UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RAPHAEL DAMASCENO MAROTTA

MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO DA SUPERESTRUTURA FERRROVIÁRIA E OTIMIZAÇÃO NA ALOCAÇÃO DE RECURSOS PARA MANUTENÇÃO

JUIZ DE FORA
2016
RAPHAEL DAMASCENO MAROTTA

MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO DA SUPERESTRUTURA FERRROVIÁRIA E OTIMIZAÇÃO NA ALOCAÇÃO DE RECURSOS PARA MANUTENÇÃO

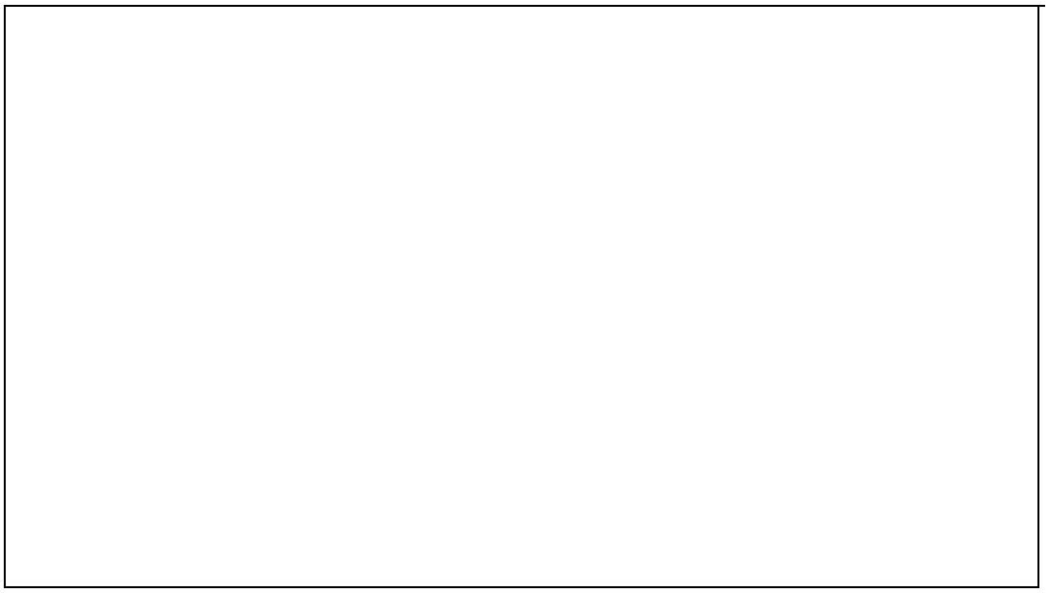
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador: D.Sc., Roberto Malheiros Moreira Filho

Co-Orientador: M.Sc., Antônio Hamilton Michel Merheb

JUIZ DE FORA

2016



RAPHAEL DAMASCENO MAROTTA

MODELAGEM DA DEGRADAÇÃO DA SUPERESTRUTURA FERRROVIÁRIA E OTIMIZAÇÃO NA ALOCAÇÃO DE RECURSOS PARA MANUTENÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 27 de julho de 2016.

BANCA EXAMINADORA

D.Sc., Roberto Malheiros Moreira Filho
Universidade Federal de Juiz de Fora

João Victor Spinelli Teixeira
MRS Logística S.A.

D.Sc., Luiz Henrique Dias Alves
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais Helder e Valéria, por todo apoio ao longo desses anos e por acreditarem sempre em mim.

A MRS Logística pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho e por ter feito parte de minha formação como profissional nos últimos cinco anos.

A Antonio Hamilton Michel Merheb pela amizade e por toda colaboração a este trabalho.

A Bruna minha namorada por todo amor e carinho nos últimos anos.

Ao Anderson, pelo apoio desde os tempos de estágio na MRS Logística S.A.

Ao professor Roberto Malheiros, pela orientação no trabalho.

A Iman Arasteh Khouy por sua contribuição essencial a linha de pesquisa tema deste trabalho.

A Admilson Renato, pela confiança demonstrada e pela oportunidade oferecida.

A Luiz Henrique, pela oportunidade oferecida.

