em metros, em que a tolerância do parâmetro torção é ultrapassada dentro do quilômetro considerado;

Niv = extensão total em metros, em que a tolerância do parâmetro nivelamento é ultrapassada dentro do quilômetro considerado.

Numa segunda fase, o índice de prioridade IP foi substituído pelo valor do índice de defeito ID, calculado para cada seção de aproximadamente 200 metros de via, por meio da equação apresentada a seguir. Convencionou-se denominar este modelo de RFFSA-2, expresso por:

$$ID = K \cdot \frac{Niv + Al}{E} \quad (3.9)$$

Onde

K = valor arbitrado de modo a gerar valores relativos fáceis de serem comparados numericamente;

Niv, *Al* e *E* = parâmetros já definidos anteriormente.

Com base neste índice é possível programar a conserva da manutenção dentro de um critério estabelecido pela empresa.

Como Andrade e Teixeira (2015) destacam, a complexidade em se modelar a deterioração geométrica usando métodos analíticos é bastante elevada, principalmente em função da grande quantidade de parâmetros específicos de cada ferrovia. Desse modo, métodos empíricos podem revelar-se mais adequados para representar tal cenário, uma vez que as relações entre os parâmetros podem ser estabelecidas de maneira exclusiva para a ferrovia em estudo por meio de ferramentas estatísticas, dando origem assim, ao terceiro grupo de modelos de estimação.

Os autores que abordam a temática por meio desse enfoque estatístico se embasam na assertiva de que cada trecho de ferrovia pode ter uma expressão própria para expressar e estimar a sua condição geométrica, e por isso não propõem equações gerais, ou modelos definitivos, mas um procedimento a partir do qual serão obtidas as equações.

Como nas demais, também nessa linha de abordagem muitos foram os modelos desenvolvidos. Andrade e Teixeira (2015), por exemplo, propõem uma ferramenta que usa modelagem Bayesiana para prever o comportamento geométrico da via permanente. Esse método parte de uma coleção de dados históricos e observações feitas por profissionais, para montar uma base estatística que avalia o comportamento futuro das degradações, analisando posteriormente alternativas de manutenção e renovação;

Baria (2015) enfoca a questão por meio de um sistema de gerência de pavimentos aplicado a via permanente metroferroviária, no qual o autor propõe tratar a temática por meio de um modelo gerencial conjugado a um sistema de informações geográficas e um banco de dados, sugerindo inclusive, um conjunto de indicadores para a gestão da via;

Andrews *et al.* (2014), propõem uma formulação estocástica de Redes de Petri, representando os processos de inspeção, manutenção e renovação, que, por simulação de Monte Carlo, projeta diversas distribuições de tempo de degradação, número de intervenções e respectivos custos de intervenção, possibilitando assim que as opções possam ser avaliadas, e o melhor cenário seja escolhido;

Guler (2013) desenvolve um sistema de suporte a decisão (*Decision Support System – DSS*), pautado no custo do ciclo de vida dos componentes;

Shafahi e Hakhamaneshi (2009) propõem uma ferramenta de gestão cuja estimativa das degradações é feita por meio de matrizes de transição de Markov, cuja aplicação se embasa na leitura dos indicadores geométricos da via e na opinião de especialistas para formular a probabilidade de evolução do índice representativo de qualidade do estado da via em períodos de um ano.

Em Iwnicki *et al.* (2000), é apresentado o modelo intitulado SATO, em que registros de inspeções na via permanente foram utilizados para o desenvolvimento de um modelo de previsão por meio do qual, a partir da observação das vibrações nos trilhos, é avaliado o desgaste do lastro e estabelecido o crescimento de irregularidades na via, com o uso da seguinte equação:

$$S = 2,09 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0,31} \cdot Va^{0,98} \cdot M^{1,1} \cdot L^{0,21} \cdot P^{0,26} \quad (3.10)$$

O fator de estrutura contém a influência das forças na via e é calculado da seguinte forma:

$$M = P_b \cdot y_z \cdot S_i \quad (3.11)$$

Onde

S = crescimento médio de irregularidades, em mm/100 dias;

T = densidade do tráfego, em milhões de toneladas por ano;

Va = velocidade média, em Km/h;

M = fator de estrutura;

L = fator de influência do trilho, sendo = 1 para trilhos soldados, e = 10 para trilhos com juntas;

P = fator de influência para subestrutura (sublastro), sendo 1 = bom, e 10 = ruim;

P_b = pressão semi estática no lastro, em Pa;

y_z = aceleração no trilho, em m/s²;

S_i = coeficiente de impacto (função das propriedades do trilho).

Outra formulação deste tipo, porém desenvolvida nacionalmente nas linhas da EFVM, é apresentada por Ratton Neto (1985). Este modelo leva em consideração apenas o parâmetro geométrico nivelamento para o planejamento da manutenção. Nele é estimado o número de vezes que este parâmetro excederia as tolerâncias nos trechos onde não se tenha efetuado qualquer trabalho entre duas inspeções geométricas consecutivas. Foram propostas duas equações estatisticamente definidas, tendo ambas representatividade semelhante. São elas:

$$IDN = 0,7105 \cdot T^{1,0576} \quad (3.12)$$

E

$$IDN = 0,00749 \cdot 21,350059^T \quad (3.13)$$

Onde

IDN = índice de degradação do nivelamento (frequência mensal de valores acima da tolerância);

T = densidade de tráfego, em toneladas brutas anuais.

Todas as equações desenvolvidas pelos métodos estatísticos são, portanto, de aplicação restrita ao trecho a partir do qual foram desenvolvidas.

3.2 Estimação da Degradação da Via Permanente: Desgaste das Estruturas

Como já apresentado, trilhos, dormentes, fixações e lastro possuem seu desgaste influenciado pelo volume de tráfego, velocidades praticadas, fatores climáticos, e pelas características dos próprios componentes. Dessa forma, estabelecer um modelo capaz de estimar de maneira confiável a vida útil desses materiais envolve o estudo de uma série de variáveis, e, como na geometria, muitos foram aqueles desenvolvidos dedicados a esse fim.

Seguindo a mesma lógica utilizada para os modelos de geometria, em que serão detalhados apenas aqueles mais pertinentes, a seguir são apresentados os métodos que foram estudados para compor a base desse trabalho.

Quando se fala em tempo de utilização dos componentes na via, as estimativas podem ser estabelecidas por meio do estudo do desgaste físico das estruturas ou então da fadiga fruto da repetição das cargas. É prudente realizar a análise para ambos os casos e adotar como padrão o resultado de menor valor.

Em Rodrigues (1983) é apresentado um elevado número de formulações desenvolvidas para cada um dos materiais. Quanto aos trilhos, é apresentado o modelo desenvolvido pela *American Railway Engineering Association (AREA)*, que define a vida útil por desgaste; o modelo da Universidade de Illinois, também pautado na definição por desgaste a abrasão; modelo da Companhia Vale do Rio Doce para trilhos, por desgaste;

modelo TOPS *On Line Service* Inc. também por desgaste; e o modelo ENEFER - Consultoria e Projetos Ltda, variante do TOPS; TRANSCON Engenharia e Planejamento, com foco no estabelecimento por fadiga; e, o modelo da *Association of American Railroad* (AAR), que estabelece sua estimativa tendo como base a fadiga das estruturas; Por fim, o autor analisa os diversos modelos e propõe um método próprio, conjugando as diversas características de cada um apresentado, de maneira a ser, segundo ele, uma alternativa mais factível para o uso nacionalmente.

A equação proposta para vida útil de trilhos por desgaste é:

$$VUTrilhos = \left(\prod_{i=1}^8 K_i \right) \cdot 1,932 \cdot WT^{0,565} \quad (3.14)$$

Onde

$VUTrilhos$ = vida útil de trilhos em 10^6 toneladas;

W = peso do trilho, em kg/m;

T = densidade anual de tráfego, em 10^6 toneladas;

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

K_1 = tipo de trilho;

K_2 = velocidade de operação (valores de referência definidos pela empresa TOPS – On Line Service, Inc, doravante TOPS);

K_3 = rampas (valores TOPS);

K_4 = curvas (valores de referência estabelecidos pela *American Railway Engineering Association* - AREA);

K_5 = carga por eixo (valores TOPS);

K_6 = trem típico (valores TOPS);

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 para os coeficientes K_i podem ser consultados no Anexo I deste trabalho.

E, para vida útil por fadiga, o autor recomenda o uso do modelo AAR:

$$VUTrilhos = \frac{1}{\sum \frac{B_y}{N_y}} \quad (3.15)$$

Onde

$VUTrilhos$ = vida útil do trilho por fadiga, em milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT);

$$B_y = B \cdot a_y;$$

B = total de ciclos por MTBT;

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

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

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

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

$S_{m\acute{a}x}$ = carga vertical máxima y .

Z = inclinação da curva S - N (esforço \times número de ciclos necessários para provocar fadiga);

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

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

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

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

m = inclinação da curva limite do diagrama de Goodman modificado;

Em Baria (2015), é proposto um método que determina a vida útil de trilhos por meio de um modelo empírico partindo do pressuposto que os defeitos de fadiga em trilhos seguem uma distribuição estatística da lei de Weibull. A função utilizada pelo autor possui a forma:

$$F(m) = 1 - \exp[-(m/n)^b] \quad (3.16)$$

Em que m é o tempo, a carga acumulada, os ciclos, ou qualquer outro valor que seja considerado na avaliação da degradação, n é o parâmetro de escala conhecido como vida característica, e b relaciona-se com a taxa de falha do componente estudado. Dessa forma, com os valores n e b determinados é possível calcular o tempo médio entre falhas, dado pela equação:

$$MTTF = n\Gamma[(b + 1)/b] \quad (3.17)$$

O tempo médio de via ($MTTF$) pode ser estabelecido em horas ou toneladas brutas trafegadas dependendo do parâmetro utilizado.

Nessa mesma linha, Zakeri e Shahriari (2012) exploram sua análise por meio de matrizes de transição de Markov, utilizando também uma distribuição de Weibull para estimar o comportamento dos cenários progressivos de degradação de trilhos.

Quanto aos dormentes, a definição da vida útil de utilização na via está diretamente ligada ao material de que são feitos. Para dormentes de concreto e aço pode ser estimada por meio de ensaios realizados em laboratório e específicos para o tipo de via (RODRIGUES, 1983). Além disso, por serem itens projetados e produzidos de maneira controlada, é garantida a homogeneidade de suas características técnicas. Entretanto, isso não é possível para dormentes de madeira, sendo necessário o desenvolvimento de modelos baseados em pesquisas específicas.

Dessa forma, Rodrigues (1983) apresenta os modelos desenvolvidos pela AREA, cuja formulação é pautada em um levantamento estatístico em ferrovias americanas; o TOPS On-Line Service Inc. que nacionaliza a equação da AREA diminuindo sua restrição de aplicabilidade pela utilização de um produtório de fatores que representam características da ferrovia; o método ENEFER Consultoria de Projetos Ltda., que utiliza o modelo TOPS corrigido por um fator que leva em conta o tipo de trilho instalado na via, e finalmente o modelo proposto pelo próprio autor, desenvolvido por meio de um processo de regressão linear de dados obtidos junto as ferrovias da extinta RFFSA e da

EFVM, que utiliza também um produtório de fatores determinados em função das características da ferrovia. A equação proposta é a seguinte:

$$VUDormentes = 2,023 \cdot \left(\prod_{i=1}^6 K_i \right) \cdot e^{(2,3569-0,0350\alpha)} \cdot D^{-0,1553396} \quad (3.18)$$

Onde

$VUDormentes$ = vida útil do dormente, em anos;

D = densidade anual de tráfego, em milhões de toneladas brutas anuais (MTBA);

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

$\prod_{i=1}^6 K_i$ = produtório de constantes determinadas em função de características da via e da operação:

K_1 = função do comprimento da barra do trilho;

K_2 = função da velocidade;

K_3 = função das rampas;

K_4 = função do perfil dos trilhos;

K_5 = função da carga por eixo;

K_6 = função de outras características da via, como drenagem, carga por eixo, condições da plataforma e lastro.

Os valores para os fatores K_i podem ser consultados no Anexo I deste trabalho.

Em Baria (2015), outro tipo de abordagem é apresentada. Segundo esse autor, o desgaste de dormentes é muito pequeno dentro de um intervalo relativamente longo, crescendo, entretanto muito rapidamente no período final, tornando-se assim, um fenômeno não linear. Assim, seria mais apropriado utilizar uma distribuição estatística do tipo exponencial para modelar a taxa de falhas desses componentes. A partir da equação de densidade de probabilidade:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.19)$$

O autor delimita λ como o intervalo de tempo de falha de cada dormente em um trecho experimental, definindo então o tempo médio ($MTTF$) de falha:

$$MTTF = \frac{\sum_{i=1}^n TTF_i}{n} \quad (3.20)$$

Onde TTF é o tempo até a falha e $MTTF$ é o tempo médio até a falha. Assim, λ é dado por:

$$\lambda = \frac{1}{MTTF} \quad (3.21)$$

Assim, a função de confiabilidade pode ser escrita como:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.22)$$

Logo, sabendo qual o $MTTF$ com base nos registros de manutenção, é possível estabelecer qual o nível de confiabilidade e calcular um intervalo de manutenção.

Para o lastro, Baria (2015) propõe a utilização da mesma linha de tratamento utilizada para dormentes e trilhos, enquanto que Rodrigues (1983) investiga alguns métodos, como o da ENEFER, que determina que a vida útil do lastro é o dobro do ciclo de nivelamento/correção de geometria da via; o modelo AAR, que estabelece valores em função da densidade anual de tráfego, em MTBT, e também o número de ciclos de correção geométrica; e também propõe um modelo em que o lastro deve ser repostado em um volume de 12% a cada intervenção de correção geométrica até o quarto serviço, sendo que no quinto serviço deverá ser feita uma limpeza de lastro com posterior reposição de 52%.

Quanto aos acessórios de fixação, apenas Rodrigues (1983) apresenta formulações específicas, baseadas em uma norma estabelecida pela AREA, tendo como referência a vida útil dos trilhos ($VUTrilhos$), como apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: 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).

Estes são, portanto, meios de se estabelecer a vida útil de maneira individual para cada componente. Existem ainda métodos que procuram analisar a vida útil da via como um todo, como aqueles apresentados em Andersson *et al.* (2016), com abordagem embasada em modelos paramétricos de sobrevivência aplicados a uma série de dados históricos; e em Guler (2016), em que é desenvolvida uma sistemática embasada na utilização de algoritmo genético para otimização da escolha do melhor momento de renovação.

3.3 Tolerâncias de Desgaste Para Parâmetros Geométricos

As tolerâncias são valores referenciais estabelecidas para cada parâmetro geométrico da via. São utilizadas para avaliar até que ponto os desvios podem evoluir, servindo dessa forma, para verificar a necessidade de manutenção. São extremamente importantes no que diz respeito ao desempenho do tráfego, pois quanto mais elevada for a velocidade das composições na via, menores serão as tolerâncias para que os veículos possam circular em equilíbrio e segurança. Desse modo, nas normas ferroviárias as tolerâncias são estabelecidas com base na classe da ferrovia, sendo essas classes definidas em função da faixa de velocidades praticadas, como pode ser visto na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Tolerâncias dimensionais para desvios geométricos em função da classe da ferrovia segundo as normas da *Association of American Railroads*

Parâmetros	Velocidade por classe - limites máximos (mm)					
	Classe 1 0-16 km/h	Classe 2 17-24 km/h	Classe 3 25-64 km/h	Classe 4 65-96 km/h	Classe 5 97-128 km/h	Classe 6 129-177 km/h
Bitola	+30 -5	+25 -5	+20 -5	+15 -5	+10 -5	+/- 5
Superelevação	+/- 14	+/- 14	+/- 12	+/- 10	+/- 7	+/- 4
Alinhamento E/D	+/- 12	+/- 12	+/- 10	+/- 8	+/- 6	+/- 4
Empeno	+/- 12	+/-11,7	+/- 9,1	+/- 7,7	+/- 5,6	+/- 2,8
Nivelamento E/D	+/- 8	+/- 6	+/- 4,5	+/- 3	+/- 1,5	+/- 1,5

Fonte: VALE (2009).

Esses valores são estabelecidos pelo setor de engenharia da ferrovia ou mesmo seguindo normas internacionais, levando em consideração as velocidades, o perfil de construção e também em função de determinadas características de vagões considerados críticos para a operação, como o centro de gravidade.

Como exemplo dessa determinação, apresenta-se o método para fixação da tolerância máxima para o parâmetro empeno em bitola métrica (1000 mm) na EFVM. No método utilizado por essa ferrovia o empeno será avaliado pela comparação da variação das medidas de nivelamento transversal entre pontos adjacentes tomadas por régua de superelevação. Para a base de medição (distância entre pontos de medição) e altura do centro de gravidade serão considerados os valores relativos aos vagões mais críticos em circulação. Os limites últimos das variações de nivelamento transversal entre pontos adjacentes são obtidos por meio da equação apresentada abaixo, considerando-se a velocidade máxima estabelecida para cada trecho da ferrovia. Assim, os valores máximos admissíveis de empeno entre os pontos de medição são estabelecidos aplicando a seguinte fórmula (VALE, 2009):

$$E = \frac{298}{h \cdot V} \cdot D \quad (3.23)$$

Onde

D = distância entre seções de medição, em metros;

V = velocidade da composição, em km/h;

h = altura do centro de gravidade do vagão, em metros;

E = empeno, em mm.

De maneira conservadora, segundo VALE (2009), considera-se como limite a ser utilizado, valores equivalentes a 80% em relação ao valor máximo calculado para o vagão mais crítico. Para a EFVM foram considerados os dados dos vagões hopper tipo HFE e gôndola tipo GDE, com distância entre truques $D = 1,727$ metros, e altura de centro de gravidade de 1,876 e 1,579 metros, respectivamente. Os resultados são apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Tolerâncias ao empeno para vagões críticos na EFVM

Empeno máximo (mm) para curvas da EFVM e FCA – bitola métrica			
Velocidade (km/h)	HFE	GDE	Limite adotado segundo o vagão mais crítico (HFE)
15	18	22	15
20	14	16	11
25	11	13	9
30	9	11	7
35	8	9	6
40	7	8	5
45	6	7	5
50	5	7	4
55	5	6	4
60	5	5	4
65	4	5	3
70	4	5	3

Fonte: Vale (2009).

Em alguns métodos tradicionais de gestão, quando constatada a existência de alterações que se aproximam ou extrapolam tais tolerâncias são tomadas medidas de correção, restrição de velocidade, ou agendamento de manutenções. A forma como os gestores administram essa questão varia em função da política de manutenção adotada pela empresa, contudo, por se tratar de um método baseado unicamente na leitura dos valores na via, faz-se praticamente a constatação da existência dos desvios quando estes já se verificam na estrutura, e por consequência, as medidas restritivas de velocidade são utilizadas amplamente, até que os procedimentos de manutenção sejam realizados.

3.4 Custos de Manutenção Geométrica e Estrutural

Nas manutenções geométricas, exceto em problemas pontuais, a maioria das atividades são desenvolvidas por equipamentos automatizados de grande porte, como niveladoras e socadoras de via. Dessa forma os custos são função do consumo de combustível e lubrificante durante as atividades e em trânsito, somados aos custos da mão de obra de operação e inspeção da via. Além disso, geralmente é necessária uma descarga de lastro complementar nesses processos, e assim, os custos correspondentes também devem ser contabilizados. E por fim, existem os prejuízos pela paralização do tráfego para realização dos procedimentos.

Exemplos de formulações que apropriam tais custos podem ser vistos nos trabalhos de Patra *et al.* (2008), dentre elas a de inspeção e a de socaria de via, apresentada abaixo:

$$CSV = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(T_{TAi} \cdot C_l \cdot L_i) + (T_{TAi} \cdot C_{eta} \cdot L_i) \cdot \left(\frac{m}{m_{TAi}}\right)}{(1+r)^j} \quad (3.24)$$

Onde

CSV = custo de socaria de via, em R\$;

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

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

L_i = comprimento da seção de via em manutenção, em km;

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

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

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

r = taxa de juros;

j = enésimo período de tempo em que a manutenção está sendo avaliada.

Quanto aos valores de renovação, os custos são relativos à compra dos componentes que serão substituídos, os custos da operação de substituição, manual ou mecanizada, e também o prejuízo decorrente da paralização do tráfego. Como exemplo de formulação para esse cálculo, é apresentada uma composição proposta por Guler (2016) para a substituição de trilhos:

$$RRC = \sum_{S=1}^S \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(C_{RRS} + (C_R \cdot L_i) + (T_{RRi} \cdot C_L \cdot L_i) + (C_{ERR} \cdot T_{RRi} \cdot L_i)) \cdot (M/M_{RRi})}{(1+r)^j} \quad (3.25)$$

Onde

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

C_{RRS} = custo adicional de substituição de trilhos, em R\$/km;

C_R = custo do trilho, em R\$/km;

L_i = comprimento do trecho a ser renovado, em km;

T_{RRi} = tempo para substituição de trilho, em h/km;
 C_L = custo de mão-de-obra para instalação, em R\$/h;
 C_{ERR} = custo de equipamento para instalação, R\$/h;
 M = milhões de toneladas brutas trafegadas (MTBT);
 M_{RRi} = vida útil do trilho, em MTBT;
 r = taxa de juros;
 j = enésimo período de tempo que está sendo avaliado;
 S = número de estruturas de engenharia;
 R = número de curvas classificadas segundo o raio;
 N = tempo de operação da via, em anos.