Ao Daniel, pela brilhante gestão da Coordenação de Confiabilidade e Controle da Malha e pela ajuda nesse trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia analítica para a determinação objetiva dos ciclos de correção geométrica em uma ferrovia de Heavy Haul. Em vista do aumento dos volumes de transporte na ferrovia em questão, a otimização dos ciclos de manutenção e de renovação é necessária. A metodologia é baseada em medições de indicadores de qualidade de via com referência em outras ferrovias do gênero. Para a análise desse modelo a extensão da linha foi dividida em segmentos de 100 metros cada, nos quais foram avaliadas a degradação do índice de qualidade com base no volume transportado e dados históricos de intervenções. Além das taxas de degradação, as curvas de recuperação de geometria da via após a conclusão dos serviços de pavimentação foram calculadas. Essas curvas demonstram objetivamente a eficácia do serviço de socaria e servem como modelo matemático para determinar o resultado esperado em cada local após a conclusão do serviço em termos de qualidade desejada. Esta análise apóia a decisão estratégica de qual tipo de intervenção é mais adequado para cada seção avaliada com base no atual estágio de degradação, as taxas de recuperação e o ciclo característico de intervenção. Analisando estes dados e contextualizando com o cenário de intervalos de manutenção disponíveis, disponibilidade do sistema de correção geométrica e com os outros custos serviços associados, é possível estabelecer um cenário de médio prazo adequado garantindo a otimização na alocação de recursos utilizando técnicas de programação linear e ao mesmo tempo manter a via permanente dentro dos padrões de segurança..

Palavras-chave: Via Permanente, Programação Linear , Manutenção

ABSTRACT

This paper presents an analytical methodology for the objective determination of geometric correction cycles in a railway Heavy Haul. In view of the increase in transport levels on the railway in question, optimization of maintenance cycles and renewal is required. The methodology is based on track quality indexes with reference measurements in other similar railways. For the analysis of this model, line extension was divided into segments of 100 meters each, which were evaluated in the degradation of the quality score based on the load transported and historical interventions data. In addition to the degradation rates, the track geometry recovery curves after completion of paving services were calculated. These curves demonstrate the effectiveness tamping service and serve as a mathematical model to determine the expected result for each location upon completion of service in terms of desired quality. This analysis supports the strategic decision of what type of intervention is most appropriate for each section evaluated based on the current stage of degradation, recovery rates and the characteristic cycle of intervention. Analyzing these data and contextualizing with the maintenance intervals scenario available, availability of geometric correction system and other service costs, you can establish a backdrop of appropriate medium-term ensuring the optimization of resource allocation using linear programming techniques and while keeping a permanent way within the safety standards .

Keywords: Permanent way, Linear programming, Track maintenance

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção 18
Figura 2 –Elementos de Via Permanente 20
Figura 3 –Sistema massa-mola representando os veículos ferroviários 29
Figura 4 –Bitola 30
Figura 5 –Bitola Fechada 30
Figura 6 – Superelevação 31
Figura 7 – Desalinhamento em tangente 31
Figura 8 –Desnivelamento Longitudinal 32
Figura 9 –Desnivelamento transversal (Empeno) 33
Figura 10 –Carro-controle (TrackSTAR) 35
Figura 11 – Representação de degradação da via através do TQI 38
Figura 12 –Espectro de Densidade de Potência de diferentes ferrovias e classes de via 40
Figura 13 –Associação de rigidez dos componentes da Via Permanente 44
Figura 14 –Esquema representativo da ação da socadora 45
Figura 15 –Socadora modelo 09-3X 46
Figura 16 –Desguarnecedora 47
Figura 17 –Regressão e mínimos quadrados 50
Figura 18 –Modelo de degradação da via baseado no desvio padrão do nivelamento longitudinal 55
Figura 19 –Taxa de recuperação da via baseado no desvio padrão do nivelamento longitudinal 57
Figura 20 –Referência de recuperação da via baseado no desvio padrão do nivelamento longitudinal 58
Figura 21 –Estados da Cadeia de Markov 60
Figura 22 – Custos de manutenção por MTBT x Desvio padrão nivelamento longitudinal 61
Figura 23 –Função Recuperação de Qualidade MRS 71
Figura 24 –Função Recuperação de Qualidade Rio de Janeiro 71
Figura 25 –Função Recuperação de Qualidade Paraopeba 72
Figura 26 –Função Recuperação de Qualidade Ferrovia do Aço 73
Figura 27 –Função Recuperação de Qualidade Linha do Centro 74
Figura 28 –Função Recuperação de Qualidade Vale do Paraíba 75
Figura 29 –Teste de Normalidade das Taxas de Recuperação na MRS 76

Figura 30 –Distribuições de Probabilidade das Taxas de Degradação dos Corredores da MRS.....77
Figura 31 –Distribuições de Probabilidade das Taxas de Degradação dos Corredores da MRS.....78
Figura 32 –Probabilidade de Exceções dada a Qualidade da Via na MRS.....83
Figura 33 –Probabilidade de Exceções dada a Qualidade da Via no Trecho Carregado 84
Figura 34 –Probabilidade de Exceções dada a Qualidade da Via no Trecho Vazio + Vale do Paraíba 84
Figura 35 –Ciclos de Socaria Projetados para a MRS..... 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –Limites de segurança definidos para parâmetros de geometria 36
Tabela 2 –Exemplos de modelos de degradação estruturais desenvolvidos 41
Tabela 3 –Exemplos de modelos de degradação baseados na geometria desenvolvidos 42
Tabela 4 –Espectros de Densidade de Potência em diferentes países 42
Tabela 5 – Vetor das Restrições do Modelo 65
Tabela 6 – Matriz dos Coeficientes Tecnológicos 68
Tabela 7 –MTBT por corredor da MRS 2015 68
Tabela 8 –MTBT por corredor da MRS 2014 68
Tabela 9 –MTBT por corredor da MRS 2013 68
Tabela 10 –Intervalos de manutenção por corredor da MRS 70
Tabela 11 –Média e desvio padrão das amostras 77
Tabela 12 –TQI x Defeitos 78
Tabela 13 – Ciclos Correção Geométrica Calculados para MRS 79
Tabela 14 – Atendimento a Demanda de Ciclos no Cenário 1 80
Tabela 15 – Utilização de Semanas no Cenário 1. 81
Tabela 16 –Atendimento a Demanda de Ciclos no Cenário 2 81
Tabela 17 –Utilização de Semanas no Cenário 2. 82
Tabela 18 – MTBT x Coeficiente Angular dos Modelos. 86
Tabela 19 – Diferença em Km entre Modelo x Real. 88
Tabela 20 –Atendimento trechos atendidos sem restrição de deslocamento das equipes. 89
Tabela 21 – Utilização das semanas sem restrição de deslocamento das equipes. 89

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AMV - Aparelho de Mudança de Via

FRA – Federal Railroad Adminstration

MTBT – Milhões de Toneladas Brutas Transportadas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

PSD – Power Spectral Density

TQI – Track Quality Index

SD – Standard Deviation

TrackSTAR- (Strength Test Analysis and Recording)

PN – Passagem de Nível

OS – Ordem de Serviço

CDF- Cumulative Distribution Function

PDF – Probability Distribution Function

PCM – Planejamento e Controle da Manutenção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

1.1. Considerações iniciais 15
1.2. Justificativa 15
1.3. Escopo do trabalho 16
1.4. Objetivos 17
1.5. Definição da metodologia 17
1.6. Estrutura do trabalho 19
1.7. Cronograma 20

2. REVISÃO DA LITERATURA SOBRE A SUPERESTRUTURA FERROVIÁRIA , MÉTODOS DE ANÁLISE ESTATÍSTICA E OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO LINEAR. 20

2.1 Componentes de uma via lastreada 20
2.1.1 Trilhos 21
2.1.2 Fixações 22
2.1.3 Dormentes 23
2.1.4 Lastro 24
2.1.5 Sublastro 24
2.1.6 Subleito 25
2.2 Geometria da Via 26
2.2.1 Planimetria 27
2.2.2 Altimetria 27
2.2.3 Relação entre geometria de via e dinâmica dos veículos 28
2.2.4 Principais parâmetros da geometria e bitola 29
2.2.5 Veículo de inspeção da via 33
2.2.6 Limites de segurança para os parâmetros de geometria e bitola 35
2.2.7 Índices de Qualidade de Via 36
2.3 rigidez dos componentes de uma via lastreada 42
2.3.1 Módulo de via e Rigidez 42
2.3.2 A importância das medidas de rigidez na manutenção de via 43
2.4 Manutenção da via permanente, máqunas e métodos 44
2.4.1 Socaria 44
2.4.2 Desguarnecimento 46
2.5 Técnicas aplicáveis a modelagem do problema 47
2.5.1 Distribuição Normal 47
2.5.2 Distribuição Lognormal 48

2.5.3 Regressão Linear 49
2.5.4 Análise residual 50
2.5.5 Pesquisa Operacional e Modelos de Otimização por Programação Linear 51
2.5.6 Modelo de Transportes e Otimização em Redes 52
2.5.7 Teorema de Bayes 53
2.5.8 Processos Estocásticos e Cadeias de Markov 53
2.6 Modelo de degradação baseado no surface quality index 54
2.7 Curvas de eficiência da socaria 56
2.8 Predição da condição da via utilizando o modelo markoviano 58

3. CASO MRS: O PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DA VIA E A OTIMIZAÇÃO NA ALOCAÇÃO DOS RECURSOS PARA MANUTENÇÃO 61

3.1. o modelo de degradação 61
3.1.1. Função de recuperação 62
3.1.2. Função de degradação 63
3.2. o modelo de alocação de recursos por programação linear 63
3.3. Probabilidades de exceções dada a qualidade da via 66
3.4. Coleta de dados e determinação das distribuições estatísticas 67
3.4.1. Volume de transporte por corredor na MRS 67
3.4.2. Modelos de intervaloes de manutenção e produtividade de máquinas 69
3.4.3. Taxas de recuperação 70
3.4.4. Taxas de degradação 76
3.4.5. Probabilidades de exceções de geometria 78