Esse mesmo autor propõe equações para os demais componentes da via que não são apresentadas aqui em função de suas estruturas serem basicamente idênticas à apresentada, diferindo apenas quanto ao nome das variáveis. Também estão presentes modelos para a determinação do custo de limpeza do lastro, lubrificação de trilhos e esmerilhamento do boleto de trilhos.

Essas formulações estabelecem os custos inerentes à compra dos materiais, definido por meio do produto entre o custo unitário e o volume necessário; o custo para instalação do item, definido pelo tempo necessário pelo serviço multiplicado pelo custo da mão-de-obra; e por fim, o tamanho ou quantidade do serviço, estabelecido pela relação entre a vida útil do item em MTBT, e o MTBT que trafegou até o momento. Também é utilizado um fator de atualização dos resultados para uma data presente, já que ao se analisar processos de manutenção ou renovação está se trabalhando com serviços futuros.

A utilização das equações é condicionada exclusivamente a conformação da renovação definida pela política de manutenção da companhia, ou seja, aos procedimentos que serão realizados, uma vez que em função das diferenças de vida útil dos componentes, não necessariamente é preciso que sejam trocados todos os itens ao mesmo tempo. Desse modo, determinadas ferrovias podem realizar a substituição de itens em conjunto, deixando outros com vida útil remanescente, ou então realizar a substituição de todos ao mesmo tempo.

Esses detalhes são fruto da maneira como a empresa administra as manutenções e mesmo da demanda por manutenção verificada em cada trecho, contudo, ao se pensar em uma visão de longo prazo em que se procura estabelecer uma política de manutenção que irá proporcionar economia de recursos a um volume suficiente de manutenções, é imprescindível o desenvolvimento de uma sistemática que permita estimar o custo total resultante de todos os serviços de manutenção para um determinado tempo de operação.

Essa questão diz respeito a análise do custo do ciclo de vida (CCV), ou LCC (*Life Cycle Cost*), caracterizada pelo somatório das estimativas de custo de todas as atividades que serão realizadas ao longo da vida útil do sistema (BARIA, 2015). O objetivo de uma análise de CCV é escolher a melhor aproximação de uma série de alternativas para que o menor custo de longo prazo seja atingido (SGAVIOLI *et al.*, 2015), caracterizando-se dessa forma, como o objetivo principal buscado ao se definir uma política de manutenção da via permanente.

3.5 Análise do Referencial e Conclusão Pela Proposição do Método de Definição de Políticas de Manutenção Mais Econômicas

Na definição conceitual de políticas de manutenção para via permanente apresentada no início do Capítulo 3, são destacados três aspectos fundamentais: as tolerâncias de segurança, de desempenho, e o custo dos serviços. Assim, partindo do pressuposto que os dois primeiros aspectos dizem respeito ao nível de serviço almejado, ou em outras palavras, ao desempenho pretendido, seus valores são fixados segundo prerrogativas que vão ao encontro da satisfação de uma necessidade ou oportunidade advinda do mercado, sendo que as manutenções irão espelhar tal decisão garantindo que a via esteja dentro dos limites de qualidade que garantam tal anseio. Dessa forma, pode-se dizer que os dois primeiros aspectos são fixos, imutáveis dentro do objetivo estabelecido, entretanto, a maneira como eles serão garantidos pode variar, ou seja, diversas podem ser as conformações de manutenções que podem ser estabelecidas para alcançar esse objetivo, e, por se tratar de um ambiente empresarial, é comum que as empresas busquem estabelece-las segundo o critério do mínimo custo possível.

Assim, ao se planejar uma política de manutenção o objeto final de sua definição será o momento da intervenção, materializado seja sob a forma de um ciclo em meses que deverá ser respeitado para os seguimentos da via, seja na forma de um valor de desvio ou desgaste que ao se materializar na via dará início ao desenvolvimento das atividades.

A definição desse objeto deve, portanto, proporcionar um volume de atividades que não seja de tal monta sobressaltado, o que implicaria em assumir elevados custos de realização das manutenções que acabariam por drenar o eventual lucro resultante do desempenho garantido; nem subdimensionado ao ponto de possibilitar o surgimento de desvios além das tolerâncias, que implicariam em redução de velocidade e prejuízo ao desempenho, ou pior, elevando os riscos ou até ocasionando acidentes.

Tem-se assim a definição do foco principal do planejamento das políticas de manutenção: a definição do ponto ideal de intervenção que gere o menor dispêndio possível com manutenções durante a vida útil do trecho ferroviário.

A determinação de quando, onde e como intervir, entretanto, representa um problema complexo nessa definição, dependendo em grande medida da prospecção das anomalias, sejam elas geométricas ou físicas, e da correta estimativa da degradação dos componentes ao longo do tempo (ANDREWS *et al.*, 2014). Nesse contexto, Guler *et al.* (2011) salientam que tal complexidade ocorre principalmente porque diferentes seções da via tendem a se comportar de maneira diferente sobre a ação do carregamento, e assim, a definição da política de manutenção mais adequada dependerá de uma gama de informações muito variada, indo do conhecimento técnico e aspectos econômicos, até a experiência profissional.

Nesse sentido, destaca-se a importância dos métodos para estimar o comportamento da via ao longo do tempo, justificando inclusive, o volume e a variedade em que se apresentam, como demonstrado ao longo deste referencial.

Quanto às características dos métodos, quando se leva em consideração que cada ferrovia possui um projeto específico, concebido para as características geográficas, operacionais e até climáticas da região na qual está instalada, a análise de uma série de dados históricos pode revelar padrões de comportamento específicos, podendo retratar

com mais fidelidade o comportamento das estruturas. Além disso, autores como Guler *et al.* (2011), Andrade e Teixeira (2015) e Xu *et al.* (2015), destacam que existem segmentos dentro de um mesmo trecho que se degradam de maneiras diferentes, ou seja, tangentes, curvas, rampas, túneis, pontes, terão comportamentos frente ao carregamento diferentes, e que se reverterão em taxas de degradação também diferentes. Dessa maneira, apesar da existência de muitos modelos gerais, a tendência é que o desgaste geométrico seja definido por meio de métodos empíricos, sejam eles pautados em um TQI ou em tratamentos estatísticos, que possam exprimir o comportamento da via de maneira personalizada, retratando com mais exatidão as características de construção e de operação de cada trecho.

Além disso, mesmo dentre os trabalhos cuja proposta foi oferecer meios determinísticos de abordar essa questão, algumas formulações, como a de Rodrigues (1983), tem a base de sua estrutura definida a partir de estudos de dados históricos, tendo sido depois, nesse caso, corrigidas segundo um produtório de diversos fatores padronizados em função das características da via permanente.

Em relação à vida útil dos materiais na via, tanto a classificação quanto a conclusão tomada para os modelos geométricos é válida também para esse caso. Entretanto, quanto a esses modelos, há que se fazer uma observação fundamental: embora as manutenções geométricas e as renovações sejam processos distintos, Guler (2013) e Calvo *et al.* (2013) destacam uma relação de interferência entre eles, já que quanto maiores forem as anomalias geométricas, mais desbalanceadas estarão as forças resultantes da circulação dos veículos, e conseqüentemente maiores serão os desgastes estruturais; e, a medida que estes componentes estão mais desgastados, menor será a capacidade de manterem a geometria, acarretando uma taxa de correção geométrica maior.

Ao se analisar essa questão sob um olhar financeiro, quanto mais frequentes forem as manutenções geométricas, maiores serão os seus custos no longo prazo, fruto do maior volume, e, teoricamente, mais distantes estarão as necessidades de renovação; em contrapartida, à medida que se distanciam temporalmente as manutenções geométricas, se permite que as estruturas tenham desvios geométricos maiores, o que se converte em

uma taxa de desgaste físico maior, e, conseqüentemente, diminuem-se os gastos com manutenção geométrica e aumentam os custos com renovação.

É necessário fazer essa observação, pois, embora a revisão bibliográfica tenha trazido um número de modelos para a estimação da vida útil dos materiais relativamente elevado, nenhum deles abordou em sua formulação essa questão. A principal variável que determina o horizonte de utilização dos componentes na maioria desses métodos é a densidade anual de tráfego (MTBT). Essa estruturação, portanto, desconsidera completamente a influência dos desvios geométricos sobre a vida útil dos componentes, e assim assume que qualquer que seja o estado da degradação da geometria, este não terá impacto sobre o desgaste estrutural.

Nas formulações propostas por Rodrigues (1983), por exemplo, apesar do produtório definido pelo autor possuir dentre suas variáveis o fator K_7 , que dentre outras características estabelece as condições de manutenção da via, o autor apenas observa aspectos ligados à condição de drenagem, a consolidação da plataforma e o estado do lastro na definição desse fator, definindo o horizonte temporal de utilização dos componentes sem a análise do estado da degradação geométrica.

A relação que pode ser inferida entre os dois tipos de degradações é que a cada grandeza de alteração geométrica se teria um incremento proporcional de desequilíbrio das forças sobre os componentes e assim as taxas de desgaste estruturais seriam maiores tanto quanto fossem maiores os desvios verificados. Contudo, ao se utilizar como variável principal o volume de carga trafegada, os modelos definem a vida útil dos componentes como constante em relação aos desgastes geométricos, fazendo com que a análise para definição do custo mínimo de manutenção recaia unicamente sobre o número e a distribuição das manutenções geométricas entre as renovações.

Sob essas circunstâncias, essa característica faz com que os ciclos de renovação sejam constantes em relação aos ciclos de manutenção geométrica, e, dessa forma, a política de manutenção mais econômica seria basicamente aquela que estabelecesse o momento de intervenção que possibilitasse, guardando o desempenho e segurança, a realização do menor número possível de ciclos de manutenções geométricas entre renovações.

A forma de se alcançar esse menor número de intervenções é postergá-las ao máximo, estabelecendo ciclos de intervenções cuja realização ocorra no exato momento em que os desvios geométricos alcançarem os limites de tolerância permitidos para a classe de ferrovia em questão. Dessa forma, ao se estabelecer um método de gestão, os modelos estudados nessa revisão analisam a maneira como as degradações se desenvolvem no trecho e estabelecem um método a partir do qual será possível estimar o intervalo de tempo para que as degradações atinjam o limite de tolerância, possibilitando assim programar os serviços.

Esses modelos podem ser coerentes para planejamentos de curto prazo, contudo, trechos ferroviários possuem tempo de utilização extremamente elevados, facilmente excedendo 30 anos, e nesse caso, a relação descrita entre as manutenções geométricas e a vida útil dos materiais pode ter significativo impacto sobre os custos totais.

Segundo Rattón Neto (1985) ao se introduzirem irregularidades na via, a intensidade da aplicação dos esforços é aumentada, atingindo-se mais rapidamente os limites de utilização dos materiais e, conseqüentemente antecipando-se a sua substituição. Segundo esse mesmo autor os conceitos básicos na determinação de um ciclo para atender ao critério de economia na manutenção, são:

- a vida útil dos componentes da via é reduzida com o aparecimento e desenvolvimento das irregularidades, e;
- os ciclos de manutenção geométrica da via são mais espaçados quando se admitem tolerâncias mais brandas.

Assim, quanto mais brandas as tolerâncias, ou em outras palavras, quanto mais espaçados os ciclos, maiores as irregularidades permitidas e, por consequência, maior a redução da vida útil dos componentes.

Nessa mesma linha, Rodrigues (2001) destaca que quanto maior for a degradação da via, maiores serão os esforços gerados na interação veículo-via e assim, maior será o esforço a ser suportado pela própria superestrutura.

Outros autores, como Guler (2013), e Rodrigues (1983), também destacam tal relação.

Assim, frente a tais observações, justifica-se a proposição do modelo desenvolvido nesse trabalho, apresentado no próximo Capítulo, e destaca-se sua particularidade no que diz respeito ao tratamento da relação descrita entre o estado da degradação geométrica e o tempo de uso dos materiais para a definição da política de manutenção mais econômica.

4. PROCEDIMENTO PARA DEFINIÇÃO DE POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO MAIS ECONÔMICAS

O procedimento desenvolvido nesse trabalho para definição das políticas de manutenção constitui-se por cinco etapas sequenciais, a saber:

1. Estimativa da taxa de degradação geométrica e do período máximo entre manutenções;
2. Definição da vida útil padrão dos componentes da via permanente;
3. Quantificação do aumento da vida útil dos componentes segundo a diminuição dos intervalos de correção geométrica;
4. Estimativa dos custos de realização dos serviços de manutenção na via permanente;
5. Determinação do ciclo de correção geométrica mais econômico.

Dessas etapas, as quatro primeiras se destinam a compor um banco de informações necessárias a determinação, na quinta etapa, do ciclo de manutenção geométrica mais econômico sob o ponto de vista do CCV da via permanente. Essas etapas tem desenvolvimento empírico, já que foram concebidas de maneira a utilizar dados do próprio trecho em que o procedimento é aplicado, havendo, contudo indicações pontuais de equações determinísticas caso os dados necessários para realização de algum desses itens não estejam disponíveis.

Cada uma dessas etapas possui um propósito específico cujos processos inerentes ao seu desenvolvimento serão apresentados nas subseções correspondentes a seguir apresentadas.

4.1 Estimativa da Taxa de Degradação Geométrica e do Período Máximo Entre Manutenções

Dois são os objetivos principais dessa primeira etapa: estabelecer o padrão de evolução das degradações geométricas em função do tráfego de maneira a, posteriormente, estimar as degradações futuras; e, a partir desse padrão, estabelecer qual o tempo necessário para que os desvios atinjam a tolerância limite de segurança para o trecho em

estudo, configurando-se assim, como o maior período possível entre manutenções sem que haja perda de desempenho.

Para o desenvolvimento dessa etapa serão necessários três conjuntos de informações essenciais: a produção do trecho, ou seja, o volume bruto transportado, seja resultante do transporte de carga, seja do transporte de passageiros; o gerenciamento de manutenções, contendo dados de realização dos serviços no trecho estudado; e os relatórios de inspeções geométricas.

As informações de produção se destinam a determinar o nível de utilização do trecho, sendo utilizadas como variáveis explicativas do processo de degradação geométrica. Opta-se por adotar o MTBT como variável explicativa do que o tempo de operação, por exemplo, pois ferrovias diferentes possuem volumes de transporte diferentes, e mesmo dentro da mesma ferrovia, seja ela destinada ao transporte de carga, de passageiros, ou ambos, podem existir períodos em que o volume de transporte varia, impactando diretamente na intensidade de solicitação do trecho.

Para caracterização do processo de degradação serão analisados apenas os segmentos da linha ferroviária que não tenham sofrido qualquer tipo de intervenção de manutenção entre inspeções. Para tanto, essa informação virá do banco de dados de gerenciamento de manutenções, que deverá apresentar os registros das intervenções realizadas, sendo imprescindíveis detalhes quanto ao tipo de manutenção, as datas de início e fim, e os pontos quilométricos de início e fim dos respectivos serviços.

Por fim, os relatórios de inspeções, sejam eles resultantes de levantamentos via carro controle, seja por métodos manuais tradicionais, serão utilizados para determinar a condição da geometria no momento de cada inspeção, servindo como base para estimar a evolução dos desvios. Nesses relatórios deverão estar disponíveis os valores das medições dos parâmetros que caracterizam a geometria, organizados segundo a posição quilométrica, planimetria (curva ou tangente) e data da inspeção.

Informações não indispensáveis, mas úteis se disponíveis, são os pontos quilométricos de todas as curvas e tangentes definidos no cadastro da via, raio das curvas, e posição de pontos notáveis como AMVs, passagens de nível, pontes e viadutos. Essas informações

podem ser utilizadas para identificação de comportamentos não previstos, como alterações bruscas na condição da geometria, ou ainda facilitar a identificação de erros de leitura das inspeções.

Essa primeira etapa se desenvolve por quatro subitens, apresentados detalhadamente a seguir.

4.1.1 Item 1: organização dos dados de inspeção

Inicialmente os dados de leitura das inspeções geométricas precisam ser depurados e organizados. Nesse sentido, os dados precisarão ser ordenados segundo as informações da linha onde a inspeção foi realizada, a posição quilométrica de cada ponto de medição, a característica planimétrica desses pontos, e os valores dos sete parâmetros geométricos para cada respectivo ponto medido. Um exemplo dessa organização é apresentado na Tabela 4.1, que demonstra os valores de uma inspeção geométrica, retirada do trabalho de Rodrigues (2001), cujas medições foram realizadas em um volume de duas mil medições por quilômetro, e nesse caso exemplificado, apresenta-se um pequeno trecho de apenas cinco metros em uma curva (“C”), no quilômetro 43, da linha tronco (LT) 1. Os valores apresentados expressam o tamanho dos desvios medidos e estão em inteira grandeza, em milímetros.

Tabela 4.1: Exemplo de organização de dados de uma inspeção geométrica

Ramal	Linha	Km	Metro	Curva/Tg	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)

Continuando o processo de organização dos dados, após essa formatação inicial, será necessário subdividir a via em seções de características homogêneas. O propósito dessa divisão é estabelecer trechos com características planimétricas semelhantes de maneira que seja possível avaliar se os desvios geométricos evoluem de maneira semelhante ao longo da linha. Como apresentado na revisão de literatura, a degradação da via permanente se dá por meio da interação de uma gama de variáveis bastante extensa, logo, pode não ser adequado avaliar os desvios segundo a premissa que a via em toda a sua extensão se comporta da mesma maneira.

Essa subdivisão se dará a cada mudança de planimetria, ou seja, a cada alternância entre uma seção da via em curva para outra em tangente, e vice versa, será delimitado um novo trecho.

Tendo a essa altura os dados já organizados, serão selecionados trechos que serão utilizados posteriormente na determinação da taxa de evolução dos desvios geométricos, e para tanto, será necessário selecionar segmentos da linha que não tenham sofrido qualquer tipo de intervenção de manutenção entre a primeira e a última inspeção da série disponível, e que ainda não tenham erros de medição em seus registros. A determinação desses trechos será feita com auxílio do banco de dados de serviços de manutenção que fornecerá a data de realização das conservas geométricas ao longo da via sob análise.

Para avaliar o impacto na condição da via da adoção de segmentos homogêneos, os dados de inspeção relativos aos trechos selecionados serão analisados em três diferentes conformações: adotando a linha como um único grande segmento, logo, analisando-a como um todo; separando a via em dois grandes segmentos de mesma planimetria, formando assim, um grupo com todas as curvas e outro com as tangentes; e por fim, analisar separadamente cada trecho em curva, assumindo, entretanto que as tangentes podem ficar reunidas, já que são segmentos em linha reta e tendo assim características homogêneas.

Por fim, o último processo desta etapa consiste em separar para cada um dos grupos de dados gerados, os valores das medições geométricas entre positivos e negativos. Essa

última conformação se destina a avaliar em qual direção os desvios evoluem mais rapidamente, ou seja, se para cima ou para baixo, para direita ou para a esquerda.

Desse modo, ao término desse primeiro item, terão sido determinados os seguintes grupos de dados para cada inspeção: trecho completo com valores positivos; trecho completo com valores negativos; trecho em curva com valores positivos; trecho em curva com valores negativos; trecho em tangente com valores positivos; trecho em tangente com valores negativos; n curvas com valores positivos; n curvas com valores negativos.

4.1.2 Item 2: cálculo da condição da via permanente

Com os dados das inspeções organizados segundo os critérios apresentados, será estabelecida nessa etapa a condição geométrica da via, e, para tanto, para cada um dos sete parâmetros geométricos será calculado um índice que expressará o estado da degradação naquele momento, ou seja, naquela inspeção.

Esses índices serão calculados para cada uma das conformações de dados definidas no item anterior relativos a apenas duas inspeções geométricas da série disponível, sendo elas a primeira e a última.

Em sua maioria, os modelos estudados no referencial bibliográfico estabelecem índices que determinam a condição da via como um todo, sejam eles baseados em um TQI, sejam os modelos que utilizam apenas alguns parâmetros geométricos como representativos. Este trabalho, contudo, buscará determinar a condição da via no que se refere a cada um dos sete parâmetros geométricos. Em outras palavras, o ritmo de degradação de cada um dos sete parâmetros será estabelecido e aquele cujos desvios evoluírem de maneira mais rápida, ditará o momento de realização das manutenções.

Desse modo, fez-se necessário o emprego de um método que expressasse o estado geométrico de cada um dos parâmetros, adotando-se para tanto a média da amostra calculada para os valores de cada um dos parâmetros geométricos, tendo como base os métodos propostos por Rodrigues (2001) e Ratton Neto (1985), que utilizaram este estimador em seus modelos.

Sabe-se que as medidas relativas dos parâmetros geométricos são distribuídas segundo uma curva normal de média μ e desvio padrão σ (RATTON NETO, 1985). Assim, optou-se por utilizar além da média da amostra, também os valores extremos do intervalo da distribuição normal da média da amostra. São analisados, portanto, três índices em cada um dos cenários: a média da amostra, e o valor superior e inferior da distribuição normal da média da amostra. A análise desses três valores para cada cenário objetiva determinar qual o índice que se degrada mais rapidamente, garantindo dessa forma, certa firmeza quanto à adoção de um valor que expresse o pior cenário, ou seja, aquele cujas medidas adotadas para manutenção serão as mais seguras.