4. RESULTADOS 79

4.1. Resultados atingidos com os modelos 79
4.1.1. Ciclos de correção geométrica e demanda de socaria 79
4.1.2. Alocação da capacidade das socadoras 80
4.1.3. Probabilidades de Exceções x TQI 83
4.2. Avaliação dos resultados, análise da aderência e projeções 85
4.2.1. Análise dos ciclos de correção geométrica 85
4.2.2. Avaliação do modelo de alocação de máquinas 87
4.2.3. Avaliação das probabilidades de exceções 90

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS 90

6. REFERÊNCIAS 92

7. ANEXO 1 – TABELA 5: – VETOR DAS RESTRIÇÕES DO MODELO..... 94

8. ANEXO 2 – TABELA 6: – MATRIZ DOS COEFICIENTES TECNOLÓGICOS..... 96

9. ANEXO 3 – TERMO DE AUTENTICIDADE..... 97

10. ANEXO 4 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA 98

1. INTRODUÇÃO

A crescente competitividade observada em todos os setores da indústria, a consequente busca por redução de custos e o aumento da eficiência operacional necessários para se tornar competitivo no mercado são fatores que, conforme observado pelo acadêmico, têm estimulado cada vez mais a adoção de práticas que sejam capazes de reduzir a variabilidade dos processos e otimizar o aproveitamento dos recursos disponíveis,com o objetivo de aumentar a produtividade das empresas.

Associado a esse contexto, o alto grau de complexidade de todos os processos envolvidos em uma cadeia de produção e a interação entre eles torna necessário empenhar esforços na modelagem matemática dos sistemas. O objetivo é representar situações reais através de modelos a partir dos quais seja possível identificar os gargalos, mensurar perdas e avaliar os impactos de possíveis mudanças nos cenários de atuação, pois, de maneira geral, os modelos são desenvolvidos para suprir a inabilidade do cérebro humano de processar grandes volumes de informações e para analisar como as variáveis presentes em um processo relacionam-se e evoluem ao longo de determinado período. A modelagem apresenta-se, portanto, como uma importante ferramenta para a redução do grau de incerteza na tomada de decisão.

Assim, é necessário ressaltar a necessidade de tornar mensurável qualquer processo, pois, para o autor, é através da medição que se conhece o desempenho de um sistema e apenas com “dados em mãos” é possível se pensar em redução da variabilidade de processos e otimização de recursos.

A partir desse contexto e associado à experiência de trabalho na Engenharia de Manutenção da Malha na *MRS Logística S/A* foi identificada a oportunidade de construção de um modelo para determinar os ciclos de correção geométrica da via em cada corredor de transporte da MRS e, desse modo, propor distribuição das máquinas responsáveis pela manutenção por região de forma a maximizar a utilização destes equipamentos, além de definir o nível de qualidade da via que sustente a confiabilidade requerida para os próximos anos.

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este trabalho irá discorrer sobre técnicas para modelagem da degradação de pavimentos ferroviários e, feito isso, utilizar métodos estatísticos para tratamento de dados e análises em conjunto com técnicas de otimização através de programação linear. O objetivo é determinar políticas ótimas de manutenção na via permanente, assim como determinar algumas das principais estratégias para a manutenção da via nos próximos anos na MRS Logística.

1.2. JUSTIFICATIVA

A manutenção de via representou, em 2015, um dos maiores custos da MRS Logística, sendo um assunto estratégico dentro da companhia. Além disso, uma manutenção de baixa qualidade pode se tornar uma restrição para operação, aumentando dessa forma também os custos da companhia, além de limitar o crescimento da empresa.

Especificamente sobre Via Permanente, as soluções para mitigar possíveis problemas ainda possuem um maior grau de dificuldade, uma vez que o ganho na disponibilidade deve ser garantido através de melhorias na confiabilidade dos seus ativos. Até então os ciclos de intervenção na via eram determinados de forma empírica ou através de referências baseadas na literatura existente. Já para o material rodante, o número de ativos total da companhia pode ser dimensionado, de forma a compensar o percentual de indisponibilidade desses equipamentos, através da compra de um maior número de ativos de acordo com o volume de transporte previsto no plano diretor da companhia, desde que essa política seja viável economicamente.

Essa metodologia em geral funciona bem até certo ponto, porém não é possível identificar através dela qual o estágio atual de degradação, nem projetar o futuro baseado em medições e modelos e, assim, fica mais difícil nos preparar para o futuro se utilizamos esses métodos.

Portanto, a parametrização e a modelagem desse fenômeno irão possibilitar maior organização e eficiência nos processos de manutenção da via, além de tornar possível definir, para os próximos anos, qual é a melhor estratégia a ser adotada pela companhia para a manutenção de via. Isso, ao considerar o nível de confiabilidade que será requerido da linha

para os próximos anos devido ao aumento do volume transportado e do aumento de carga por eixo dos vagões para 36 toneladas com a aquisição dos vagões GDU.

O trabalho terá um grande enfoque na escolha da estratégia de manutenção na região da Serra do Mar, devido às características operacionais desse trecho, como o alto volume transportado anualmente e seu já elevado estágio de degradação. Além disso, com o possível aumento da carga por eixo na MRS Logística é necessário que a manutenção desse local tenha uma atenção especial, já que o impacto do aumento de carga deverá ser maior em regiões que já se encontram hoje em piores condições.

1.3. ESCOPO DO TRABALHO

O trabalho irá abranger toda a malha ferroviária sob concessão da MRS Logística, exceto as regiões da Baixada Santista e Jundiaí, que não serão abordadas por não terem feito parte dos estudos realizados no plano diretor da manutenção de via de 2014. Ademais, não serão utilizados modelos estruturais para determinar a degradação da via, apenas modelos baseados na geometria, devido à sua praticidade se comparados aos outros existentes. Também não serão realizados estudos detalhados para a degradação de pontes, túneis e demais obras de arte presentes na via, nem para PN ou AMV's (Aparelho de Mudança de Via).

As técnicas utilizadas na construção dos modelos de alocação de máquinas de correção geométrica têm como premissa a linearidade do problema, o que pode não ocorrer na prática, pois variáveis como "produtividade dos equipamentos" e "custos associados ao processo" podem não se comportar dessa forma. Os tempos disponíveis para intervenção em cada local foram definidos com base no modelo de intervalo padrão da MRS no ano de 2015 e mesmo esses podem sofrer alterações dependendo da necessidade de produção da empresa.

O modelo considera a estratégia de manter máquinas cativas por região, o que também pode sofrer alterações na prática devido à junção de fatores como indisponibilidade de equipamentos e urgência no atendimento da demanda de algum trecho. O modelo não considera produtividade diferenciada para tipos de dormente diferentes, como aço e madeira nem para condições ruins do lastro, porém esses fatores podem determinar menor produtividade em algumas situações. Por fim, as demandas por região são definidas a partir dos ciclos de manutenção calculados para cada trecho com base na média das taxas de degradação e de recuperação, porém essas taxas podem variar de forma considerável dependendo das condições da via.

1.4. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo modelar o comportamento da via a partir do histórico de 3 anos de inspeções realizadas pelo carro controle utilizado na MRS Logística e, a partir desses dados, determinar os futuros ciclos de intervenção baseado no modelo construído. Feito isso, serão distribuídas as capacidades das máquinas responsáveis por realizar a manutenção da via para cada local de acordo com a demanda calculada através do modelo de degradação.

Para realizar a distribuição das máquinas serão utilizadas técnicas de otimização em redes a partir de um modelo construído utilizando as regras de intervalo de manutenção vigentes hoje na MRS Logística e as capacidades de produção das máquinas informadas pela Gerência de Equipamentos e Trilhos. Será demonstrado através da teoria Bayesiana, a influência da qualidade da via no surgimento de defeitos de geometria e o impacto disso nos custos de manutenção.

Espera-se que ao final desse trabalho seja possível identificar as diferenças de comportamento de degradação da via de acordo com o trecho e, posteriormente, desenvolver estudos que possam explicar tal comportamento. As informações apresentadas também poderão servir de auxílio para a escolha da melhor estratégia de manutenção para cada região. Acredita-se que o desenvolvimento deste estudo possa servir como “embrião” para futuros trabalhos com o objetivo de definir o nível ótimo de qualidade da via levando em conta aspectos econômicos e de segurança.

1.5. DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA

Para definição adequada da metodologia a ser adotada no presente trabalho, utilizou-se como base de referência a divisão apresentada por Miguel (2010) de Metodologia de pesquisa em engenharia de produção.