Para estimar o intervalo de confiança para a média da amostra segundo a descrição feita acima, aplica-se a formulação:

$$\bar{X} - Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.1)$$

Em que $Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ é o máximo erro da estimativa da média, ou seja, é a máxima diferença provável entre a média amostral observada \bar{X} , e a verdadeira média populacional μ . E $\bar{X} - Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ e $\bar{X} + Z_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ determinam os limites inferior e superior, respectivamente, do intervalo de confiança, sendo n o tamanho da amostra.

A determinação de $Z_{\alpha/2}$ é feita por meio da distribuição normal reduzida e indica o nível de confiança na determinação dos valores limite do intervalo. Para determina-lo é preciso estabelecer qual é a tolerância razoável ao erro para o cenário em estudo, e para tanto, foi pesquisado em literatura qual é o risco ao acidente ferroviário que as empresas ou entidades declaram como aceitável. Segundo Schäbe (2001), o risco a falha tomado como tolerável para a infraestrutura ferroviária é de 0,0000001%, desse modo, nesse trabalho o intervalo para a média da amostra será definido para 99,9999999% de confiança. Esse valor pode ser determinado por meio do software Excel, pela fórmula “=INT.CONFIANÇA.NORM”.

Ao término desse item, combinando os cenários estabelecidos no item precedente aos três índices calculados para cada um destes cenários, são geradas as seguintes planilhas de dados para cada uma das inspeções analisadas:

- Via sem divisão: média a partir de valores positivos;
- Via sem divisão: média a partir de valores negativos;
- Via sem divisão: média superior a partir de valores positivos;
- Via sem divisão: média superior a partir de valores negativos;
- Via sem divisão: média inferior a partir de valores positivos;
- Via sem divisão: média inferior a partir de valores negativos;
- Via em curva: média a partir de valores positivos;
- Via em curva: média a partir de valores negativos;
- Via em curva: média superior a partir de valores positivos;
- Via em curva: média superior a partir de valores negativos;
- Via em curva: média inferior a partir de valores positivos;
- Via em curva: média inferior a partir de valores negativos;
- Via em tangente: média a partir de valores positivos;
- Via em tangente: média a partir de valores negativos;
- Via em tangente: média superior a partir de valores positivos;
- Via em tangente: média superior a partir de valores negativos;
- Via em tangente: média inferior a partir de valores positivos;
- Via em tangente: média inferior a partir de valores negativos;
- Via em curva trecho n : média a partir de valores positivos, sendo n cada um dos trechos selecionados para a via em análise;
- Via em curva trecho n : média a partir de valores negativos, sendo n cada um dos trechos selecionados para a via em análise;
- Via em curva trecho n : média superior a partir de valores positivos, sendo n cada um dos trechos selecionados para a via em análise;
- Via em curva trecho n : média superior a partir de valores negativos, sendo n cada um dos trechos selecionados para a via em análise;
- Via em curva trecho n : média inferior a partir de valores positivos, sendo n cada um dos trechos selecionados para a via em análise;

- Via em curva trecho n : média inferior a partir de valores negativos, sendo n cada um dos trechos selecionados para a via em análise.

4.1.3 Item 3: estimativa da recuperação da qualidade da via pelos serviços de manutenção

A definição dos ciclos de manutenção geométrica tem relação direta com a capacidade dos serviços de restituir a qualidade da geometria, ou seja, de recolocar os componentes em suas posições adequadas. Recolocá-los em suas posições, contudo, não significa restituir à via as características próprias de sua construção, já que fruto das degradações físicas, os componentes perdem a capacidade de conservar a geometria. Desse modo, nessas condições, é mais correto definir que o efeito dos serviços de manutenção estão mais ligados a diminuição dos desvios, ou em outras palavras, de retornar a posição dos componentes a patamares dentro das tolerâncias geométricas.

Na conjuntura em questão, a relevância de se definir a eficiência das manutenções advém do fato de que são os desvios remanescentes dos serviços que tornarão a se degradar até a tolerância para que então se realize outra manutenção, em consequência, quanto maior a qualidade final pós manutenções, maiores serão os intervalos entre os serviços.

Em função da irregularidade dos desvios ao longo da linha e também da maneira como são realizadas as correções geométricas, presume-se que os serviços de manutenção não sejam capazes de recompor a geometria de maneira homogênea. Desse modo, julgou-se apropriado estabelecer um procedimento para medir qual a efetiva recuperação que os serviços possuem em relação aos desvios geométricos.

O processo proposto consiste em comparar a condição da geometria da via após as manutenções com aquela verificada anteriormente à realização desses serviços. Para tanto, inicialmente é necessário selecionar trechos dentro da seção de estudo que tenham sofrido alguma intervenção desse tipo entre duas inspeções geométricas consecutivas da série disponível. Encontrados trechos nessas condições, determina-se a condição anterior e posterior da via seguindo o mesmo roteiro estabelecido para a determinação

dos índices geométricos apresentados no item 2, estabelecendo assim os mesmos cenários listados naquele item.

Posteriormente, calcula-se a diferença entre os desvios remanescentes e os anteriores a inspeção, sendo essa diferença convertida em porcentagem, ou seja, estabelecendo a proporção do desvio que foi corrigida. A equação a seguir, expressa o cálculo realizado:

$$PC = \frac{D_a - D_p}{D_p} \cdot 100 \quad (4.2)$$

Onde

PC = proporção do desvio que foi corrigido, em %;

D_a = desvio do parâmetro analisado na inspeção anterior ao serviço de manutenção, em mm;

D_p = desvio do parâmetro analisado na inspeção posterior ao serviço de manutenção, em mm.

Em função desse modelo de tratamento, o número de resultados para cada parâmetro geométrico é elevado, e é ainda maior tanto quanto maior for o número de trechos que atenderem aos critérios de seleção. Por consequência, visto que é necessário definir apenas um valor de referência para cada parâmetro geométrico, faz-se necessário a partir do montante de resultados por parâmetro, convertê-los em apenas um resultado referencial, por meio de uma média amostral calculada a partir de todos os resultados obtidos por parâmetro, de modo a estabelecer uma tendência central.

Essa opção pela média amostral tem por objetivo amenizar os valores extremos resultantes da análise. Como visto na aplicação do procedimento, a correção geométrica tem resultados muito diversos, sendo que, em alguns casos, para parâmetros específicos e em função de peculiaridades do trecho em questão, pode ocorrer, contrariando a própria finalidade do serviço, o aumento do desvio. Isso se dá em função da ação nociva que o próprio processo utilizado para correção geométrica tem sobre os componentes.

O ato de corrigir a geometria se dá por meio da utilização de um equipamento que, pelo uso de uma elevada força mecânica, eleva a grade da via até uma determinada posição, como ilustrado na Figura 4.1, e concomitantemente, aplica estruturas chamadas “pás de soca” no lastro, comprimindo-o abaixo dos dormentes, como mostrado na Figura 4.2. Desse modo, ao equipamento soltar a grade, esta permanecerá, em alguma medida, na posição definida, sustentada pelo lastro compactado abaixo dos dormentes. Em função da elevada força necessária à realização desse procedimento podem ocorrer danos nos componentes, principalmente caso estes já se encontrem em uma condição propensa a tal, e também fratura do material do lastro pela ação da banca de socaria.

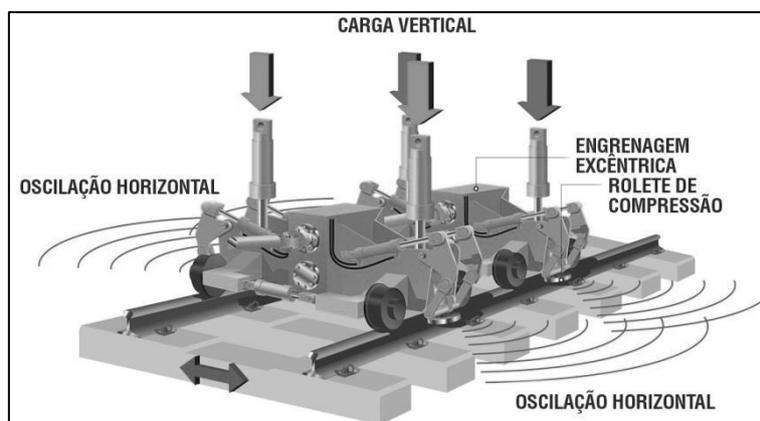


Figura 4.1: Base de elevação, também conhecida como banca de socaria, e dinâmica de aplicação das forças em equipamentos de correção geométrica

Fonte: Plasser do Brasil (2018).

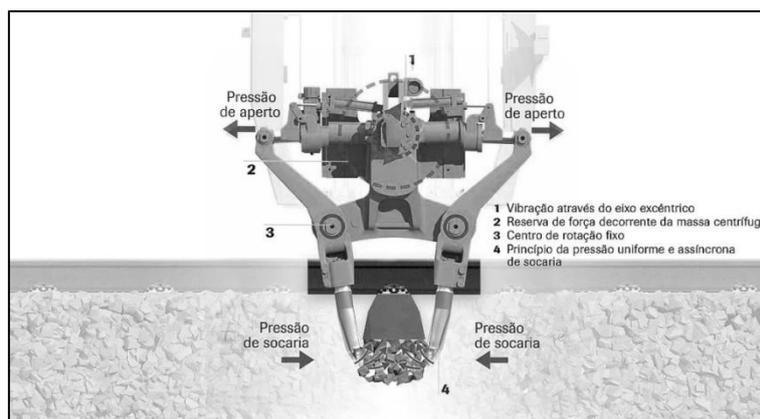


Figura 4.2: Processo de socaria de lastro abaixo dos dormentes

Fonte: Plasser do Brasil (2018).

Em função dessa característica, os resultados pós manutenção tendem a ter amplitudes muito elevadas, desde correções bastante satisfatórias até aquelas em que os desvios são

corrigidos em uma pequena proporção. Desse modo, a opção pela média, busca definir um valor central capaz de amenizar essa grande amplitude.

Como resultado final calcula-se a porcentagem de correção média dos desvios de cada parâmetro geométrico.

4.1.4 Item 4: definição da taxa de desgaste e do ciclo de manutenção máximo

A partir dos índices geométricos relativos a cada um dos cenários analisados, da proporção média de recuperação da via pela manutenção, e do MTBT do período, neste último item se estabelece a taxa de desgaste geométrico da via, para que posteriormente seja estimado o tempo necessário para que os desvios evoluam até as tolerâncias de referência, configurando-se assim como o maior tempo entre manutenções geométricas que poderá ser assumido para os serviços de conserva sem que haja restrição de desempenho.

O primeiro item a ser definido é a taxa de degradação. Por taxa de degradação se entende a proporção de evolução dos desvios geométricos em função do volume transportado que pelo trecho trafegou no período analisado. Assim, para esse caso, a partir dos dados dos desvios inicial e final da série disponível e estabelecidos para cada um dos cenários descritos no item 2, a taxa será calculada por meio da seguinte equação:

$$TD \left(\frac{mm}{mtbt} \right) = \frac{\Delta G}{MTBT_T} \quad (4.3)$$

Onde

TD = taxa de desgaste da geometria da via calculada para cada parâmetro geométrico, em mm/MTBT;

ΔG = diferença entre o desvio da última e da primeira inspeção no trecho estudado, em mm;

$MTBT_T$ = montante de carga transportada no período, em MTBT.

Definida a taxa é possível estimar qual o volume de transporte necessário para que os desvios alcancem as tolerâncias de manutenção, por meio do uso da equação:

$$MTBT_{man} = \frac{G_{lim} - G_F}{TD} \quad (4.4)$$

Onde

$MTBT_{man}$ = montante de carga necessário para que o desvio alcance a tolerância de manutenção, em MTBT;

G_{lim} = tolerância limite de geometria para o parâmetro em questão, em mm;

G_F = valor do desvio geométrico para o parâmetro analisado após os serviços de manutenção geométrica, em mm.

É importante destacar que G_F é calculado por meio da proporção de correção geométrica dos serviços de manutenção, estabelecida no subitem anterior, multiplicada pela tolerância geométrica do trecho sob análise.

Para determinar o ciclo de manutenção máximo em uma unidade de tempo, basta que o valor $MTBT_{man}$ seja relacionado ao volume médio que trafega pelo trecho ao longo de um determinado período, com o uso da equação:

$$CM = \frac{MTBT_{man}}{MTBT_{méd}} \quad (4.5)$$

Onde

$MTBT_{méd}$ = montante de carga médio que circula pelo trecho, em meses ou anos;

CM = ciclo de manutenção, em meses ou anos.

Como já destacado, essas formulações, aplicadas para todos os cenários sob análise, resultam em um número de resultados proporcionalmente elevado, em que cada um determina um valor de ciclo de manutenção próprio. Dessa forma, é preciso determinar

qual cenário que representa da melhor maneira possível a degradação da via e, portanto, o efetivamente utilizado para a programação das manutenções.

Para tanto, selecionam-se os índices segundo critério que resguarde a segurança, e, por consequência, os resultados escolhidos se referem ao parâmetro que apresentar o menor ciclo de manutenção, ou seja, que terá a degradação mais rápida. Dessa forma, cada um dos segmentos delimitados na via sob análise, ou seja, para a via sem divisão, dividida em curva e tangente, e em curvas e tangente, teria seus próprios resultados que seriam analisados posteriormente no decorrer do desenvolvimento do procedimento.

Feita essa triagem, o objetivo da primeira etapa do procedimento fica concluído.

Antes de prosseguir para as próximas etapas, é importante que se faça uma breve justificativa sobre os motivos que levaram a adoção do método apresentado para o desenvolvimento desse último subitem. A maioria dos trabalhos levantados na revisão de literatura que se propõem a determinar equações para estimativas dos desvios geométricos, o fazem por meio de regressões lineares simples. Normalmente essas regressões são estabelecidas tomando como variável explicativa o MTBT, e como variável explicada o desvio geométrico de cada um dos sete parâmetros, sendo que a determinação final das equações fica condicionada a aprovação das equações de regressão mediante aplicação de testes de hipóteses para que se avalie sua representatividade estatística.

Normalmente nestes trabalhos, em função dos critérios definidos pelos autores para os testes de hipóteses, poucas são as regressões aprovadas, logo, restringindo a análise da condição da via a apenas alguns parâmetros. Condicionar a análise a apenas alguns poucos parâmetros pode não ser adequado, visto que todos influenciam a dinâmica de interação veículo – via, e, por conseguinte, precisam ser estudados de forma a estabelecer aquele que se degrada mais rapidamente. O fato dos modelos estatísticos não serem aprovados não significa que o parâmetro em questão é desprezível, apenas indica que para os critérios de aprovação adotados, e para a amostra em questão, os resultados obtidos não possuem representatividade estatística. Assim, esse item foi desenvolvido por meio do método apresentado por se entender que assim se estaria

analisando a geometria da via de maneira completa, possibilitando dessa forma escolher o parâmetro que efetivamente se degrada mais rapidamente.

4.2 Definição da Vida Útil Padrão dos Componentes da Via Permanente

Essa segunda etapa do procedimento se destina a determinar o tempo de utilização dos componentes na via permanente para o padrão administrativo vigente quando da aplicação do método. Os valores estabelecidos aqui, portanto, são referenciais no sentido que expressarão a vida útil fruto da frequência das manutenções geométricas adotadas pela companhia.

São propostas duas formas de estabelecer esses valores: a primeira de caráter empírico, tendo como base de desenvolvimento o histórico de renovações do trecho; e a segunda, determinística, com o uso de equações fixas.

Quanto à primeira, é comum que as ferrovias já guiem seus serviços de renovação por meio de análises semelhantes, tendo, por exemplo, valores médios de vida útil para os componentes da via em função de sua própria experiência de operação. Assim, quando a empresa não dispuser desses valores já estabelecidos, estes deverão ser calculados tendo como base as informações contidas no banco de informações de manutenções do trecho, onde será buscado o histórico de renovações dos componentes, e, a partir das datas de instalação e substituição dos itens, serão calculados valores médios, por meio de médias aritméticas, para cada componente, ou, a depender da sistemática de renovação adotada, para a via como um todo.

Caso seja possível, é recomendável que as estimativas dos valores sejam feitas tendo como base serviços realizados no mesmo trecho selecionado para análise na primeira etapa.

Sabe-se, contudo, que para esse tipo de análise é necessário um banco de dados extenso e detalhado, o que nem sempre está disponível, por isso, como alternativa, é proposta a segunda forma de abordagem, com a utilização na íntegra das equações 3.14, 3.15, 3.18 e as apresentadas na Tabela 3.3, propostas por Rodrigues (1983), já que foram

estabelecidas com foco nas ferrovias nacionais e levam em suas formulações um montante razoável de variáveis inerentes às características do trecho ferroviário.

4.3 Quantificação do Aumento da Vida Útil dos Componentes Segundo a Diminuição dos Intervalos de Correção Geométrica

A análise do impacto do estado da degradação geométrica sobre a vida útil dos materiais que é proposta nessa etapa se funda no pressuposto que vias em melhores condições geométricas tem a resultante das forças que sobre ela atuam mais equilibradas, e por consequência, exigem estruturalmente os materiais de maneira mais adequada, revertendo-se em um tempo de uso maximizado.

Entende-se que ao se diminuir os desvios dos parâmetros geométricos, a qualidade da via melhora na mesma proporção. Desse modo, relacionando tal entendimento ao pressuposto destacado, pode-se concluir que a vida útil dos materiais aumenta proporcionalmente ao aumento da qualidade da via permanente. Não foi possível, entretanto, averiguar qual é a medida dessa proporcionalidade, já que apesar dos trabalhos levantados na revisão bibliográfica discorrerem sobre tal relação, nenhum deles definiu qualquer modelo matemático sobre o assunto. Desse modo, em função dessa característica e da validade da relação, corroborada pelo referencial, tomar-se-á como referência para esse trabalho que a vida útil dos componentes da via permanente aumenta linearmente com o aumento da qualidade geométrica, ou seja, com a diminuição dos desvios.

A partir, portanto, desse conceito elementar, faz-se necessário que seja medido o aumento da qualidade geométrica com a diminuição do ciclo de manutenção, e para tanto, propõe-se para essa etapa, que se desenvolva uma análise no mesmo banco de dados de inspeções e manutenções utilizado nas etapas precedentes, tendo como referência trechos que tenham sofrido intervenções de manutenção em conformações diferentes daquela padrão definida pela política de manutenção vigente para o trecho em estudo.

Para efetivação dessa análise, inicialmente é necessário selecionar trechos abarcados pela série de inspeções geométricas disponível, que tenham sofrido manutenções

geométricas em um intervalo inferior aquele padrão. Essa seleção é embasada nas informações sobre manutenções realizadas no trecho, oriundas do banco de dados correspondente. Identificados os trechos, são realizados os mesmos procedimentos de cálculo de índices representativos da condição geométrica estabelecidos no subitem 2 da etapa 2 para a inspeção geométrica realizada imediatamente anterior à realização da manutenção. Os cenários analisados para o cálculo desses índices são os mesmos, diferindo apenas quanto à dispensa do cálculo realizado curva a curva, já que como não se tratam dos mesmos trechos analisados, a justificativa para esse tipo de análise apresentada para aquela etapa, não é válida para essa.

Os valores obtidos desses cálculos expressam a condição da geometria quando as manutenções foram realizadas, e desse modo, possibilitam definir o incremento da qualidade geométrica para a redução do ciclo de manutenção em questão se comparado ao ciclo e as tolerâncias daquele padrão utilizado nos demais trechos.

Ter-se-á desse modo, índices que expressam o aumento da qualidade geométrica em função da redução do ciclo de manutenção para cenários nas mesmas conformações que aqueles estabelecidos na etapa 2, ou, em outras palavras, serão geradas nessa etapa índices para o trecho completo sem divisão, e dividido em curva e tangente para a média e os intervalos superior e inferior da distribuição normal da média da amostra.

A partir dos índices calcula-se as proporções de redução do ciclo de manutenção geométrica e dos desvios geométricos em relação aos ciclos calculados na etapa 2. Essas reduções serão determinadas pelo uso das equações:

$$RC_i = \frac{C_{pi} - C_{ri}}{C_{pi}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Onde

RC_i = proporção de redução do ciclo de manutenção geométrica para o cenário i sob análise, em %;

C_{pi} = ciclo padrão de manutenção geométrica para o cenário i em análise, em meses ou anos;

C_{ri} = ciclo de manutenção com intervalo reduzido para o cenário i em análise, em meses ou anos.

E

$$RT_i = \frac{T_{pi} - T_{ri}}{T_{pi}} \cdot 100 \quad (4.7)$$

Onde

RT_i = proporção de redução da tolerância geométrica para o cenário i sob análise, em %;

T_{pi} = Tolerância geométrica para realização das manutenções no ciclo padrão no cenário i em análise, em mm;

T_{ri} = Desvio geométrico medido na inspeção anterior a realização da manutenção geométrica com intervalo reduzido, para o cenário i em análise, em mm.