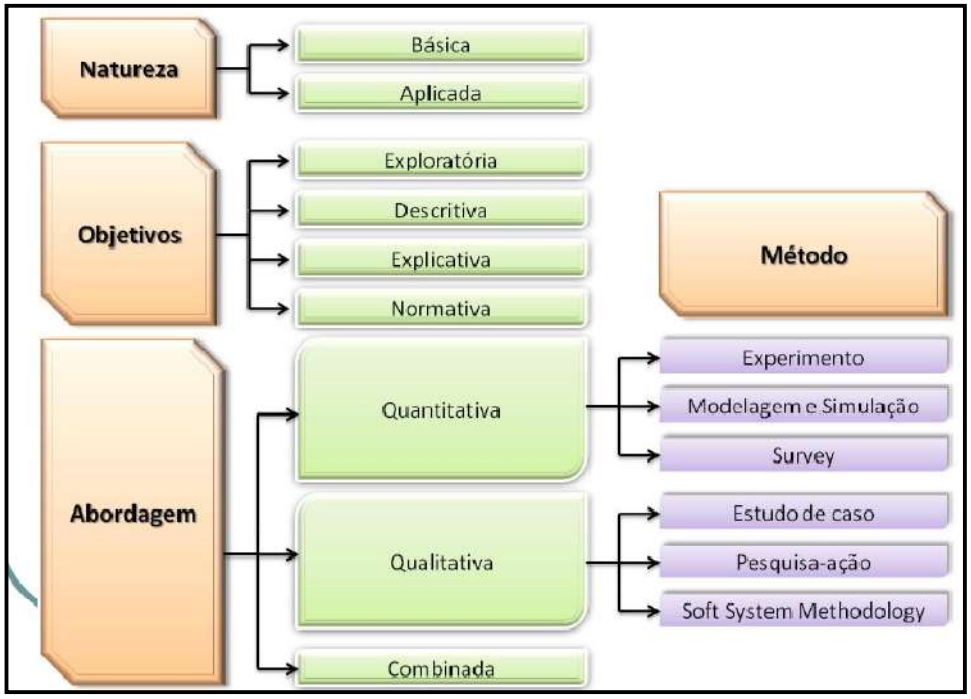


Figura 1 – Metodologia de pesquisa em Engenharia de Produção
Fonte: Miguel, 2010 (Adaptado)

A natureza deste trabalho é aplicada, uma vez que o conhecimento adquirido ao longo da Graduação em Engenharia de Produção será aplicado através do estudo e da construção de um modelo para uma situação existente na empresa MRS Logística, especificamente dentro da Via Permanente. O trabalho pode ser classificado como descritivo, pois apresenta as características de cada corredor de transporte da MRS Logística no que diz respeito ao fenômeno de degradação da superestrutura ferroviária. Essas características foram coletadas através de observação sistemática feita por inspeções realizadas periodicamente pelo veículo de inspeção de via.

Além disso, a abordagem do problema é quantitativa, pois ao utilizar técnicas de análise estatística dos dados disponíveis será construído um modelo matemático da degradação da geometria de via permanente. Assim, a partir dessa etapa, utilizando como variável de entrada os volumes de transporte previstos para os próximos anos, será realizada simulação de estados futuros e, baseado nesses estados, será criado um modelo de distribuição de recursos por programação linear que irá otimizar a alocação de máquinas destinadas à correção geométrica.

O método empregado para obter as informações necessárias à construção dos modelos e utilização das técnicas de otimização consiste nos seguintes passos:

1. Levantamento das informações da geometria da linha(desvio padrão nivelamento longitudinal) coletadas desde a 31 ª inspeção do TrackSTAR, levantamento dos registros de socaria em sistema (km e data) desde 2013 e levantamento do volume transportado no período;

2. Alinhar as inspeções do período a ser avaliado para garantir a acurácia da taxa de degradação de cada trecho;

3. Determinar a taxa de degradação a partir da evolução do desvio padrão dos dados de geometria e do MTBT transportado no período (regressão linear);

4. Selecionar através dos registros de OS no sistema os locais nos quais houve socaria para que possa ser medido o poder de recuperação da qualidade da linha pela correção geométrica;

5. Comparar os registros em sistema com os dados coletados pelo TrackSTAR para garantir a acurácia da análise de recuperação da linha pós socaria;

6. Determinadas as taxas de degradação e as curvas de recuperação, calcular os ciclos de intervenção a partir do MTBT previsto para os próximos anos em cada corredor;

7. Apresentação dos resultados para cada corredor,comparação dos valores com *benchmarking* em outras ferrovias, referências teóricas e outros trabalhos semelhantes publicados.Destacar locais onde os ciclos previstos para os próximos anos sejam muito curtos,alertar para locais com elevadas taxas e degradação;

8. Utilizar informação para alocação de máquinas de correção geométrica, cálculo de capacidade e nível ótimo de qualidade da linha levando em conta segurança e custos de manutenção;

9. Determinar as probabilidades de falha dado a qualidade da via do local.

As análises serão realizadas no *Excel, Minitab, Rangecam e Matlab*, os modelos adotados serão os mesmos apresentados na revisão de literatura sobre o pavimento ferroviário e sobre as técnicas de otimização.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O primeiro capítulo descreve o trabalho de forma geral, de modo a explicitar o assunto e dimensioná-lo no tempo e no espaço. Assim, com as considerações iniciais sobre o tema e o objetivo, é possível definir os principais aspectos do estudo, que são seguidos pelas justificativas e o escopo do trabalho. A definição da metodologia permite determinar os

passos a serem seguidos, além de possibilitar a busca por respostas para comprovação das hipóteses levantadas.

Já no segundo capítulo, é realizada uma revisão bibliográfica sobre a superestrutura de uma via lastrada, técnicas matemáticas de modelagem estatística e otimização. Desse modo, o capítulo apresenta de maneira específica, os aspectos e as características da ferrovia que será objeto deste estudo, além de conhecimentos já publicados sobre geometria de via permanente.

O terceiro capítulo, por sua vez, apresenta o desenvolvimento do assunto descrevendo as unidades de análise e sua utilização no modelo, e o quarto capítulo, os resultados atingidos. Por fim, o quinto capítulo discute as conclusões alcançadas neste trabalho.

2. REVISÃO DA LITERATURA SOBRE O PAVIMENTO FERROVIÁRIO, MÉTODOS DE ANÁLISE ESTATÍSTICA E OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO LINEAR

Nesta sessão será apresentada uma revisão da literatura disponível sobre o pavimento ferroviário, abordando seus principais componentes, modelos de degradação, assim como métodos e equipamentos utilizados na manutenção da superestrutura ferroviária. Desse modo, compreendidos os mecanismos que governam o desgaste dos componentes, iremos apresentar o material que versará sobre as principais técnicas e métodos estatísticos utilizados na modelagem do problema alvo deste trabalho, assim como as técnicas disponíveis para a otimização do modelo.

2.1 COMPONENTES DE UMA VIA LASTRADA

Para Selig (1989) o sistema de uma via lastrada consiste tipicamente de trilhos, fixações, dormentes, material agregado de rocha (lastro), sublastro e subleito. A figura abaixo mostra uma típica seção de uma via lastrada e seus diferentes componentes. Assim, embora o princípio de uma estrutura de via lastrada não tenha se alterado substancialmente, importantes melhorias foram realizadas após a Segunda Guerra Mundial.

Os componentes da via podem ser classificados em duas principais categorias, a saber: (a) superestrutura e (b) infraestrutura. A superestrutura é composta pelos trilhos, fixações e dormentes, a infraestrutura, por sua vez, é composta pelo lastro, sublastro e

subleito. A infraestrutura é separada da superestrutura pela interface entre o dormente e o lastro, o qual é o mais importante elemento para a determinação da distribuição de carga para as mais profundas seções da linha.

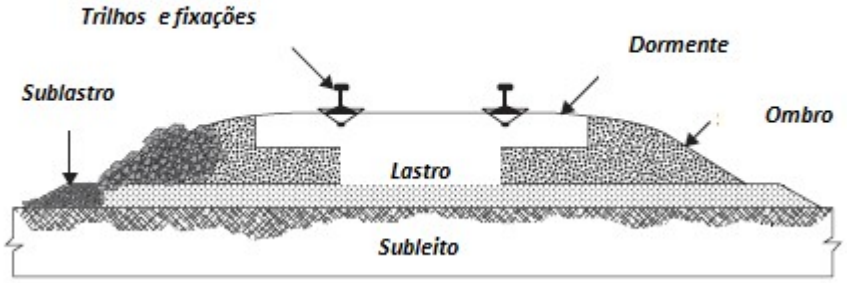


Figura2 – Elementos de Via Permanente
Fonte: Indraratna , 2010 (Modificado)

2.1.1 Trilhos

Segundo Selig (1989) trilhos são componentes longitudinais de aço que têm a função de guiar e suportar as rodas dos trens e devem ter rigidez suficiente para servir como vigas, as quais são responsáveis por transferir a carga concentrada das rodas para os dormentes, que estão dispostos ao longo da via, sem causar deflexão excessiva aos mesmos. Além disso, trilhos também podem servir como condutores elétricos para os circuitos de via utilizados na sinalização da ferrovia.

Para Indraratna (2010), o perfil da superfície dos trilhos em conjunto com o perfil das rodas influencia diretamente na condução dos veículos enquanto eles percorrem a via. Defeitos superficiais de trilhos e rodas também podem contribuir para o aumento das cargas dinâmicas às quais a via é submetida durante a passagem dos trens. As seções dos trilhos podem ser conectadas através de juntas ou através de soldas elétricas ou aluminotérmicas.

As juntas são mais comumente usadas em curvas por proporcionarem alívio de tensão aos trilhos ou em linhas secundárias e são uma das maiores causas de problemas na manutenção da superestrutura ferroviária. Elas formam descontinuidades na superfície de rolamento que provoca impacto dinâmico na superfície dos trilhos e nas pontas das talas e isso acarreta irregularidades na via e vibrações indesejáveis nos veículos que trafegam sobre a superestrutura.