A proporção de redução da tolerância geométrica RT_i expressa o aumento da qualidade da geometria da via permanente para a correspondente redução do ciclo de manutenção RC_i verificada. Pela proposição apresentada anteriormente, o incremento da vida útil ocorrerá na mesma proporção estabelecida por RT_i , desse modo, a partir dessa relação pode ser calculado o incremento da vida útil dos componentes para qualquer ciclo que se deseja avaliar por meio da equação:

$$IV = \frac{RT_i \cdot NC}{RC_i} \quad (4.8)$$

Onde

IV = proporção de incremento da vida útil dos componentes em relação à vida útil padrão para o novo ciclo NC , em %;

RT_i = redução da tolerância do ciclo base analisado, em %;

RC_i = redução do ciclo analisado nos dados base, em %;

NC = qualquer valor de intervalo entre manutenções que se deseja saber a redução da tolerância, em meses ou anos.

Desse modo, tendo como referência uma análise conservadora, será adotado como padrão para o aumento da vida útil dos materiais e consequente utilização na definição final do ciclo de manutenção mais econômico, o IV calculado a partir da menor proporção verificada entre o aumento da vida útil dos materiais e a redução do ciclo de manutenção.

4.4 Estimativa dos Custos de Realização dos Serviços de Manutenção na Via Permanente

Esta etapa compreende a estimativa dos custos de manutenção geométrica e de renovação para o mesmo trecho analisado, definido na etapa 2. Esses custos têm caráter unitário, ou seja, são valores padronizados segundo uma medida específica ou para todo o trecho analisado, depois utilizados para determinar o custo total de longo prazo, multiplicados pelo volume de atividades necessárias no período a ser fixado.

O custo de manutenção geométrica é definido pelo somatório dos diversos custos específicos dos procedimentos e insumos necessários para o apoio, planejamento e realização desse tipo de serviço.

Dessa forma, para o custo direto de realização do procedimento de manutenção, utilizando socadora/niveladora e reguladora de lastro, se propõe a seguinte equação:

$$CSV = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(T_{SV} \cdot C_M \cdot L_i) + (T_{SV} \cdot C_{EQ} \cdot L_i) \cdot \left(\frac{MTBT}{MTBT_{Ti}}\right)}{(1+r)^j} \quad (4.9)$$

Onde

CSV = custo de socaria de via, em R\$;

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 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;
 j = enésimo período de tempo em que a manutenção está sendo avaliada.

Nessa equação o custo médio de mão de obra (C_M) deve englobar os dispêndios 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 para o funcionamento desses dois equipamentos. Cabe ainda destacar que ao se definir o custo médio de operação do equipamento (C_{EQ}), pressupõe-se que os custos de lubrificante, combustível e manutenção já estejam diluídos nesse valor.

Ainda dentro dos custos diretos de manutenção, é necessário contabilizar o custo de deslocamento dos equipamentos até o ponto de manutenção, levando em consideração que são veículos auto-tratores. A equação proposta para tal é a seguinte:

$$CD = \left((CS_{rg} + CS_{sc}) \cdot DD \cdot P \right) + \left(C_M \cdot \frac{DD}{V} \right) \quad (4.10)$$

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 se proponha a utilização de equações que estimem o desgaste geométrico da via, é necessário acompanhar as alterações tanto geométricas quanto estruturais, de maneira a monitorar tanto a eficiência do modelo proposto quanto aferir os desgastes das estruturas. Para tanto, a equação proposta é semelhante à 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.

$$CIV = \sum_{i=1}^R \sum_{j=1}^{N-1} \frac{(T_{IV} \cdot C_M \cdot L_i) + (T_{IV} \cdot C_{VI} \cdot L_i) \cdot \left(\frac{MTBT}{MTBT_{Ti}}\right)}{(1+r)^j} \quad (4.11)$$

Onde

CIV = 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 a ser mensurado refere-se ao prejuízo decorrente da paralização do tráfego. Sua definição, porém, está atrelada às características operacionais e financeiras da ferrovia, por isso a formulação apresentada para esse tópico tem caráter ilustrativo, cabendo uma maior adequação segundo as características da empresa. Dessa forma:

$$CPT = (T_{mp} - T_l) \cdot CP \quad (4.12)$$

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 item relativo às manutenções geométricas diz respeito à descarga de lastro complementar na via para compensar o desgaste ocasionado pelo tráfego e pela própria ação de correção geométrica. Ao se corrigir a geometria da via, com o deslocamento da grade para a posição desejada, são criados vazios sob os dormentes que serão preenchidos com o lastro novo lançado na superfície. Dessa forma, o custo é função da área a ser corrigida, e também da maneira como a ferrovia administra essa questão. Sgavioli *et al.* (2015), por exemplo, descreve que na EFVM cada levante de 25 milímetros da grade demanda a descarga de 60 m³ de brita por quilômetro. A equação geral proposta para esse custo é:

$$CDL = Vl_{Km} \cdot Et \cdot C_{Last} + C_{Loc} \cdot T + C_M \cdot T \quad (4.13)$$

Onde

CDL = custo de descarga de lastro, em R\$;

Vl_{Km} = consumo médio de brita para o levante em questão, em m³/km;

Et = extensão do trecho a receber o lastro novo, em km;

C_{Last} = custo de aquisição do lastro, em R\$/m³;

C_{Loc} = custo de locomotiva para uso no trem de manutenção, em R\$/h;

T = tempo de operação, em h;

C_M = custo de mão de obra necessária para operação, em R\$/h.

Quanto às renovações, as estimativas de custo para esses procedimentos devem necessariamente abarcar 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 componente, e, para isso, são propostas algumas equações gerais adaptadas dos trabalhos de Patra *et al* (2008), apresentadas a seguir.

Para renovação de trilhos:

$$CRT = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_t \cdot L_i) + (T_{sti} \cdot C_m \cdot L_i) + (C_{et} \cdot T_{sti} \cdot L_i)) \cdot (m/m_{ti})}{(1+r)^j} \quad (4.14)$$

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 de 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;
 r = taxa de juros;
 j = enésimo período de tempo que está sendo avaliado.

Para renovação de lastro:

$$CRL = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_l \cdot L_i) + (T_{sli} \cdot C_m \cdot L_i) + (C_{el} \cdot T_{sli} \cdot L_i)) \cdot (m/m_{li})}{(1+r)^j} \quad (4.15)$$

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:

$$CRD = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_d \cdot L_i) + (T_{sdi} \cdot C_m \cdot L_i) + (C_{ed} \cdot T_{sdi} \cdot L_i)) \cdot (m/m_{di})}{(1+r)^j} \quad (4.16)$$

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:

$$CRF = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^{N-1} \frac{((C_f \cdot L_i) + (T_{sfi} \cdot C_m \cdot L_i) + (C_{ef} \cdot T_{sfi} \cdot L_i)) \cdot (m/m_{fi})}{(1+r)^j} \quad (4.17)$$

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 é condicionada exclusivamente 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.

Ao final, o somatório dos custos individuais resulta no custo total de renovação.

As equações apresentadas possuem formulações gerais, ou seja, mesmo que os procedimentos avaliados sejam manuais ou automatizados, a relação a ser avaliada é a mesma, cabendo a adequação dos valores correspondentes a cada situação, como os custos de equipamentos, por exemplo.

Caso os dados de custos necessários para a utilização nos modelos não estejam disponíveis, o Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes, desenvolvido pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, intitulado SICRO 3, em seu nono volume, traz composições de custos unitários para serviços e peças de via permanente ferroviárias configurando-se, portanto, como fonte alternativa de informações, com valores estabelecidos para praticamente todos os serviços analisados nessa etapa. É importante destacar que trata-se de um documento elaborado nacionalmente no ano de 2008, logo torna-se necessária a atualização dos valores para a data base de análise, segundo índice adequado.

4.5 Determinação do Ciclo de Correção Geométrica Mais Econômico

Tendo em vista que a cada alteração do tamanho do ciclo de manutenção geométrica tem-se um novo ciclo de renovação, fruto da alteração da vida útil dos materiais, propõe-se que o desenvolvimento desta última etapa ocorra por meio de uma análise de sensibilidade, em que, por meio do uso da equação *IV* (4.8) que estabelece o incremento da vida útil dos materiais, apresentada na terceira etapa do procedimento no Capítulo 4.3, sejam calculados os ciclos de renovação para cada diminuição do ciclo de conserva geométrica.

Desse modo, os ciclos de correção geométrica máximos, determinados como referência para via permanente na primeira etapa, serão reduzidos em uma proporção de 0 a 100%, em intervalos padronizados, e em cada ciclo serão calculadas as vidas úteis dos componentes tendo como base o resultado da referida equação.

Posteriormente, faz-se necessário estabelecer um período padrão de análise dessa conjuntura. Esse período deve ser relativamente extenso tendo em vista que como a vida útil dos materiais é elevada, a medida do impacto de novos ciclos, bem como a contabilização dos custos dos serviços, se dará apenas em períodos longos. Nesse trabalho foi adotado o período de análise de trinta anos, por ser esse o tempo de concessão das ferrovias nacionais.

Tendo esse período estabelecido, o montante de intervenções de manutenções necessário em cada uma das conformações de ciclos de conserva geométrica e de

renovação, deverá ser calculado. Para tanto, o período de trinta anos sob análise foi dividido pela vida útil dos serviços, ou seja, os ciclos de correção geométrica e de renovação estabelecidos em cada uma das variações calculadas pela aplicação da equação 4.8. O número final de intervenções em cada uma das combinações de manutenções geométricas e renovações é o primeiro valor inteiro obtido pelo arredondamento para baixo do resultado obtido na operação descrita, já que como se tratam de atividades, estas só podem ser realizadas por completo, dispensando valores decimais.

Tendo assim estabelecidos o número de intervenções para cada um dos tipos de serviços, já é possível estimar o CCV com manutenções na via permanente para o período analisado. Para isso, basta que os custos unitários estabelecidos na etapa 4 sejam multiplicados pelo correspondente montante de atividades e, posteriormente, os resultados sejam somados em cada uma das combinações de ciclos calculadas.

A combinação que apresentar o menor CCV será aquela cujo ciclo de manutenção geométrica será escolhido como padrão para utilização, configurando-se assim como a política de manutenção mais econômica.

É importante destacar que o procedimento precisa ser realizado para cada um dos cenários estabelecidos na etapa 1, para que se possa analisar qual é o impacto que diferentes padrões administrativos em relação ao tratamento das degradações teria sobre os serviços de manutenção.

Apresentadas essas cinco etapas que formam o procedimento, no próximo Capítulo apresenta-se uma aplicação deste método visando ilustrar sua utilização, sanar possíveis dúvidas quanto ao desenvolvimento de suas etapas, possibilitar a discussão sobre os resultados práticos bem como fomentar aprimoramentos futuros.

5. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO

Para a realização da aplicação apresentada neste Capítulo foram utilizados dados de domínio público advindos da Tese de Doutorado de Rodrigues (2001). O banco de dados disponível é referente à Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), sendo composto por uma série de inspeções geométricas realizadas entre os anos de 1995 e 1997, um cadastro de via com as informações técnicas do traçado, além de um relatório de manutenções realizadas no período em questão. Estes dados estão disponíveis para consulta no CD que compõe o Anexo II deste trabalho.

5.1 Aspectos Gerais e Características do Trecho Ferroviário Estudado

Na época em que o banco de dados foi formado, a EFVM era administrada pela então Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), empresa de mineração. A ferrovia em questão, inicialmente projetada para ligar Vitória, no Espírito Santo (ES) a Diamantina (MG), foi concluída em 1944 pela companhia *Itabira Iron Ore Corporation*, então controladora acionária, com seu traçado retificado para ligar a referida cidade capixaba a cidade de Itabira (MG), tendo como foco principal o escoamento de minério de ferro produzido nas minas de MG. Atualmente a EFVM é administrada pela companhia VALE.

As linhas da EFVM totalizam cerca de 900 km de extensão, sendo os principais trechos destacados na Tabela 5.1:

Tabela 5.1: Linhas principais da EFVM no ano 2000

Linha	Trecho	Extensão (km)
Tronco (via dupla)	Vitória (ES) - Itabira (MG)	542,4
Ramal de Fábrica	D. Drumond (MG) - Fábrica (MG)	179,8
Ramal de B. Horizonte	Costa Lacerda (MG) - Cap. Eduardo (MG)	105,9
Outros	Tubarão	13,8
	CST	1,2
	Barra do Riacho	43,3
	Portocel	2,7
	Piçarrão	16,2
	Conceição	5,6
	João Paulo	4,2
	Itaval	0,3
Total		900,9

Fonte: Rodrigues (2001).

Como já descrito, essa aplicação se apoia em dados coletados em inspeções realizadas entre os anos de 1995 e 1997. Portanto, todas as características apresentadas a seguir são referentes àquelas encontradas nas linhas na época em questão, retiradas do trabalho de Rodrigues (2001) e oriundas de boletins e anuários técnicos produzidos pela própria EFVM.

Quanto à via permanente, esta era formada por uma linha duplicada de bitola métrica (1.000 mm), com trilhos de aço carbono do tipo TR-68 e dormentes de madeira tratada, assentados a uma taxa de 1.852 unidades por quilômetro em cerca de 75% de sua extensão, com fixação dos trilhos sendo predominantemente elástica, e via totalmente lastrada com predominância do uso de brita bitolada. A capacidade de suporte era de 32 toneladas por eixo.

Na linha tronco, na qual se desenvolveu este estudo, a rampa máxima sentido importação é de 1%, e 0,3% no sentido exportação. O raio mínimo de curva é de 110,52 metros, com velocidade média predominante de 60km/h, existindo uma restrição de 45 km/h em um trecho pontual.

Na época em questão, a média de transporte era de 10.408.728 toneladas brutas por mês, sendo que no ano de 1996 foram transportadas 125.220.324 toneladas brutas. O minério de ferro foi a principal mercadoria transportada, respondendo por cerca de 82% do volume total de mercadorias.

Em relação às manutenções, os serviços na via permanente da EFVM eram executados de maneira sistemática e preventiva a partir de prospecções e inspeções visuais e mecanizadas. Esta última, realizada por meio de carro controle modelo EM-80 de fabricação Plasser & Theurer. Também se dispunha de vários equipamentos pesados de manutenção mecanizada da via, do trilho e do lastro, e de outros serviços, garantindo elevada produtividade na realização das manutenções.

Para o planejamento das manutenções, a EFVM utilizava um método de estimativa da condição geométrica pautado em dois índices de qualidade, calculados a partir dos parâmetros alinhamento e nivelamento longitudinal.

Na Tabela 5.2 são apresentados os valores oficiais das vidas úteis médias dos serviços de correção geométrica e dos componentes da via, fornecidos e utilizados pela EFVM.

Tabela 5.2: Vidas úteis dos serviços e componentes da via permanente na EFVM

Especificação	Tipo	Vida Útil (anos)
Serviço	Nivelamento / Alinhamento da Via	1,4
	Desguarnecimento de Lastro	7,0
Material	Trilho	12,0
	Jacaré	4,0
	Agulha	6,0
	Dormente de Madeira	14,0
	Dormente de Madeira para AMV	12,0
	Grampo Elástico	15,0

Fonte: Rodrigues (2001).

Quanto aos custos de manutenção, em 1995 foram gastos US\$ 39,7 milhões na EFVM. Na Tabela 5.3 são descritas em detalhes as despesas com serviços de manutenção realizados nos sete primeiros meses de 1996.

Tabela 5.3: Despesas com manutenção na EFVM em 1996

Discriminação	Acumulado até julho de 1996 em US\$	Média mensal em US\$.
Plataforma, Cortes e Aterros	434.953,00	62.136,14
Obras de Arte Especiais	57.062,00	8.151,71
Obras de Arte Corrente	407.734,00	58.247,71
Passagens e Travessias	163.006,00	23.286,57
Cobertura Vegetal	826.359,00	118.051,30
Proteção da Faixa de Domínio	92.054,00	13.150,57
Outras Despesas	80.034,00	11.433,43
Subtotal Infraestrutura	2.061.202,00	294.457,40
Manutenção de Trilhos	5.626.895,00	803.842,10
Manutenção de Dormentes	3.642.754,00	520.393,40
Manutenção de Lastro	3.439.184,00	491.312,00
Manutenção de AMVs	2.779.316,00	397.045,10
Manutenção de Juntas	652.148,00	93.164,00
Manutenção da Geometria da Via	2.523.562,00	360.508,90
Causas Acidentais	512.231,00	73.175,86
Serviços Complementares	1.837.754,00	262.536,30
Subtotal Superestrutura	21.013.844,00	3.001.978,00
Total	23.075.046,00	3.296.435,00

Fonte: Rodrigues (2001).

Delimitadas, portanto, as principais informações sobre o trecho sob análise, passa-se, a seguir, à aplicação do procedimento proposto.

5.2 Estimativa da Taxa de Degradação Geométrica e do Período Máximo Entre Manutenções

O banco de dados de geometria a partir do qual se desenvolveu esse trabalho é fruto de oito inspeções geométricas executadas por carro controle realizadas entre os anos de 1995 e 1997, do km 29 ao 119 da linha tronco principal Vitória (ES) – Itabira (MG), com medidas dos parâmetros geométricos tomadas a cada meio metro. Os parâmetros geométricos medidos foram a bitola, empeno, superelevação, alinhamento direito e esquerdo, e nivelamento direito e esquerdo. As datas das respectivas inspeções são apresentadas na Tabela 5.4, onde também são definidos os seus respectivos números de registro, cujos dois primeiros algarismos representam o ano da inspeção, e os dois últimos o mês em que foram realizadas.

Tabela 5.4: Data de realização das inspeções geométricas disponíveis

Inspeção número	DATA	
	Via 1	Via 2
9511	20 Nov.1995	24 Nov.1995
9601	12 Jan.1996	09 Jan.1996
9603	23 Mar.1996	18 Mar.1996
9605	20 Mai. 1996	24 Mai.1996
9607	27 Jul.1996	22 Jul.1996
9609	20 Set.1996	16 Set.1996
9612	09 Dez.1996	14 Dez.1996
9703	28 Mar.1997	24 Mar.1997

Fonte: Rodrigues (2001).

Com relação às características da via, se dispõe de um cadastro com as informações planimétricas e altimétricas definidas segundo suas respectivas variações e identificadas a partir da posição quilométrica.

Também está disponível o registro das manutenções realizadas ao longo de todo o trecho no período analisado, onde estão descritos o tipo de serviço realizado, o componente da via afetado, a data inicial e final de realização do procedimento, a posição quilométrica inicial e final onde foi realizado e a via em manutenção.

Em relação ao volume de carga transportado, as Tabelas 5.5 e 5.6 trazem o montante acumulado trafegado entre as inspeções analisadas para a via 1 e 2, respectivamente. Os valores apresentados estão em milhares de toneladas brutas trafegadas.

Tabela 5.5: Volume acumulado de tráfego na via 1

Inspeção número	MTBT
9511	3.805
9601	10.113
9603	27.680
9605	34.202
9607	45.192
9609	59.689
9612	68.357
9703	85.780

Fonte: Rodrigues (2001).

Tabela 5.6: Volume acumulado de tráfego na via 2

Inspeção número	MTBT
9511	8.248
9601	17.419
9603	23.414
9605	38.730
9607	50.057
9609	54.024
9612	74.631
9703	82.739

Fonte: Rodrigues (2001).

Como definido no roteiro do procedimento, esta etapa é composta por quatro subitens, assim, adiante são apresentados os resultados segundo essa ordem.

5.2.1 Item 1: organização dos dados de inspeção

Neste primeiro item, o banco de dados precisa ser organizado de modo a possibilitar sua posterior análise. Os arquivos digitais dessas inspeções estão no formato de texto, em que cada linha representa um ponto de medição, onde constam as seguintes informações:

- RAMAL - 2 dígitos;
- VIA - 3 dígitos;
- Km - 4 dígitos;
- METRO - 4 inteiros e 1 decimal;

- Curva/Tangente - 1 dígito;
- Medida da bitola - 3 inteiros e 4 decimais;
- Medida do empeno - 3 inteiros e 4 decimais;
- Medida da superelevação - 3 inteiros e 4 decimais;
- Medida do alinhamento direito - 3 inteiros e 4 decimais;
- Medida do alinhamento esquerdo - 3 inteiros e 4 decimais;
- Medida do nivelamento direito - 3 inteiros e 4 decimais;
- Medida do nivelamento esquerdo - 3 inteiros e 4 decimais;

Para exemplificar tal conformação, apresenta-se a primeira linha da inspeção 9511: LT1 002900000C 0213200-0001562-0027382-0004301 0002736 0001955-0009777.

Como as inspeções foram realizadas entre os quilômetros 29 e 119 das vias 1 e 2, cada arquivo de inspeção possui cerca de 360.000 linhas, com 13 campos cada uma, totalizando 4.680.000 dados. Esses dados precisam ser adequadamente separados, e para isso, utilizou-se uma ferramenta de exportação de dados da planilha eletrônica Excel, em que é possível separar em colunas cada um dos dados observados.

Feito esse processo, o resultado para o exemplo anterior fica conformado como apresentado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Exemplo de conformação do banco de dados após conversão dos arquivos de texto

Contagem	Ramal	Via	Km	Metro	Cv/Tg	Bitola	Emp.	Super.	Ali. dir.	Ali. esq.	Niv. dir.	Niv. esq.
1	LT	1	29	0	C	21,32	-0,1562	-2,7382	-0,4301	0,2736	0,1955	-0,9777

Após essa etapa é necessário que a seção completa da via entre o km 29 e 119, seja dividida em trechos correspondentes a seções de mesma planimetria, ou seja, a cada mudança de um curva para uma tangente e vice versa, será demarcado um novo trecho. Como resultado dessa etapa, a partir das informações contidas no cadastro de via, foram definidos 592 trechos, sendo 296 na via 1 e 296 na via 2.

Nesse ponto, todo o banco de dados já está em uma conformação adequada às análises, podendo o procedimento passar a trabalhar apenas nas inspeções que serão analisadas na determinação da degradação geométrica.

Para a determinação da taxa de degradação geométrica é necessário buscar trechos que não tenham sofrido qualquer tipo de intervenção de manutenção entre a primeira e a última inspeção da série disponível e que ainda não tenham erros de medição em seus registros.

Como resultado, as Tabelas 5.8 e 5.9 apresentam os trechos selecionados para via 1 e 2 respectivamente, nas inspeções 9511 e 9703.

Tabela 5.8: Trechos selecionados na via 1

Trecho	Posição (km + m)	Extensão (m)	Planimetria
51	43+27 ao 43+170	143	C
52	43+170 ao 43+504	334	T
53	43+504 ao 43+622	118	C
54	43+622 ao 44+240	618	T
118	63+216 ao 63+338	122	T
120	63+600 ao 63+783	183	T
121	63+783 ao 64+29	246	C
218	88+101 ao 88+425	324	T
224	90+188 ao 91+39	851	T
236	96+877 ao 97+964	1087	T
238	98+21 ao 98+160	139	T
287	115+853 ao 116+485	632	C
288	115+485 ao 115+633	148	T

Tabela 5.9: Trechos selecionados na via 2

Trecho	Posição (km + m)	Extensão (m)	Planimetria
328	37+224 ao 37+398	174	T
329	37+398 ao 37+715	317	C
330	37+715 ao 38+634	919	T
331	38+634 ao 38+864	230	C
332	38+864 ao 39+180	316	T
349	43+504 ao 43+622	118	C
375	50+831 ao 51+34	203	C
376	51+34 ao 51+590	556	T
380	52+243 ao 52+397	154	T
382	52+713 ao 53+249	536	T

(continuação)

Trecho	Posição (km + m)	Extensão (m)	Planimetria
403	58+748 ao 58+951	203	C
429	66+975 ao 67+422	447	C
431	67+516 ao 67+760	244	C
432	67+760 ao 67+896	136	T
531	96+794 ao 96+877	83	T
574	114+002 ao 114+157	155	T
575	114+157 ao 114+361	247	C
577	114+461 ao 114+686	225	C
578	114+686 ao 114+819	133	T
579	114+819 ao 115+39	220	C

Destacando os resultados, para a via 1 foram definidas 4 curvas (C) e 9 tangentes (T), totalizando 4.945 metros de extensão, e na via 2 foram definidas 10 curvas e 10 tangentes, com extensão total de 5.616 metros.

Seguindo com a aplicação do procedimento, tendo definidos os trechos, os dados foram agrupados segundo os cenários previstos, em planilhas diferentes, formando assim: um trecho contínuo em que a via será analisada como homogênea em sua extensão; separados em dois grupos tendo como critério a reunião de todas as curvas e de todas as tangentes; e por fim, as curvas foram separadas uma a uma, com seus respectivos dados. Esse procedimento foi realizado para a via 1 e 2. Como resultado, foram geradas 6 planilhas para a via 1, e 12 planilhas para a via 2.

Como último procedimento desse item, as medidas de geometria de cada um dos parâmetros medidos em cada uma das planilhas anteriores foram divididas entre positivas e negativas, dando origem assim a 12 grupos de dados para a via 1, e 24 grupos de dados para a via 2.

5.2.2 Item 2: cálculo da condição da via permanente

Para cada um dos cenários fruto da organização feita nos dados no item precedente, foram geradas planilhas independentes para a via 1 e 2, em que cada uma delas traz o resultado do índice para cada um dos sete parâmetros geométricos na inspeção 9511 e 9703. Em resumo, ao término desse processo, foram geradas 204 planilhas para análise

da evolução dos desvios geométricos. Como exemplo, apresenta-se na Tabela 5.10, a planilha com os resultados para o cenário: via 1 sem divisão, com média superior da distribuição normal calculada a partir de valores positivos.

Tabela 5.10: Resultado da condição geométrica da via 1 na primeira e última inspeções da série disponível

MTBT	Insp.	Parâmetro - desvio em mm						
		Bitola	Empeno	Super.	Alinha. dir.	Alinha. esq.	Niv. dir.	Niv. esq.
3806	9511	6,652	1,741	1,464	1,328	1,22	1,049	0,909
85781	9703	6,128	2,143	1,735	1,572	1,515	1,11	0,796

5.2.3 Item 3: estimativa da recuperação da qualidade da via pelos serviços de manutenção

Para a estimativa da recuperação da via foram selecionados trechos da linha que sofreram alguma intervenção geométrica entre inspeções consecutivas. Essa seleção se deu por meio do uso do registro de manutenções realizadas no trecho, disponível do banco de dados.

Como resultado, foram delimitados quatro trechos, apresentados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Trechos selecionados para estimativa da capacidade de recuperação da via

Via	Trecho (km + m)	Extensão (m)	Inspeção anterior	Inspeção posterior
1	km 65+502 ao 66+38	536	9511	9601
1	km 71+000 ao 72+999,5	1999,5	9607	9609
2	km 72+000 ao 72+996	996	9607	9609
2	km 73+000 ao 73+999,5	999,5	9607	9609

Desse modo, para essas quatro seções da via foram geradas 48 planilhas fruto do mesmo tipo de procedimento utilizado para as planilhas definidas no subitem anterior. Em cada uma delas foi estabelecida a condição da via antes e após os serviços de manutenção, seguindo também o mesmo processo utilizado no item 1 dessa etapa.

A partir desses dados, foi calculada a proporção dos desvios que foi recuperada para cada um dos parâmetros geométricos em cada um dos cenários observados, gerando

assim, quatro planilhas correspondendo cada uma aos quatro trechos selecionados e estudados. Como exemplo, apresenta-se na Tabela 5.12 os resultados obtidos para o trecho do km 65.

Tabela 5.12: Recuperação da via para o trecho do km 65 via 1

Dados	Bitola	Empeno	Super.	Alinha. dir.	Alinha. esq.	Niv. dir.	Niv. esq.
geral pos.	51%	3%	19%	-4%	-1%	23%	28%
geral neg.	-	10%	11%	-5%	-14%	24%	24%
tg pos.	-3%	10%	-	-	-	20%	-94%
tg neg.	-	78%	-	-63%	30%	90%	-
cv pos.	51%	2%	19%	-4%	-1%	23%	30%
cv neg.	-	10%	7%	-5%	-16%	24%	24%

Na Tabela 5.12 os valores em porcentagem significam a proporção de redução do desvio após o serviço de manutenção, ou seja, para o parâmetro bitola, por exemplo, ocorreu uma redução de 51% do desvio após as manutenções, analisando as medidas positivas do trecho tomado como um segmento único e homogêneo. Os valores negativos representam parâmetros que ao invés de serem reduzidos após os serviços de manutenção, aumentaram. E os valores ausentes representam erros de medição ou dados incoerentes.

Para utilização no método, entretanto, é necessário que se tenha apenas um valor de referência para cada parâmetro. Desse modo, as quatro planilhas foram reunidas e a proporção de recuperação dos serviços de manutenção para cada parâmetro foi calculada a partir da média aritmética dos resultados obtidos, como estabelecido no roteiro do procedimento. Os valores resultantes são apresentados na Tabela 5.13.

Tabela 5.13: Proporção final de recuperação da via pelos serviços de manutenção geométrica

Bitola	Empeno	Super.	Alinha. dir.	Alinha. esq.	Niv. dir.	Niv. esq.
8,97%	5,78%	4,38%	6,55%	8,10%	13,93%	7,91%

5.2.4 Item 4: definição da taxa de desgaste e do ciclo de manutenção máximo

Este é o último subitem da primeira etapa e consiste, a partir das informações até agora estabelecidas, em determinar a taxa de evolução dos desvios geométricos da via nos diversos cenários estabelecidos em função do volume de carga trafegada.

Faz-se necessário preliminarmente, delimitar as tolerâncias geométricas para o trecho em questão e também calcular qual será o desvio remanescente de cada um dos parâmetros geométricos após a realização das manutenções, cálculo esse realizado pela aplicação das proporções estabelecidas no subitem precedente.

Desse modo, sendo a EFVM classificada como ferrovia classe 3, já que na época em que as inspeções foram realizadas os trens eram operados com velocidade média em torno de 60 km/h, as correspondentes tolerâncias geométricas estabelecidas para essa classe de ferrovia são apresentadas na Tabela 5.14. Nessa mesma Tabela também são apresentados os resultados para o cálculo dos desvios geométricos remanescentes após as manutenções.

Tabela 5.14: Tolerâncias geométricas para ferrovia classe 3 (25 – 64 km/h) e desvios geométricos remanescentes após conserva geométrica

Parâmetros	Tolerâncias (mm)	Correção dos desvios (%)	Desvios remanescentes após manutenções (mm)
Bitola	+20 -5	8,97%	+18,2 -4,6
Empeno	+/- 9,1	5,78%	+/- 8,6
Superelevação	+/- 12	4,38%	+/- 11,5
Alinha. Dir.	+/- 10	6,55%	+/- 9,4
Alinha. Esq.	+/- 10	8,10%	+/- 9,2
Niv. Dir.	+/- 4,5	13,93%	+/- 3,9
Niv. Esq.	+/- 4,5	7,91%	+/- 4,1

A partir desses valores e tomando como referência para o tráfego mensal médio para a via 1 e 2, os valores de 5.555.128 e 4.853.600 toneladas brutas, respectivamente, foi calculada a taxa de desgaste e o tempo necessário para que os desvios geométricos evoluíssem até as tolerâncias seguindo as três equações definidas para essa etapa no roteiro do procedimento. Esse cálculo foi realizado para todos os cenários estabelecidos no subitem 2. Como o montante de dados é significativamente elevado, não convém apresentar aqui todos os resultados, por isso nas Tabelas 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19 e 5.20, são apresentados apenas os parâmetros que evoluem mais rapidamente até a tolerância de manutenção em cada um dos cenários, sendo que aquele mais rápido dentre estes selecionados está destacado em negrito, representando, portanto, aquele parâmetro que precisará ser observado para a determinação do ponto de intervenção crítico, que determina a vida útil da conserva geométrica.

Tabela 5.15: Ciclos de manutenção para a via 1 sem divisão

Tipo de índice	Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		TD (mm/MTBT)	CM (meses)
				9511	9703		
Superior	Via 1	positivo	Empeno	1,741	2,143	4,70E-06	20,19
Superior	Via 1	negativo	Empeno	-1,528	-1,895	-4,30E-06	22,16
Inferior	Via 1	positivo	Empeno	1,535	1,882	4,00E-06	23,41
Inferior	Via 1	negativo	Empeno	-1,74	-2,148	-4,80E-06	19,93
Média	Via 1	positivo	Empeno	1,638	2,013	4,40E-06	21,68
Média	Via 1	negativo	Empeno	-1,634	-2,021	-4,50E-06	20,99

Tabela 5.16: Ciclos de manutenção para a via 1 dividida em curva e tangente

Tipo de índice	Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		TD (mm/MTBT)	CM (meses)
				9511	9703		
Superior	cv	positivo	Empeno	1,877	2,244	4,28E-06	22,12899
Superior	cv	negativo	Alin d	-1,116	-1,491	-4,38E-06	26,88731
Inferior	cv	positivo	Bitola	9,909	10,591	7,95E-06	40,58294
Inferior	cv	negativo	Niv e	0,79	0,585	-2,39E-06	26,83214
Média	cv	positivo	Bitola	10,358	11,073	8,34E-06	38,70885
Média	cv	negativo	Niv e	0,914	0,682	-2,70E-06	23,70305
Superior	tg	positivo	Empeno	1,748	2,172	4,94E-06	19,17793
Superior	tg	negativo	Empeno	-1,476	-1,868	-4,56E-06	20,77358
Inferior	tg	positivo	Empeno	1,515	1,869	4,12E-06	22,98697
Inferior	tg	negativo	Empeno	-1,714	-2,153	-5,12E-06	18,51375
Média	tg	positivo	Empeno	1,632	2,02	4,53E-06	20,9104
Média	tg	negativo	Empeno	-1,595	-2,01	-4,84E-06	19,57867

Tabela 5.17: Ciclos de manutenção para as curvas na via 1

Tipo de índice	Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		TD (mm/MTBT)	CM (meses)
				9511	9703		
Superior	51	positivo	Bitola	16,989	19,42	2,83E-05	8,543245
Superior	51	negativo	Super	-0,974	-1,466	-5,74E-06	16,46364
Inferior	51	positivo	Empeno	1,135	1,8	7,76E-06	12,20633
Inferior	51	negativo	Empeno	-2,959	-3,804	-9,85E-06	9,616214
Média	51	positivo	Bitola	14,799	16,939	2,49E-05	9,704552
Média	51	negativo	Empeno	-2,272	-2,766	-5,75E-06	16,46497
Superior	53	positivo	Bitola	4,941	8,096	3,68E-05	8,775287
Superior	53	negativo	Alin e	-0,46	-1,529	-1,25E-05	11,71403
Inferior	53	positivo	Bitola	4,506	6,693	2,55E-05	9,495399
Inferior	53	negativo	Alin e	-0,981	-3,077	-2,44E-05	5,968977
Média	53	positivo	Bitola	4,723	7,395	3,11E-05	10,36581
Média	53	negativo	Alin e	-0,721	-2,303	-1,84E-05	7,908244
Superior	121	positivo	Empeno	2,283	2,923	7,46E-06	12,69722
Superior	121	negativo	Empeno	-1,348	-1,621	-3,18E-06	29,78733

(continuação)

Tipo de índice	Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		TD (mm/MTBT)	CM (meses)
				9511	9703		
Inferior	121	positivo	Empeno	1,363	1,623	3,03E-06	31,20863
Inferior	121	negativo	Empeno	-2,52	-2,848	-3,82E-06	24,78662
Média	121	positivo	Empeno	1,823	2,273	5,25E-06	18,05057
Média	121	negativo	Empeno	-1,934	-2,235	-3,50E-06	27,05786
Superior	287	positivo	Alin d	1,442	1,961	6,05E-06	19,48246
Superior	287	negativo	Alin d	-0,957	-1,289	-3,87E-06	30,45385
Inferior	287	positivo	Alin d	0,954	1,29	3,92E-06	30,09197
Inferior	287	negativo	Alin d	-1,45	-1,939	-5,70E-06	20,676
Média	287	positivo	Alin d	1,198	1,625	4,98E-06	23,65193
Média	287	negativo	Alin d	-1,204	-1,614	-4,78E-06	24,62999

Tabela 5.18: Ciclos de manutenção para a via 2 sem divisão

Tipo de índice	Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		TD (mm/MTBT)	CM (meses)
				9511	9703		
Superior	Via 2	positivo	Empeno	1,944	2,351	4,75E-06	19,94047
Superior	Via 2	negativo	Empeno	-1,911	-2,401	-5,70E-06	16,59864
Inferior	Via 2	positivo	Empeno	1,717	2,106	4,54E-06	20,87975
Inferior	Via 2	negativo	Empeno	-1,911	-2,401	-5,70E-06	16,59864
Média	Via 2	positivo	Empeno	1,83	2,229	4,64E-06	20,39931
Média	Via 2	negativo	Empeno	-1,801	-2,275	-5,50E-06	17,14986

Tabela 5.19: Ciclos de manutenção para a via 2 dividida em curva e tangente

Tipo de índice	Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		TD (mm/MTBT)	CM (meses)
				9511	9703		
Superior	cv	positivo	Empeno	2,079	2,489	4,77E-06	19,84709
Superior	cv	negativo	Empeno	-1,702	-2,169	-5,40E-06	17,39205
Inferior	cv	positivo	Bitola	9,91	11,114	1,40E-05	23,00576
Inferior	cv	negativo	Niv d	1,06	1,009	-5,90E-07	191,0853
Média	cv	positivo	Bitola	10,408	11,551	1,33E-05	18,17084
Média	cv	negativo	Niv d	1,168	1,1	-8,00E-07	141,3251
Superior	tg	positivo	Empeno	1,913	2,316	4,69E-06	20,17951
Superior	tg	negativo	Empeno	-1,582	-2,007	-5,00E-06	19,1109
Inferior	tg	positivo	Empeno	1,605	1,978	4,35E-06	21,78822
Inferior	tg	negativo	Empeno	-1,9	-2,393	-5,70E-06	16,47652
Média	tg	positivo	Empeno	1,759	2,147	4,52E-06	20,95303
Média	tg	negativo	Empeno	-1,741	-2,2	-5,40E-06	17,69621

Tabela 5.20: Ciclos de manutenção para as curvas na via 2

Tipo de índice	Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		TD (mm/MTBT)	CM (meses)
				9511	9703		
Superior	329	positivo	Empeno	1,909	2,479	6,65E-06	14,25143
Superior	329	negativo	Super	-0,844	-1,208	-4,30E-06	22,24656
Inferior	329	positivo	Empeno	1,176	1,557	4,45E-06	21,30106
Inferior	329	negativo	Empeno	-1,963	-2,597	-7,40E-06	12,81278
Média	329	positivo	Empeno	1,542	2,018	5,55E-06	17,07732
Média	329	negativo	Empeno	-1,582	-2,081	-5,80E-06	16,28386
Superior	331	positivo	Empeno	2,09	2,467	4,40E-06	21,53607
Superior	331	negativo	Empeno	-1,212	-1,635	-4,90E-06	19,20983
Inferior	331	positivo	Empeno	1,111	1,405	3,42E-06	27,66523
Inferior	331	negativo	Empeno	-2,09	-2,821	-8,50E-06	11,11978
Média	331	positivo	Empeno	1,601	1,936	3,91E-06	24,21889
Média	331	negativo	Empeno	-1,651	-2,228	-6,70E-06	14,08584
Superior	349	positivo	Empeno	3,161	4,015	9,96E-06	9,50961
Superior	349	negativo	Super	-1,023	-1,214	-2,20E-06	42,62438
Inferior	349	positivo	Empeno	1,314	1,558	2,84E-06	33,39027
Inferior	349	negativo	Empeno	-3,358	-4,193	-9,70E-06	9,739642
Média	349	positivo	Empeno	2,238	2,787	6,40E-06	14,80323
Média	349	negativo	Empeno	-2,362	-2,824	-5,40E-06	17,58009
Superior	375	positivo	Bitola	11,489	15,805	5,03E-05	6,414597
Superior	375	negativo	Empeno	-0,972	-1,615	-7,50E-06	12,64383
Inferior	375	positivo	Bitola	8,139	11,76	4,22E-05	7,648063
Inferior	375	negativo	Niv e	-1,072	-2,237	-1,40E-05	4,720602
Média	375	positivo	Bitola	9,814	13,782	4,63E-05	6,977235
Média	375	negativo	Niv e	-0,818	-1,552	-8,60E-06	7,4855
Superior	403	positivo	Super	2,432	3,284	9,93E-06	9,525377
Superior	403	negativo	Empeno	-1,607	-1,871	-3,10E-06	30,79759
Inferior	403	positivo	Super	1,324	1,693	4,30E-06	21,97366
Inferior	403	negativo	Empeno	-2,979	-3,415	-5,10E-06	18,67008
Média	403	positivo	Super	1,878	2,489	7,12E-06	13,28977
Média	403	negativo	Empeno	-2,293	-2,643	-4,10E-06	23,24724
Superior	431	positivo	Bitola	16,161	18,896	3,19E-05	10,12353
Superior	431	negativo	Empeno	-1,694	-1,947	-2,90E-06	32,15313
Inferior	431	positivo	Bitola	13,717	16,023	2,69E-05	12,00763
Inferior	431	negativo	Empeno	-2,811	-3,441	-7,30E-06	12,90091
Média	431	positivo	Bitola	14,939	17,459	2,94E-05	10,98538
Média	431	negativo	Empeno	-2,252	-2,694	-5,10E-06	18,41365
Superior	575	positivo	Empeno	2,432	3,197	8,91E-06	10,62518
Superior	575	negativo	Super	-1,079	-1,519	-5,10E-06	18,44131
Inferior	575	positivo	Empeno	1,246	1,794	6,39E-06	14,83009
Inferior	575	negativo	Super	-1,946	-2,693	-8,70E-06	10,85592
Média	575	positivo	Empeno	1,839	2,495	7,65E-06	12,38033
Média	575	negativo	Super	-1,513	-2,106	-6,90E-06	13,66664
Superior	577	positivo	Super	1,396	2,392	1,16E-05	8,138046
Superior	577	negativo	Empeno	-1,04	-1,657	-7,20E-06	13,15974

(continuação)

Tipo de índice	Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		TD (mm/MTBT)	CM (meses)
				9511	9703		
Inferior	577	positivo	Alin d	0,759	1,399	7,46E-06	15,79889
Inferior	577	negativo	Niv e	-0,746	-1,47	-8,40E-06	7,589021
Média	577	positivo	Super	1,117	1,881	8,91E-06	10,61346
Média	577	negativo	Empeno	-1,441	-2,249	-9,40E-06	10,05072
Superior	579	positivo	Empeno	2,292	3,06	8,95E-06	10,58493
Superior	579	negativo	Super	-0,837	-1,331	-5,80E-06	16,42859
Inferior	579	positivo	Empeno	1,3	1,728	4,99E-06	18,99137
Inferior	579	negativo	Super	-1,634	-2,557	-1,10E-05	8,790283
Média	579	positivo	Empeno	1,796	2,394	6,97E-06	13,59347
Média	579	negativo	Super	-1,235	-1,944	-8,30E-06	11,45269

Estabelecidos esses resultados, o procedimento avança para a segunda etapa.

5.3 Definição da Vida Útil Padrão dos Componentes na Via Permanente

As informações sobre os serviços de manutenção realizados na via permanente disponíveis no banco de dados da EFVM estão restritas ao período de análise, o que inviabiliza que sejam desenvolvidas estimativas empíricas sobre o período de utilização dos materiais. Entretanto, o banco de dados apresenta valores para a vida útil dos componentes definidos pela própria companhia, já apresentados na tabela 5.2, sendo os principais a vida útil dos trilhos, de 12 anos; dos dormentes, 14 anos; e dos grampos elásticos, entendendo-se aqui como fixação, de 15 anos. Desse modo, por se entender que esses valores são estabelecidos segundo a necessidade pela substituição dos itens no trecho em estudo, estes serão adotados para o desenvolvimento das etapas subsequentes deste procedimento.

Entretanto, visando analisar como tais valores foram estabelecidos, bem como ilustrar a utilização das equações propostas para essa etapa caso não se dispusesse de valores oficiais, foram calculadas as vidas úteis dos materiais da via segundo as formulações estabelecidas no roteiro do procedimento.

Para trilhos, foi utilizada inicialmente a equação para estimar a vida útil por desgaste:

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

Substituindo pelos valores, tem-se o resultado:

$$VUTrilhos = 1,3544 \cdot 1,1500 \cdot 1,0000 \cdot 0,9655 \cdot 0,3800 \cdot 0,7739 \cdot 0,9100 \cdot 1,1056 \\ \cdot 1,1859 \cdot 1,932 \cdot 68 \cdot 62,959^{0,565}$$

$$VUTrilhos = 720,0085$$

$$VUTrilhos = \frac{720,0085}{62,959}$$

$$VUTrilhos = 11,4 \text{ anos}$$

A vida útil estimada é de 11,4 anos, valor muito próximo ao oficial, possibilitando inferir desse modo, que os trilhos são trocados na EFVM em função do desgaste.

Da mesma forma para os dormentes:

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

$$VUDormente = 2,0230 \cdot 1,0300 \cdot 1,1500 \cdot 0,9655 \cdot 1,0185 \cdot 0,6764 \cdot 1,1050 \\ \cdot e^{(2,3569-0,0350 \cdot 2,027668)} \cdot 62,959^{-0,1553396}$$

$$VUDormente = 9,1 \text{ anos}$$

Para os dormentes, a vida útil estimada foi significativamente diferente do valor oficial. Sabe-se que a formulação da equação proposta para dormentes foi desenvolvida a partir de dados históricos de diversas superintendências da antiga RFFSA, e que na maioria destas os dormentes foram substituídos pela degradação da madeira em função do apodrecimento de sua estrutura (RODRIGUES, 1983). Desse modo, é possível que esta

equação, apesar do produtório de fatores buscar estabelecer características próprias da ferrovia sob análise, guarde por meio de seus índices fixos algum tipo de influência das características que lhe deram suporte, o que justificaria o resultado que destoa do valor oficial, haja vista que as condições das linhas da EFVM são reconhecidamente boas, inclusive quanto às estruturas de drenagem.

Para os demais componentes, os valores calculados são apresentados na Tabela 5.21.

Tabela 5.21: Vidas úteis estimadas para os demais componentes

Componentes	Vidas úteis	Vidas úteis estimadas (anos)
Tala de junção, porcas, parafusos, e arruelas	1,07 VUT	12,198
Placa de apoio	1,73 VUT	19,722
Fixações	0,88 VUT	10,032
Retensores	1,17 VUT	13,338
AMVs	0,71 VUT	8,094

A partir desses resultados, portanto, percebe-se, a exceção dos trilhos, que os valores calculados destoam sobremaneira daqueles oficiais, sendo assim, justifica-se a opção de adotar os valores definidos pela própria empresa.

A vida útil do lastro está condicionada ao ciclo de correção geométrica, e como não se tem nesse momento uma definição quanto ao ciclo que será adotado, esta definição será feita na última etapa deste procedimento. Contudo, de maneira ilustrativa, tomando como base o ciclo padrão de correção geométrica adotado pela EFVM, de 16 meses, o lastro seria completamente renovado após o quinto serviço de correção geométrica, o que ocorreria em 80 meses, ou 6,7 anos.

5.4 Quantificação do Aumento da Vida Útil dos Componentes Segundo a Diminuição dos Intervalos de Correção Geométrica

O primeiro passo desta etapa consiste em buscar no banco de informações de manutenções, trechos que tenham sofrido duas intervenções de conserva geométrica dentro do período que compreende a série de inspeções disponíveis, e que tenham sido realizadas em um intervalo menor que aquele padrão adotado pela empresa, no caso, 16 meses. Nessas condições foram identificados três trechos: trecho km 32+200 até o km

34+920 da via 2, que teve manutenções consecutivas em um intervalo de 14 meses, que compreende as inspeções 9511 e 9609; trecho km 69+360 ao km 70+100 da via 1, com manutenções realizadas em um intervalo de 6 meses, que compreende as inspeções 9605 e 9609; e trecho km 105+740 ao 112+920 da via 1, com manutenções realizadas em um intervalo de 4 meses compreendendo as inspeções 9607 e 9609.

Fez-se menção às inspeções que foram realizadas, com destaque principalmente para aquela realizada antes do serviço de manutenção, pois é essa última que permite avaliar qual a condição em que a via se encontrava antes da realização da conserva geométrica.

Nesses trechos selecionados foram realizados os mesmos procedimentos desenvolvidos para a definição dos ciclos de manutenção no subitem 4 da etapa 1.

Desse modo tomando como referência os ciclos de menor valor que foram estabelecidos naquela etapa, foram estabelecidas as proporções de redução da tolerância (*RT*), e as proporções de redução do ciclo (*RC*). Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5.22 e 5.23.

Tabela 5.22: Cálculo de RT e RC para a via 1

Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		Proporção de redução		Ciclo padrão
			9605	9609	RT	RC	
Via 1	negativo	Empeno	-2,456	-2,578	72%	70%	19,93
cv	positivo	Empeno	2,397	2,392	74%	73%	22,129
tg	negativo	Empeno	-2,006	-2,116	77%	78%	18,514

Tabela 5.23: Cálculo de RT e RC para a via 2

Trecho	Tipo de dado	Parâmetro	Geometria		Proporção de redução		Ciclo padrão
			9605	9609	RT	RC	
Via 2	negativo	Empeno	-1,436	-1,898	79%	16%	16,59
cv	negativo	Empeno	-1,809	-5,41E-06	80%	20%	17,39
tg	negativo	Empeno	-1,434	-1,851	80%	15%	16,48

Não foi possível estabelecer as proporções de correção curva a curva, pois seria necessário que os trechos analisados na etapa 1 tivessem sofrido algum tipo de intervenções dentro das características estabelecidas nesta etapa para que fosse possível fazer uma correspondência coerente entre os tipos de cenários analisados, o que não ocorreu.

A partir das proporções de redução das tolerâncias e dos ciclos calculados, e aplicando a equação IV (4.8) estabelecida no roteiro do procedimento na terceira etapa, é possível calcular a redução da tolerância para qualquer ciclo de manutenção e posteriormente estimar o aumento da vida útil dos componentes para qualquer frequência de ciclo de manutenção. Essa estimativa será feita na quinta etapa da aplicação deste procedimento.

5.5 Estimativa de Custos de Realização dos Serviços de Manutenção da Via Permanente

Em função da inexistência de informações sobre os custos unitários de realização dos serviços de manutenções na banco de dados da EFVM, a aplicação das equações propostas no roteiro do procedimento ficou inviabilizada.

Desse modo, os custos tanto de manutenção geométrica quanto de renovação foram estabelecidos com base no manual de composições de custos SICRO (2008). Neste manual estão disponíveis os custos unitários de todos os componentes bem como dos serviços necessários para a realização de cada tipo de manutenção.

Assim, para correção geométrica, dois são os custos: o custo direto de realização do serviço e o custo de descarga de lastro complementar. Nas tabelas 5.24 e 5.25, ambos são estabelecidos.

Lembrando que para o lastro, são necessários cerca de 60 m³ a cada quilômetro nos serviços de correção geométrica.

A partir desses custos unitários foi calculado o valor referente à execução de uma conserva geométrica completa em toda a extensão dos trechos analisados, resultando em um valor de R\$49.995,12 para a via 1, e R\$51.825,07 para a via 2.

Para os custos de renovação, foram selecionadas as composições de custos em função dos materiais e de acordo com a dinâmica de manutenções realizada na EFVM. Desse modo, para os trilhos, foi utilizada a composição apresentada na Tabela 5.26, e, como na EFVM são utilizados trilhos soldados, os valores relativos as talas de junção dessa composição foram desconsiderados, e foi tomado como referência o custo de solda das

barras na via permanente, demonstrado na Tabela 5.27. A quantidade de trilhos, e o número de horas necessárias tanto para a posicionadora de trilhos quanto para o trabalhador de via, são definidos em função da extensão a receber manutenção, e o número de soldas é estabelecido em função da quantidade de barras de trilhos necessárias. Para renovação de dormentes e de lastro, as composições utilizadas são apresentadas nas Tabelas 5.28 e 5.29, respectivamente.

Tabela 5.24: Custo unitário para serviços de correção geométrica

1006382 Regularização, Socaria, Nivelamento e Alinhamento Mecanizado, Via Corrida, de 21 a 30cm de Lastro, bit. métrica ou larga qq. dormente:-KM					
Cód.	Discriminação	Un.	Coef. Unitário	Preço Unitário	Preço
9710	Socadora Automática de Linha (300 kW)	h	8	622,38	4979,04
9712	Reguladora e Distribuidora de Lastro (300 kW)	h	8	273,79	2190,32
	Total de Equipamento				7169,36
9859	Trabalhador de Via	h	16	7,83	125,2797
9873	Auxiliar de Topografia	h	8	7,83	62,6398
	Total de Mão de Obra				187,9195
	Total do Serviço				7357,28

Fonte: SICRO (2008)

Tabela 5.25: Custo unitário para serviços de descarga complementar de lastro

1006337 Lançamento Complementar ao Pré-Lançamento do Lastro, B. Métrica, qq. altura de lastro, descarga de Pedra Britada de Vagões:-KM					
Cód.	Discriminação	Un.	Coef. Unitário	Preço Unitário	Preço
2356	Brita Padrão para Lastro Ferroviário	m ³	60	40	2400
9743	Locomotiva Diesel-Elétrica 1800 HP (1343 kW)	h	2	329	658,46
9859	Trabalhador de Via	h	14	7,83	109,6197
	Total de Mão de Obra				109,6197
	Total do Serviço				3277,6994

Fonte: SICRO (2008)

Tabela 5.26: Custo unitário de assentamento de trilhos

1005952 Assentamento Mecanizado de Trilhos, TR68, comprimento de 120m, c/ 6 furos, Bitola Métrica ou Larga:-KM					
Cód.	Discriminação	Un.	Coef. Unitário	Preço Unitário	Preço
2229	Tala de Junção TJ 68, não Isolada, c/ 6 Furos	par	16,67	349,85	5832
2233	Parafuso c/ Porca e Arruela de Pressão p/ Tala de Junção	cj.	100	20	2000
	Total de material				7832
9727	Posicionadora de Trilhos (7.4 kW)	h	8	27,27	218,16
9859	Trabalhador de Via	h	103,6	7,83	811,186
	Total de Mão de Obra				811,186
5906	Barra de Trilhos TR 68, com 120 m de comprimento		135,12	3747,644	506381,7
	Total do serviço				515243

Fonte: SICRO (2008)

Tabela 5.27: Custo unitário de solda em trilhos

1006403 Solda Aluminotérmica, na Via, de Barras de Trilhos TR68, comp. superior a 120m, p/ formação de Trilho Longo Soldado: -UN					
Cód.	Discriminação	Un.	Coef. Unitário	Preço Unitário	Preço
2280	Porção de Solda Aluminotérmica para Trilho TR68	Un.	1,03	238,6	245,758
2362	Kit para Solda Aluminotérmica de Trilho TR 68	cj.	1,03	59,64	61,4292
	Total de material				307,1872
9687	Caminhão Carroceria - cap.4 t - (110kW)	h	0,5	57,33	28,665
9731	Tirefonadora (3.7 kW)	h	0,55	19,37	10,6535
9735	Máquina p/ Serrar Trilho (3.7 kW)	h	0,45	19,35	8,7075
9738	Máquina de Esmerilhar Topo e Lateral de Boletto (4.4 kW)	h	0,6	18,03	10,818
9739	Rebarbadora de Solda de Trilho	h	0,45	14,24	6,408
	Total de Equipamento				65,252
9825	Soldador	h	0,95	11,6997	11,1147
9859	Trabalhador de Via	h	3,8	7,83	29,7539
	Total de Mão de Obra				40,8687
	Total do Serviço				413,3078

Fonte: SICRO (2008)

Tabela 5.28: Custo unitário para instalação de dormentes

1006078 Assentamento Mecanizado (c/Pórtico) Dormentes Madeira, Bitola Métrica, c/1850 dorm./km, fix. elástica, trilho TR68, qq comp:-KM					
Cód.	Discriminação	Un.	Coef. Unitário	Preço Unitário	Preço
2207	Tirefond 24x188mm	Un.	7400	1,83	13542
2212	Arruela de Pressão para Tirefond	Un.	7400	0,6	4440
2214	Grampo Elástico	Un.	7400	9,5	70300
2217	Placa de Apoio 68 p/ Fixação Elástica	Un.	3700	16,01	59237
2282	Dormente de Madeira, Padrão Bitola Métrica, 0.16x0.22x2.0m	Un.	1850	58	107300
	Total de Material				254819
9718	Pórtico Duplo de Descarga e Posicionamento de Dormente (188 kW)	h	5,14	583,15	2997,391
9731	Tirefonadora (3.7 kW)	h	16	19,37	309,92
9732	Máquina p/ Furar Dormente (3.7 kW)	h	16	17,86	285,76
	Total de Equipamento				3593,071
9859	Trabalhador de Via	h	536,99	7,83	4204,621
	Total de Mão de Obra				4204,621
	Total do Serviço				262616,7

Fonte: SICRO (2008)

Tabela 5.29: Custo unitário para descarga de lastro na via permanente

1006339 Lançamento de Lastro, B. Métrica, 15 cm de altura de lastro sob o dormente, descarga de Pedra Britada de Vagões:-KM					
Cód.	Discriminação	Un.	Coef. Unitário	Preço Unitário	Preço
2356	Brita Padrão para Lastro Ferroviário	m ³	1012	40	40480
9743	Locomotiva Diesel-Elétrica 1800 HP (1343 kW)	h	4	329,23	1316,92
9859	Trabalhador de Via	h	28	7,83	219,2395
	Total de Mão de Obra				219,2395
	Total do Serviço				42016,16

Fonte: SICRO (2008)

Como já descrito no Capítulo de revisão bibliográfica, bem como no estabelecimento do roteiro do procedimento, cada companhia ferroviária adota uma determinada política de manutenção em relação aos itens que são substituídos nas renovações, existindo modelos administrativos que realizam renovações dos componentes de maneira separada, em função principalmente da vida útil diferente que cada item possui, e existe também modelos de troca conjunta de todos os itens. Em função dessa característica foram calculados custos para renovação independente, e também para renovação conjunta de todos os itens. A exemplo do que foi feito para as manutenções geométricas, a extensão de todos os trechos analisados foi somada, e o custo estabelecido para o comprimento de via resultante.

Assim, para a via 1 o custo de renovação completa do trecho analisado é de R\$4.121.976,93, e para renovação independente o custo para substituição de trilhos é de R\$2.579.185,68, para dormentes R\$1.335.021,33, e para lastro R\$244.151,66.

Para a via 2, a renovação completa do trecho tem custo estimado de R\$4.279.978,23, e no modelo de renovação independente o custo para troca de trilhos é R\$2.680.716,77, para dormentes R\$1.383.886,62, e para lastro R\$253.088,25.

É importante destacar que as composições de custo estabelecidas no manual SICRO (2008) têm seus valores relativos ao ano de 2008. Em função disso é necessário que para o desenvolvimento da análise final, os dados de custo sejam atualizados segundo índice adequado para tal. Para tanto, o índice escolhido para o desenvolvimento deste trabalho foi o IGP-m, por este ser estabelecido por meio da análise da variação de preços tanto de serviços quanto de produtos de diversas áreas, como a de construção civil e industrial.

O ano base para o qual estes valores serão atualizados é o de 1997, último ano da série de inspeções disponíveis e também ano em que a EFVM foi privatizada, fato propício para o desenvolvimento de uma análise de longo prazo, 30 anos para o caso em questão.

Os resultados da atualização dos custos de realização de manutenções serão apresentados conjuntamente ao desenvolvimento da próxima etapa.

5.6 Determinação do Ciclo de Correção Geométrica Mais Econômico

Nesta etapa o número de serviços de manutenção será determinado por meio de uma análise de sensibilidade, em que o tamanho do ciclo de conserva geométrica foi reduzido de 0 a 100%, em intervalos de 5%, e a cada novo ciclo foram calculadas as vidas úteis, o número de atividades e por fim os custos correspondentes.

Quanto ao volume de renovações, é importante destacar que foram analisadas duas maneiras de realização desse tipo de manutenção: com todos os componentes sendo trocados ao mesmo tempo; e com dormentes e fixações trocados conjuntamente, e trilhos independentemente. Essa conformação foi adotada em função da diferença de cerca de dois anos entre a vida útil desses componentes.

Na terceira etapa desse procedimento foram determinados valores de *RT* e *RC* para os três principais cenários de tratamento de dados em cada uma das vias (1 e 2). Seria razoável, portanto, que ao analisar de maneira independente esses cenários nessa etapa, fossem utilizados os seus respectivos resultados de *RT* e *RC*, contudo, será adotada uma abordagem conservadora quanto a esse aspecto, em que a dinâmica de aumento da vida útil dos materiais será estimada a partir do cenário mais pessimista verificado entre os resultados apresentados nas Tabelas 5.22 e 5.23, sendo utilizada a menor proporção de aumento da vida útil por unidade de diminuição do ciclo de manutenção geométrica verificada entre os resultados obtidos.

Desse modo, apesar dos valores 77% para *RT*, e 78% para *RC*, e 74% para *RT*, e 73% para *RC* representarem, respectivamente, a primeira e a segunda menores proporções de aumento da vida útil, estes foram estabelecidos para cenários em que se analisa apenas um tipo de planimetria da via, não sendo adequado, portanto, o uso em uma análise mais abrangente. Assim, os valores utilizados serão 72% para *RT*, e 70% para *RC*, por se entender que por terem sido estabelecidos para o cenário em que a via é analisada como um segmento contínuo podem representar adequadamente as características planimétricas do trecho como um todo.

Isto posto, nas tabelas que se seguem serão apresentados os resultados para a via 1 e 2 da aplicação do procedimento previsto para essa etapa no roteiro metodológico.

Dessa forma, na Tabela 5.30 serão apresentados os resultados detalhados obtidos para a via 1 tendo como política de renovação a substituição completa dos componentes. Essa tabela apresenta todos os resultados obtidos para cada variação de ciclo de manutenção geométrica aplicados a equação *IV* (4.8), obtendo os consequentes aumentos das vidas úteis dos materiais e os correspondentes volumes de intervenções, tanto geométricas como de renovações. Também são apresentados os correspondentes custos de manutenção para cada um dos ciclos, possibilitando assim, por meio do valor do CCV, identificar aquele de menor valor e que, portanto, representará a política de manutenção mais econômica. Na Tabela 5.31 são apresentados os resultados na mesma conformação que a anterior, porém para as renovações sendo realizadas de maneira independente. Em ambas Tabelas, o ciclo mais econômico está em destaque.

O desenvolvimento detalhado da análise de sensibilidade apresentado nessas duas primeiras Tabelas tem por objetivo ilustrar a aplicação do procedimento proposto, por consequência, estes serão os únicos resultados detalhados que serão apresentados, haja vista que por se tratar de um procedimento que se repete de maneira idêntica para os outros cenários, não se justifica a apresentação dos demais. Para esses, serão apresentados apenas os resultados finais para os ciclos mais econômicos.

Desse modo, na Tabela 5.32 são apresentados os ciclos de manutenção mais econômicos para a via 2 com renovações conjuntas e também independentes.

Na Tabela 5.33 os resultados apresentados são referentes ao segundo cenário em que a via é analisada a partir de um único segmento em curva e em tangente. E na Tabela 5.34 e 5.35, são apresentados os resultados para o terceiro cenário em que as curvas da via 1 e 2 são analisadas separadamente, respectivamente.

Tabela 5.30: Resultados detalhados obtidos pela análise da variação dos ciclos de conserva geométrica para a via 1 tomada como homogênea com renovação conjunta dos componentes

Ciclo (meses)	Redução do ciclo (%)	Aumento da vida útil (IV)	Vida útil componentes (meses)	Nº manutenções geométricas	Nº renovações de lastro	Nº renovações	Total renovação (R\$ 1997)	Total man. geo. (R\$ 1997)	CCV (R\$ 1997)
19,93	0%	0,00%	144	18	3	2	R\$ 3.425.478,82	R\$ 286.178,83	R\$ 3.711.657,66
18,93	5%	5,14%	151	19	3	2	R\$ 3.425.478,82	R\$ 305.257,42	R\$ 3.730.736,24
17,93	10%	10,29%	159	20	4	2	R\$ 3.518.649,30	R\$ 305.257,42	R\$ 3.823.906,73
16,94	15%	15,43%	166	21	4	2	R\$ 3.518.649,30	R\$ 324.336,01	R\$ 3.842.985,32
15,94	20%	20,57%	174	22	4	2	R\$ 3.518.649,30	R\$ 343.414,60	R\$ 3.862.063,91
14,94	25%	25,71%	181	24	4	1	R\$ 1.945.665,62	R\$ 381.571,78	R\$ 2.327.237,40
13,95	30%	30,86%	188	25	5	1	R\$ 2.038.836,10	R\$ 381.571,78	R\$ 2.420.407,88
12,95	35%	36,00%	196	27	5	1	R\$ 2.038.836,10	R\$ 419.728,96	R\$ 2.458.565,06
11,96	40%	41,14%	203	30	6	1	R\$ 2.132.006,58	R\$ 457.886,14	R\$ 2.589.892,72
10,96	45%	46,29%	211	32	6	1	R\$ 2.132.006,58	R\$ 496.043,31	R\$ 2.628.049,90
9,96	50%	51,43%	218	36	7	1	R\$ 2.225.177,07	R\$ 553.279,08	R\$ 2.778.456,15
8,97	55%	56,57%	225	40	8	1	R\$ 2.318.347,55	R\$ 610.514,85	R\$ 2.928.862,39
7,97	60%	61,71%	233	45	9	1	R\$ 2.411.518,03	R\$ 686.829,20	R\$ 3.098.347,23
6,97	65%	66,86%	240	51	10	1	R\$ 2.504.688,51	R\$ 782.222,15	R\$ 3.286.910,66
5,98	70%	72,00%	248	60	12	1	R\$ 2.691.029,48	R\$ 915.772,27	R\$ 3.606.801,75
4,98	75%	77,14%	255	72	14	1	R\$ 2.877.370,44	R\$ 1.106.558,16	R\$ 3.983.928,60
3,99	80%	82,29%	262	90	18	1	R\$ 3.250.052,37	R\$ 1.373.658,41	R\$ 4.623.710,78
2,99	85%	87,43%	270	120	24	1	R\$ 3.809.075,27	R\$ 1.831.544,54	R\$ 5.640.619,81
1,99	90%	92,57%	277	180	36	1	R\$ 4.927.121,06	R\$ 2.747.316,81	R\$ 7.674.437,87
1,00	95%	97,71%	285	361	72	1	R\$ 8.281.258,44	R\$ 5.513.712,21	R\$ 13.794.970,65
0	100%	102,86%	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.31: Resultados detalhados obtidos pela análise da variação dos ciclos de conserva geométrica para a via 1 tomada como homogênea com renovação independente dos componentes

Ciclo (meses)	Redução do ciclo (%)	Aumento da vida útil (IV)	Vida útil (meses)		N° man. geom.	N° renovações			Total renovação (R\$ 1997)	Total man. geo. (R\$ 1997)	CCV (R\$ 1997)
			Trilhos	Dorm. e fix.		Lastro	Trilhos	Dorm. e fix.			
19,93	0%	0,00%	144	168	18	3	2	2	R\$ 3.453.246,03	R\$ 286.178,83	R\$ 3.739.424,87
18,93	5%	5,14%	151	177	19	3	2	2	R\$ 3.453.246,03	R\$ 305.257,42	R\$ 3.758.503,45
17,93	10%	10,29%	159	185	20	4	2	1	R\$ 2.943.789,81	R\$ 305.257,42	R\$ 3.249.047,24
16,94	15%	15,43%	166	194	21	4	2	1	R\$ 2.943.789,81	R\$ 324.336,01	R\$ 3.268.125,83
15,94	20%	20,57%	174	203	22	4	2	1	R\$ 2.943.789,81	R\$ 343.414,60	R\$ 3.287.204,41
14,94	25%	25,71%	181	211	24	4	1	1	R\$ 1.959.549,22	R\$ 381.571,78	R\$ 2.341.121,00
13,95	30%	30,86%	188	220	25	5	1	1	R\$ 2.052.719,70	R\$ 381.571,78	R\$ 2.434.291,48
12,95	35%	36,00%	196	228	27	5	1	1	R\$ 2.052.719,70	R\$ 419.728,96	R\$ 2.472.448,66
11,96	40%	41,14%	203	237	30	6	1	1	R\$ 2.145.890,19	R\$ 457.886,14	R\$ 2.603.776,32
10,96	45%	46,29%	211	246	32	6	1	1	R\$ 2.145.890,19	R\$ 496.043,31	R\$ 2.641.933,50
9,96	50%	51,43%	218	254	36	7	1	1	R\$ 2.239.060,67	R\$ 553.279,08	R\$ 2.792.339,75
8,97	55%	56,57%	225	263	40	8	1	1	R\$ 2.332.231,15	R\$ 610.514,85	R\$ 2.942.746,00
7,97	60%	61,71%	233	272	45	9	1	1	R\$ 2.425.401,64	R\$ 686.829,20	R\$ 3.112.230,84
6,97	65%	66,86%	240	280	51	10	1	1	R\$ 2.518.572,12	R\$ 782.222,15	R\$ 3.300.794,27
5,98	70%	72,00%	248	289	60	12	1	1	R\$ 2.704.913,08	R\$ 915.772,27	R\$ 3.620.685,35
4,98	75%	77,14%	255	298	72	14	1	1	R\$ 2.891.254,05	R\$ 1.106.558,16	R\$ 3.997.812,21
3,99	80%	82,29%	262	306	90	18	1	1	R\$ 3.263.935,98	R\$ 1.373.658,41	R\$ 4.637.594,38
2,99	85%	87,43%	270	315	120	24	1	1	R\$ 3.822.958,87	R\$ 1.831.544,54	R\$ 5.654.503,42
1,99	90%	92,57%	277	324	180	36	1	1	R\$ 4.941.004,67	R\$ 2.747.316,81	R\$ 7.688.321,48
1,00	95%	97,71%	285	332	361	72	1	1	R\$ 8.295.142,04	R\$ 5.513.712,21	R\$ 13.808.854,25
0	100%	102,86%	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.32: Ciclos de conserva geométrica mais econômicos para a via 2 tomada como homogênea para ambos os tipos de renovação

Cenário	Tipo de renovação	Ciclo (meses)	Redução do ciclo (%)	Aumento da vida útil	Total renovação (R\$ 1997)	Total man. geo. (R\$ 1997)	CCV (R\$ 1997)
Via 2	Conjunta	12,45	25%	25,71%	R\$ 2.116.182,25	R\$ 454.869,06	R\$ 2.571.051,31
Via 2	Independente	12,45	25%	25,71%	R\$ 2.130.574,03	R\$ 454.869,06	R\$ 2.585.443,09

Tabela 5.33: Ciclos de conserva geométrica mais econômicos para as vias 1 e 2 tendo seus trechos de mesma planimetria agrupados

Cenário	Tipo de renovação	Ciclo (meses)	Redução do ciclo (%)	Aumento da vida útil	Total renovação (R\$ 1997)	Total man. geo. (R\$ 1997)	CCV (R\$ 1997)
Via 1 Cv	Conjunta	16,59	25%	25,71%	R\$ 448.634,40	R\$ 74.705,50	R\$ 523.339,90
Via 1 Cv	Independente	16,59	25%	25,71%	R\$ 451.832,26	R\$ 74.705,50	R\$ 526.537,77
via 1 Tg	Conjunta	13,88	25%	25,71%	R\$ 1.568.741,40	R\$ 293.682,95	R\$ 1.862.424,35
via 1 Tg	Independente	13,88	25%	25,71%	R\$ 1.579.427,14	R\$ 293.682,95	R\$ 1.873.110,10
Via 2 Cv	Conjunta	13,04	25%	25,71%	R\$ 811.712,92	R\$ 166.703,27	R\$ 978.416,19
Via 2 Cv	Independente	13,04	25%	25,71%	R\$ 817.227,05	R\$ 166.703,27	R\$ 983.930,32
Via 2 Tg	Conjunta	12,35	25%	25,71%	R\$ 1.304.469,33	R\$ 292.787,86	R\$ 1.597.257,19
Via 2 Tg	Independente	12,35	25%	25,71%	R\$ 1.315.928,08	R\$ 292.787,86	R\$ 1.608.715,94

Tabela 5.34: Ciclos de conserva geométrica mais econômicos para as curvas do trecho da via 1

Cenário	Tipo de renovação	Ciclo (meses)	Redução do ciclo (%)	Aumento da vida útil	Total renovação (R\$ 1997)	Total man. geo. (R\$ 1997)	CCV (R\$ 1997)
Via 1 Cv 51	Conjunta	6,40	25%	25,71%	R\$ 75.478,54	R\$ 24.827,24	R\$ 100.305,79
Via 1 Cv 51	Independente	6,40	25%	25,71%	R\$ 75.880,03	R\$ 24.827,24	R\$ 100.707,27
Via 1 Cv 53	Conjunta	4,48	25%	25,71%	R\$ 73.407,11	R\$ 29.136,81	R\$ 102.543,92
Via 1 Cv 53	Independente	4,48	25%	25,71%	R\$ 73.738,41	R\$ 29.136,81	R\$ 102.875,21
Via 1 Cv 121	Conjunta	9,52	25%	25,71%	R\$ 110.938,14	R\$ 28.473,20	R\$ 139.411,34
Via 1 Cv 121	Independente	9,52	25%	25,71%	R\$ 111.628,81	R\$ 28.473,20	R\$ 140.102,01
Via 1 Cv 287	Conjunta	14,63	25%	25,71%	R\$ 248.255,07	R\$ 48.767,11	R\$ 297.022,18
Via 1 Cv 287	Independente	14,63	25%	25,71%	R\$ 250.029,48	R\$ 48.767,11	R\$ 298.796,59

Tabela 5.35: Ciclos de conserva geométrica mais econômicos para as curvas do trecho da via 2

Cenário	Tipo de renovação	Ciclo (meses)	Redução do ciclo (%)	Aumento da vida útil	Total renovação (R\$ 1997)	Total man. geo. (R\$ 1997)	CCV (R\$ 1997)
Via 2 Cv 329	Conjunta	9,60	25%	25,71%	R\$ 142.750,42	R\$ 36.691,08	R\$ 179.441,50
Via 2 Cv 329	Independente	9,60	25%	25,71%	R\$ 143.640,43	R\$ 36.691,08	R\$ 180.331,51
Via 2 Cv 331	Conjunta	8,34	25%	25,71%	R\$ 107.980,50	R\$ 31.058,17	R\$ 139.038,67
Via 2 Cv 331	Independente	8,34	25%	25,71%	R\$ 108.626,25	R\$ 31.058,17	R\$ 139.684,42
Via 2 Cv 349	Conjunta	7,13	25%	25,71%	R\$ 60.067,43	R\$ 18.210,50	R\$ 78.277,94
Via 2 Cv 349	Independente	7,13	25%	25,71%	R\$ 60.398,73	R\$ 18.210,50	R\$ 78.609,24
Via 2 Cv 349	Conjunta	3,54	25%	25,71%	R\$ 141.331,67	R\$ 63.439,68	R\$ 204.771,35
Via 2 Cv 349	Independente	3,54	25%	25,71%	R\$ 141.901,61	R\$ 63.439,68	R\$ 205.341,30
Via 2 Cv 349	Conjunta	4,14	25%	25,71%	R\$ 103.083,73	R\$ 31.328,24	R\$ 134.411,97
Via 2 Cv 349	Independente	4,14	25%	25,71%	R\$ 103.653,67	R\$ 31.328,24	R\$ 134.981,91
Via 2 Cv 431	Conjunta	7,59	25%	25,71%	R\$ 119.241,04	R\$ 35.772,84	R\$ 155.013,88
Via 2 Cv 431	Independente	7,59	25%	25,71%	R\$ 119.926,09	R\$ 35.772,84	R\$ 155.698,93
Via 2 Cv 575	Conjunta	7,97	25%	25,71%	R\$ 99.742,45	R\$ 28.334,31	R\$ 128.076,76
Via 2 Cv 575	Independente	7,97	25%	25,71%	R\$ 100.315,21	R\$ 28.334,31	R\$ 128.649,51
Via 2 Cv 577	Conjunta	5,69	25%	25,71%	R\$ 122.614,32	R\$ 44.272,36	R\$ 166.886,68
Via 2 Cv 577	Independente	5,69	25%	25,71%	R\$ 123.246,03	R\$ 44.272,36	R\$ 167.518,39
Via 2 Cv 579	Conjunta	6,59	25%	25,71%	R\$ 111.623,90	R\$ 37.346,96	R\$ 148.970,86
Via 2 Cv 579	Independente	6,59	25%	25,71%	R\$ 112.241,57	R\$ 37.346,96	R\$ 149.588,53

5.7 Resumo dos Resultados

Os ciclos de manutenções geométricas máximos obtidos para o cenário de via homogênea e via agrupada em curva e tangente, obtidos na primeira etapa do procedimento demonstraram estarem coerentes com a realidade observada na via permanente da EFVM, já que os resultados foram significativamente semelhantes ao valor oficial informado pela empresa.

A partir desses resultados pode-se inferir que a EFVM, há época do banco de dados, administrava suas manutenções geométricas tomando a degradação da via como homogênea ao longo de sua extensão, já que os valores de 19,93 meses para a via 1 e 16,59 meses para a via 2, obtidos nessa configuração são próximos ao definido pela empresa, de 16 meses.

Quando se analisa essa questão a partir dos resultados obtidos para o segundo cenário, em que a via foi dividida em dois segmentos de mesma planimetria, os valores de ciclo máximo obtidos para correções geométricas – 22,12 meses para curvas e 18,51 meses para tangentes na via 1, e 17,39 meses para curvas e 16,47 meses para tangentes na via 2 – possibilitam ainda concluir que o ciclo oficial de 16 meses tem caráter preventivo, ocorrendo antes que os desvios na via alcancem as tolerâncias. Outro ponto importante a ser observado sobre os resultados desse segundo cenário diz respeito aos ciclos obtidos serem menores nas tangentes do que nas curvas: é necessário que se levante um olhar crítico sobre esse resultado, pois é sabido que normalmente trechos em curva possuem taxas de degradação superiores às tangentes quando submetidos ao mesmo tipo de solicitação. Como nas curvas os componentes estão sob maior estresse durante o tráfego, já que são responsáveis por conterem as diversas forças resultantes dos veículos e permitir que estes superem a própria curva em segurança, as degradações tendem a ser maiores nesses segmentos, logo, com ciclos de manutenção menores em relação às tangentes. Como esses valores são fruto da aplicação do método ora proposto, entende-se que sejam inerentes a determinadas características particulares do trecho ferroviário estudado, e, portanto, serão utilizados para as demais análises, contudo, fez-se tal observação para que o leitor tenha consciência do que comumente se observa na prática.

Quanto ao terceiro cenário, em que foram analisadas separadamente cada uma das curvas presentes no trecho de via selecionado, apesar de alguns resultados se aproximarem aos valores obtidos nos dois cenários precedentes, percebe-se a ocorrência de ciclos de manutenção muito pequenos, como aquele verificado no trecho 53 da via 1, com apenas 5,97 meses. Essa dissonância em relação aos demais resultados pode ser explicada pelo critério para seleção dos ciclos, que determina que os menores sejam os escolhidos como padrão, e, desse modo, é possível que estes ciclos demasiadamente pequenos reflitam erros de medição do parâmetro em questão, visto que quando analisados os outros parâmetros selecionados para o mesmo trecho, os resultados são mais coerentes com os demais verificados nos outros cenários.

É preciso, entretanto, que se faça uma explicação mais detalhada em relação à conclusão apresentada acima, já que ciclos de manutenção pequenos não significam necessariamente erros ou distorções nas inspeções, já que em curvas de raio “apertado” é natural que as degradações evoluam em uma taxa maior, se convertendo em ciclos menores tanto quanto menores forem os raios das curvas. Analisando, portanto, de maneira mais criteriosa o resultado em questão, a curva 53 da via 1, de grau $01^{\circ}03'00''$, possui raio maior que a curva 51, por exemplo, cujo grau é $02^{\circ}53'00''$, e, apesar disso, o ciclo de manutenção geométrica obtido para o trecho 51 é de aproximadamente 8,54 meses, contrariando desse modo, o comportamento natural das degradações visto na prática.

Feita essa observação, esses pequenos ciclos de manutenção obtidos especificamente para o tratamento dos dados utilizados neste trabalho, podem ser fruto de erros de leitura pontuais, ou então por algum tipo de desequilíbrio da via naquele ponto, já que quando é analisado todo o trecho, como a amostra é maior, esses problemas específicos podem ser amenizados. Em decorrência desse fato é prudente que os resultados relativos ao trecho dividido em curvas sejam desconsiderados, cabendo uma revisão após novas inspeções.

Superando essa primeira observação e chegando agora ao objetivo fim do procedimento, para todos os cenários estudados a política de manutenção mais econômica foi estabelecida quando a frequência das conservas geométricas é reduzida em 25% em relação aos respectivos ciclos máximos calculados. A prevalência desse resultado para

todos os cenários e ciclos deve-se ao fato de que é a partir de uma redução nessa proporção que a necessidade de renovação decresce de duas para uma intervenção, influenciada principalmente pela vida útil dos trilhos. Como as renovações possuem um custo unitário significativamente maior do que as conservas geométricas, quando ocorre esta mudança o CCV resultante diminui drasticamente.

Quanto ao padrão das renovações, quando os serviços são realizados de maneira conjunta, o CCV resultante foi ligeiramente menor quando comparado ao valor fruto de renovações independentes. Além disso, quando se leva em consideração que ao realizar renovações independentes existe um prejuízo em decorrência da paralização do tráfego em cada uma das intervenções, e que não foram contabilizados nesse procedimento, conclui-se que a atratividade da realização do procedimento de maneira conjunta se torna ainda maior.

Por fim, quanto à seleção por uma política de manutenção referencial para o trecho, dentre os diversos valores obtidos, tendo em vista o exposto acima para os valores do terceiro cenário em que foram analisadas cada uma das curvas, optou-se por desconsiderar os seus correspondentes resultados. Desse modo, como o critério base para seleção do ciclo ideal é o menor custo, quando se analisa o CCV para manutenções em que as conservas geométricas são feitas de maneira independente entre curvas e tangentes, tendo como referência os resultados apresentados na Tabela 5.33 e sempre com renovações conjuntas, o CCV da via 1 será de R\$ 2.385.764,26, e para a via 2 será de R\$2.575.673,38. Entretanto, quando se analisa a via como um único segmento homogêneo, ou seja, sem distinção entre curvas e tangentes, tendo assim um único ciclo de correção geométrica, o CCV para a via 1 é de R\$2.327.237,40, e para a via 2 é de R\$2.571.051,31.

Desse modo, a política de manutenção mais econômica para a via permanente da EFVM é aquela estabelecida para o cenário em que a via é analisada como um único segmento homogêneo, caracterizando-se por conservas geométricas que deverão ser realizadas com frequência de 14,93 meses na via 1 e 12,45 meses na via 2, o que se converterá em necessidade por renovações a cada 181 meses, ou 15 anos, em ambas as vias da linha tronco.

Comparando a política de manutenção obtida como resultado do procedimento proposto, em que o CCV das vias 1 e 2 totaliza R\$4.898.288,70 para os trechos estudados, com a política de manutenção oficial da EFVM, em que o CCV nas mesmas condições tem valor de R\$7.870.928,28 (R\$3.862.063,91 para a via 1 e R\$4.008.864,37 para a via 2, nos mesmos trechos em estudo), obtém-se com a política proposta uma economia de recursos de cerca de 38%.

Além disso, o aumento da frequência das correções geométricas incorre em tolerâncias para manutenções mais restritas, permitindo dessa maneira, que se pratiquem velocidades operacionais maiores proporcionais a essas novas tolerâncias, repercutindo, em última instância, em incremento de desempenho do transporte, logo, das próprias receitas operacionais.

A economia expressa pelo valor de 38% obtido é extremamente elevada, porém atípica para o cenário administrativo em questão, requerendo, portanto, que seja interpretada com critério. Entende-se que algumas das simplificações adotadas no decorrer do desenvolvimento do procedimento e de sua aplicação, levaram a obtenção desse valor otimista. Espera-se, com o refinamento do procedimento, principalmente no que diz respeito à melhora da precisão no desenvolvimento da etapa de quantificação do incremento da vida útil dos componentes em função da diminuição dos ciclos de manutenção geométrica, que esse valor se reduza, mantendo, entretanto, um comportamento atrativo para as empresas. Cabe destacar ainda, que o valor de 38% revela a potencialidade da implantação e aprimoramento do procedimento.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu um procedimento capaz de determinar a política de manutenção mais econômica para a via permanente ferroviária.

Para tanto, foi explorada a premissa básica de que a condição geométrica da via tem impacto direto sobre o ritmo que os componentes se degradam. Tal característica, corroborada pelo referencial teórico, permitiu que se desenvolvesse um método para estimar como diferentes frequências de correções geométricas estenderiam o tempo de utilização dos componentes na via, ou em outras palavras, diminuiriam a frequência dos ciclos de renovação.

Desse modo, o método foi desenvolvido, e, consoante com o objetivo, naturalmente o critério para decisão do resultado final do procedimento foi a análise dos custos de realização dos serviços de manutenção, e para isso foi utilizado o conceito de CCV dos processos, tendo como característica o estudo do comportamento dos custos decorrentes dos diferentes padrões administrativos estabelecidos pelo método.

Nesse sentido, por se entender que as decisões administrativas nessa área devem ser feitas sob um foco de longo prazo, todo o desenvolvimento do procedimento foi pautado no montante de atividades necessárias a manter a via em condições seguras e em desempenho adequado durante um longo período de operação, conseqüentemente, convergindo essa característica com o princípio básico de CCV, já que se entende por ciclo de vida todo o tempo em que a via estará disponível para uso.

Estes foram, portanto, os aspectos que formaram o arcabouço para o desenvolvimento do procedimento apresentado neste trabalho, cujas diversas etapas que o compõem trouxeram diferentes contribuições no que se refere a meios de abordar e, sobretudo modelar o comportamento da via permanente no que tange seu comportamento de degradação e os custos para sua manutenção.

De fato, para se decidir por uma política de manutenção que dimensiona todos os esforços de manutenção de uma ferrovia, e ainda durante um período significativamente elevado, faz-se necessário que cada um dos itens que regem esse contexto sejam

estudados. Nesse sentido, perpassando as cinco etapas principais que constituem o método de planejamento proposto, o resultado final definido na quinta etapa é fruto de inúmeros resultados preliminares que comporão uma descrição das principais características da via no que diz respeito à dinâmica de degradação geométrica, a eficiência das manutenções, a degradação física dos componentes, os custos de manutenção, o impacto do estado de degradação geométrica da via na vida útil dos materiais, culminando ao fim, na simulação dos cenários administrativos dentre os quais será selecionado aquele que atenderá o objetivo primeiro deste trabalho.

O objetivo fim do trabalho, ou seja, a política mais econômica é a meta a qual os esforços de compor todas as informações necessárias ao seu estabelecimento se prestam, contudo, por se ter para tanto sido desenvolvidas análises sobre tantos aspectos da via permanente é válido que se faça menção as contribuições individuais dessas etapas.

Como o resultado prático do procedimento proposto é um ajuste da frequência com que as manutenções são realizadas, sua utilização não requer que o método de inspeção da via e o aparato para realização de manutenções existente nas empresas sejam alterados, aproveitando, portanto, toda a estrutura, inclusive de informações, já existentes e comumente disponíveis nas empresas do setor. Além disso, ao serem concebidas, cada uma das etapas foram pensadas de maneira a oferecer flexibilidade quanto aos dados e modelos matemáticos utilizados, característica essa visando facilitar o emprego do método em estudos acadêmicos futuros, em que determinados dados podem não estar disponíveis.

Com a aplicação do procedimento, foi possível confirmar sua aplicabilidade, já que o objetivo almejado pelo método foi alcançado para os dados analisados, e, além disso evidenciou-se a simplicidade de utilização, atendendo de maneira satisfatória o previsto no roteiro do método bem como a premissa básica que levou ao seu desenvolvimento. Os resultados encontrados corroboraram a eficácia do procedimento, já que a política de manutenção definida pelo método para a linha tronco da EFVM possibilitaria uma economia de cerca de 38% em relação ao custo da política vigente há época.

Explorando de maneira mais detalhada os resultados obtidos, a separação da via em trechos homogêneos segundo suas características planimétricas comprovou o

comportamento particular de cada trecho em relação ao desenvolvimento das degradações, contudo a partir dos resultados obtidos foi possível perceber que quando se analisa a via de maneira cada vez mais detalhada, os valores finais para os ciclos de manutenção devem ser interpretados com cautela, já que no caso em questão, estes destoaram sobremaneira do que foi obtido nos outros cenários e no ciclo adotado pela empresa, despertando assim dúvidas quanto a sua veracidade, que levaram inclusive a desconsiderá-los para a determinação do resultado final.

Percebeu-se que a utilização das equações determinísticas para o cálculo das vidas úteis dos componentes, também deve ser realizada com cautela, visto que também para estas os resultados obtidos destoram significativamente daqueles vistos na realidade.

Quanto aos resultados finais, o comportamento dos custos previsto em teoria, ilustrado na Figura 1.2, e do CCV descrito pela Figura 1.3, foram semelhantes aos verificados na aplicação, como demonstrado na Figura 6.1, para os custos de manutenção geométrica e de renovação na via 1, e para o correspondente CCV, apresentado na Figura 6.2, em que o ponto de mínimo da curva corresponde a redução de 25% do ciclo geométrico, passando de 19,93 para 14,93 meses, configurando-se como o ciclo mais econômico e que foi tomado como ideal para o caso estudado. A semelhança entre o comportamento teórico e o calculado mais uma vez confirmou a adequabilidade do procedimento.

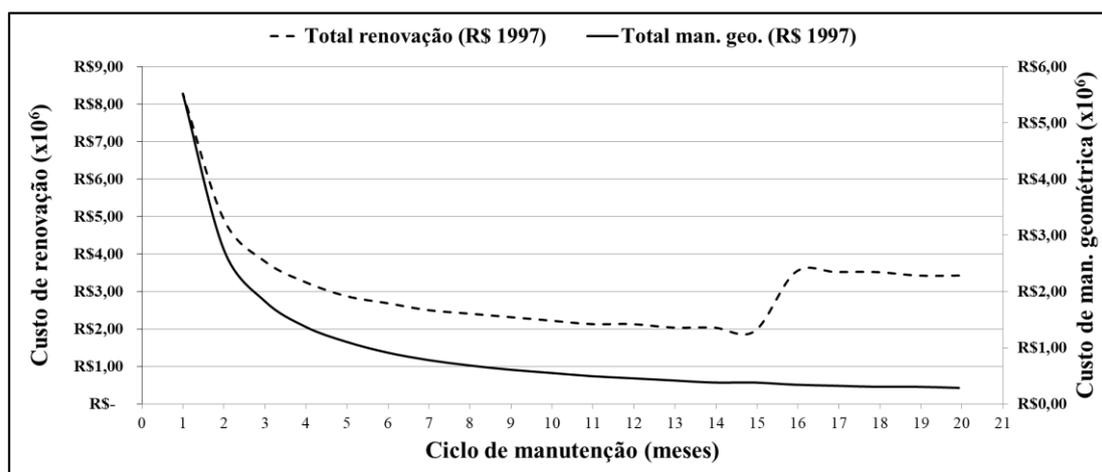


Figura 6.1: Comportamento dos custos de manutenção geométrica e de renovação para a via 1 da linha tronco da EFVM obtidos pela aplicação do procedimento

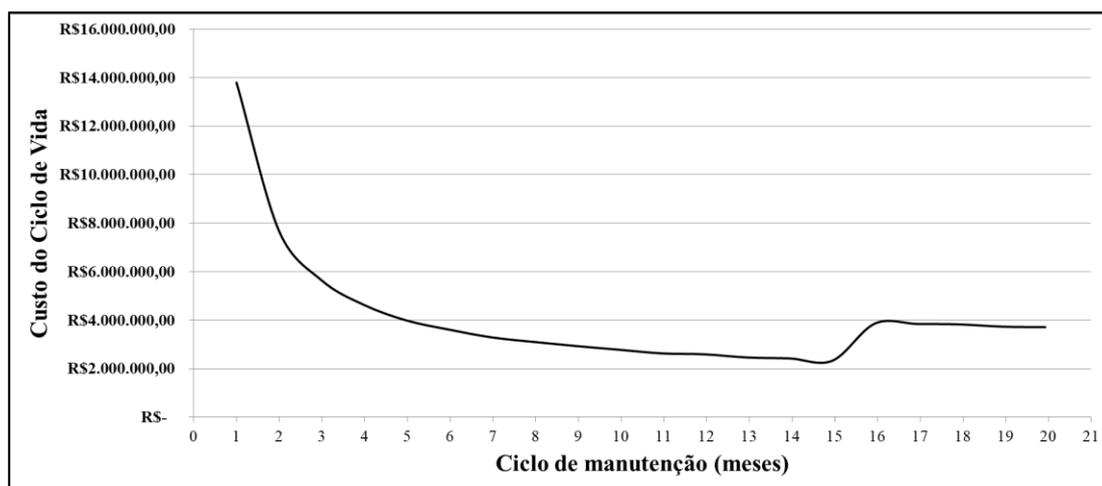


Figura 6.2: CCV para via permanente da via 1 da linha tronco da EFVM estimado pela aplicação do procedimento

Cabe aqui uma observação quanto ao comportamento da curva dos custos de renovações se comparada ao comportamento teórico: a curva resultante para a via 1, destoando da teoria, tem seus custos aumentando quando os ciclos de renovação diminuem além daquele onde ocorre o ponto mínimo, passando a praticamente acompanhar a curva de correção geométrica. Esse comportamento diferente do previsto se deve ao fato de que como a frequência de renovação do lastro é ditada pelos serviços de manutenção geométrica, à medida que o volume desse tipo de intervenção aumentou, os custos de renovação específicos do lastro também aumentaram, fazendo então com que ocorresse o comportamento observado. Caso se retirasse o custo correspondente à renovação do lastro, assumindo outro tipo de política de manutenção para esse componente, as curvas adquiririam comportamento mais próximo aquele previsto em teoria, como ilustrado na Figura 6.3.

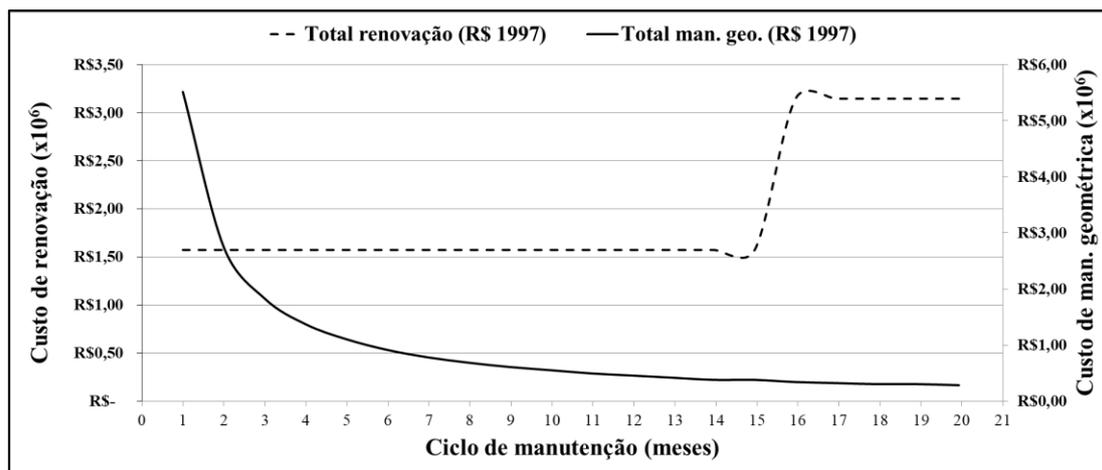


Figura 6.3: Comportamento das curvas de custo de manutenção, com destaque para a curva de renovações mais próxima ao previsto em teoria

A análise dos custos também permitiu definir que o melhor modelo de realização das renovações é aquele em que todos os componentes são substituídos ao mesmo tempo, já que apesar de dormentes e fixações possuírem vidas úteis maiores para o trecho em estudo, o custo para troca separada é ligeiramente maior, justificando assim a realização do serviço conjuntamente.

É preciso ainda que seja feita uma observação com relação ao conceito de proporcionalidade adotado para o desenvolvimento da terceira etapa do procedimento, em que foi estimado o incremento da vida útil dos componentes em função da diminuição da frequência dos serviços de correção geométrica. A forma como esse item foi explorado causou distorções nos resultados finais obtidos na aplicação do procedimento, especificamente no que se refere ao resultado extremamente expressivo de 38% de redução de custos em relação ao ciclo padrão utilizado pela empresa. Tendo em vista as limitações de referencial, tais simplificações foram necessárias para o desenvolvimento deste trabalho, por isso ressalta-se a importância da continuação do seu desenvolvimento, principalmente em vistas a aumentar a precisão das análises realizadas na terceira etapa deste método. A ordem de grandeza da economia de custos obtida, não deprecia, contudo, a viabilidade do procedimento, mas indica sua potencialidade, que deve ser explorada por meio de aprimoramentos futuros.

Desse modo, a partir desses resultados foi possível identificar oportunidades de aprimoramentos e sugestões para pesquisas futuras, como será apresentado na próxima seção.

6.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como pesquisas e aprimoramentos futuros sugere-se:

- Estudo mais aprofundado sobre a capacidade de recuperação da geometria pelos serviços de manutenção geométrica visando estabelecer uma sistemática capaz de quantificar a proporção de redução da qualidade final dos serviços ao longo de manutenções consecutivas;
- Desenvolvimento de estudo empírico a partir de dados de manutenções geométricas e renovações de longo período, visando identificar trechos cujas conservas geométricas foram realizadas com frequência menor em relação ao padrão usual do trecho em questão, correlacionando a esses dados o histórico das renovações desses mesmos trechos em vistas a mensurar com maior precisão o impacto da condição geométrica sobre a vida útil dos componentes.
- Reaplicação do procedimento ora proposto em trechos em que se disponha de uma série de inspeções geométricas mais longa e com banco de dados mais completo para utilização nas diversas etapas do método, principalmente no que se refere aos custos dos procedimentos.
- Reaplicação do procedimento proposto em trecho cujas inspeções geométricas tenham comprovada qualidade e ausência de erros em vistas a determinar a política de manutenção mais econômica tendo em vista também a análise do terceiro cenário de tratamento de dados;
- Desenvolvimento de pesquisa análoga à proposta no presente trabalho, tendo como diferença elementar o desenvolvimento da temática a partir de estudo detalhado dos esforços e acelerações que se desenvolvem na via em função dos desvios geométricos e o impacto dessas cargas sobre os componentes, visando determinar com exatidão qual é a proporção de alteração dessas forças em função do aumento ou diminuição das irregularidades e por consequência qual seria a consequência sobre o ritmo de degradação das estruturas da via.

- Desenvolvimento de pesquisa em conjunto com empresa ferroviária de modo a viabilizar o desenvolvimento de um estudo com objetivo semelhante ao proposto para esse trabalho, desenvolvido, entretanto, a partir de um trecho experimental no qual as manutenções serão realizadas seguindo padrões alternativos ao em uso na referida ferrovia com intuito de analisar na prática como os desvios e as degradações físicas se comportariam nessas determinadas condições.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alta qualidade cada vez mais rápida: Máquinas socadoras, niveladoras e alinhadoras. Plasser do Brasil. 2018. Disponível em <<https://www.plasser.com.br/pt/maquinas-sistemas/socaria.html>>. Acesso em 07 de dezembro de 2018.

ANDERSSON, Mats; BJÖRKLUND, Gunilla; HARALDSSON, Mattias. Marginal railway track renewal costs: A survival data approach. *Transportation Research, Part A*, pp. 68–77, 2016.

ANDRADE, António Ramos; TEIXEIRA, Paulo Fonseca. Statistical modelling of railway track geometry degradation using Hierarchical Bayesian models. *Reliability Engineering and System Safety*, v. 142, pp. 169 – 183, 2015.

ANDREWS, John; PRESCOTT, Darren; ROZIÈRES, Florian de. A stochastic model for railway track asset management. *Reliability Engineering and System Safety*, 2014.

BARIA, Igor. *Sistema de gerência de pavimentos aplicado a via permanente metroferroviária auxiliado por um sistema de informações geográficas*. Tese. (Doutorado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

Brasil, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes– DNIT. Manual de custos de infraestrutura de transportes SICRO 3, Vol 9: Composições de Custos Unitários Tomo 4/6. 1. ed., v. 9, Rio de Janeiro, 2008.

CALVO, Francisco *et al.* Rail track costs management for efficient railway charges. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*. v. 166, pp. 325-335, 2013.

COIMBRA, Marcelo do Vale. *Modos de falha dos componentes da via permanente ferroviária e seus efeitos no meio ambiente*. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2008.

GULER, Hakan. 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, Hakan. Optimisation of railway track maintenance and renewal works by genetic algorithms. *Gradevinar*, v. 68, pp. 979 - 993, 2016.

GULER, Hakan; JOVANOVIĆ, Stanislav; EVREN, Gungor. Modelling railway track geometry deterioration. *Transport*, v. 164, pp. 65 – 75, mai. 2011.

IWNICKI Simon D.; GRASSIE, Stuart L.; KIK, Walter. Track settlement prediction using computer simulation tools. *Vehicle System Dynamics*, v. 33, pp. 37 – 46, 2000.

LIMA, Henrique Alexandre Dourado. *Procedimento para seleção de método para manutenção da geometria da superestrutura ferroviária*. Tese. (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1998.

Mais rápido ao estado ideal: Estabilização e compactação. Plasser do Brasil. 2018. Disponível em <<https://www.plasser.com.br/pt/maquinas-sistemas/estabilizacao-e-compactacao.html>>. Acesso em 07 de dezembro de 2018.

Manual técnico da via permanente. VALE, 2009.

PAIVA, Cassio Eduardo Lima de. *Super e infraestrutura de ferrovias: critérios para projetos*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

PATRA, Ambika Prasad; KUMAR, Uday; SÖDERHOLM, Peter. Uncertainty estimation in railway track life cycle 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. 222, pp. 285 – 293, 2008.

RATTON NETO, Hostilio Xavier. *Padrões para manutenção da via permanente*. Tese. (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1985.

RODRIGUES, Carlos Alceu. *Análise de Registros do Carro-Controle PV-6 Diagnósticos sobre a qualidade da via*. Technicontrol, Rio de Janeiro, 2005.

RODRIGUES, Carlos Alceu. *Avaliação da carga por eixo dos veículos ferroviários*. Tese. (Mestrado em Ciências em Engenharia de Transportes) – Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 1983.

RODRIGUES, Carlos Alceu. *Contribuição ao planejamento da manutenção preditiva da superestrutura ferroviária*. Tese. (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001.

RODRIGUES, Carlos Alceu. *Custos de mecanização: Um procedimento para sua determinação*. 11ª Reunião Técnica “Conserva mecanizada da via”. RFFSA, Rio de Janeiro, 1984.

SCHÄBE, Hendrik. Different Principles Used for Determination of Tolerable Hazard Rates. Materials of the *World Congress on Railway Research*, Cologne, 2001. Disponível em <
https://www.researchgate.net/publication/267226289_Different_Principles_Used_for_Determination_of_Tolerable_Hazard_Rates>. Acesso em 07 de dezembro de 2018.

SGAVIOLI, Fernando *et al.* Análise do custo do ciclo de vida do lastro ferroviário na Estrada de Ferro Vitória Minas. *Transportes*, v. 23, n. 4, pp. 5 – 12, 2015.

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.

SILVA, Luiz Francisco Muniz da. *Fundamentos teórico-experimentais da mecânica dos pavimentos ferroviários e esboço de um sistema de gerência aplicado à manutenção da via permanente*. Tese. (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

STEFFLER, Fábio. *Via permanente aplicada: guia teórico e prático*. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

XU *et al.* Developing an enhanced short-range railroad track condition prediction model for optimal maintenance scheduling. *Mathematical Problems in Engineering*, pp.1 – 12, 2015.

ZAKERI, Jabbar-Ali; SHAHRIARI, Shahrbanoo. Developing a deterioration probabilistic model for rail wear. *International Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 1(2): pp. 13 – 18, 2012.

ANEXO I

Neste Anexo são apresentados os parâmetros para determinação dos fatores K_i utilizados nas equações 3.14 e 3.18. Todo o conteúdo aqui apresentado foi adaptado de Rodrigues (1983).

Os fatores utilizados na equação 3.14 para determinação da vida útil de trilhos por desgaste são definidos segundo o estipulado nas próximas oito Tabelas:

Tabela Anexo I.1: Determinação do fator k_1 para 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 Anexo I.2: Determinação do fator k_2 para 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 Anexo I.3: Determinação do fator k_3 para vida útil de trilhos por desgaste

Varição 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 Anexo I.4: Determinação do fator k_4 para vida útil de trilhos por desgaste

Varição 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 Anexo I.5: Determinação do fator k_5 para vida útil de trilhos por desgaste

Varição 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 Anexo I.6: Determinação do fator k_6 para 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 Anexo I.7: 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 Anexo I.8: Determinação do fator k_7 para 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 = extensão da via em curva;

ET = 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 3.18, os fatores k_1 , k_4 e k_5 são definidos nas Tabelas Anexo I.9, I.10 e I.11, 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 Anexo I.2, I.3, e I.8, respectivamente.

Tabela Anexo I.9: Determinação do fator k_1 para vida útil de dormentes

Comprimento da barra de trilho	Fator k_1
Curta	1,000
Média	1,015
Longa	1,030

Tabela Anexo I.10: Determinação do fator k_4 para 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 Anexo I.11: Determinação do fator k_5 para vida útil de dormentes

Varição 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 II

CD com o banco de dados.