Assim, a combinação entre a baixa rigidez dos trilhos nas juntas e o impacto dinâmico causado por elas causa grandes tensões no lastro e no subleito do pavimento, aumentando o assentamento do lastro na região e produzindo desníveis na via férrea. Desse modo, a soma desses fatores contribui para aumento das falhas nos trilhos, desgaste nos dormentes e contaminação do lastro na região das talas. Portanto, as juntas normalmente são responsáveis por acelerar a degradação da linha.

2.1.2 Fixações

Para Selig (1989) as conexões entre trilhos e dormentes têm uma extensa gama de variações, contudo, esses detalhes estão além do escopo deste trabalho e não serão abordados de maneira profunda.

Para Selig (1989) o propósito do sistema de fixações é manter os trilhos presos aos dormentes e oferecer resistência aos movimentos laterais, verticais e longitudinais dos trilhos. O conjunto de forças que provoca tais movimentos provém do contato com as rodas e da variação de temperatura nos trilhos que provoca sua expansão e retração. Dormentes de madeira usualmente requerem placas de apoio de metal para distribuir a força dos trilhos sobre a superfície da madeira, isso provém uma pressão de rolamento adequada que protege a madeira contra o desgaste mecânico.

Para Selig (1989) além das funções citadas acima, as placas de apoio são responsáveis por auxiliar as fixações na retenção do movimento lateral do trilho através da fricção entre a placa e superfície do dormente e, além disso, ajudar na inclinação dos trilhos necessária ao contato roda trilho adequado. O tamanho inadequado das placas de apoio pode ocasionar a compressão excessiva da madeira, assim como a quebra da própria placa; o ombro das placas é responsável por auxiliar na resistência às forças laterais às quais o sistema é submetido e os grampos são responsáveis por prover a resistência as forças longitudinais. Ademais, para dormentes de madeira não são utilizadas palmilhas, pois a própria madeira já provém a resiliência necessária ao sistema de fixação.

Para Selig (1989) as dormentes de concreto possuem fixação elástica que oferece contenção vertical, longitudinal e lateral. Assim, são isolados eletricamente dos dormentes ou trilhos para evitar ocupações indevidas dos circuitos de via. No caso dos dormentes de concreto, as palmilhas são responsáveis por desempenhar as funções de resiliência para o

sistema trilho/dormente, contribuir para o amortecimento das vibrações provocadas pelo contato com as rodas e reduzir o atrito entre os trilhos e o dormente.

2.1.3 Dormentes

Em linhas lastradas, Indraratna (2010), os trilhos se apoiam sobre os dormentes e segundo Selig (1989) esses servem de base para o sistema de fixação dos trilhos, assim, o conjunto trilho/dormente é responsável por manter a bitola de projeto da via férrea. Os dormentes são posicionados acima da camada de lastro compactado separado por uma distância específica e durante a passagem dos trens recebem a carga concentrada das forças verticais, laterais e longitudinais transmitidas pelos trilhos. Essas forças são distribuídas por uma ampla área para reduzir a tensão presente no espaço de contato entre o lastro e o dormente para níveis aceitáveis, de forma a não promover a deterioração de nenhum dos componentes da superestrutura. Dormentes de madeira, concreto e uma limitada quantidade de dormentes de aço são utilizados.

Para Indraratna (2010) a vantagem do dormente de concreto é a sua menor vulnerabilidade às variações climáticas e sua vida útil sob as condições adequadas pode ser significativamente maior se comparado aos dormentes de madeira. Essas condições dizem respeito à qualidade do solo da plataforma e da camada de lastro da via, assim como o trilho e a geometria da solda. Ademais, dormentes de concreto são mais vulneráveis ao impacto de cargas especialmente na faixa de 25 a 300 Hz de frequência.

Para Indraratna (2010), basicamente as funções gerais dos dormentes são prover o suporte e o ponto de fixação para trilhos, sustentar as forças aplicadas sobre os trilhos e transferi-las da forma mais uniforme possível para a cama de lastro, além de manter a bitola da linha e a inclinação adequada dos trilhos, prover isolamento elétrico para os trilhos e resistir aos esforços mecânicos e ao efeito do clima ao longo dos anos.

Desse modo, todos os dormentes possuem vantagens e desvantagens à implementação na ferrovia e cabe ao especialista determinar viabilidade da utilização de determinado tipo em detrimento de outro de acordo com a realidade de cada ferrovia e mesmo em função das diferentes características de cada trecho.

Na *MRS Logística,* a forma como é realizada a circulação dos trens torna grande a variabilidade de volume de transporte anual para cada corredor, podendo chegar, dependendo do período do ano, a mais de 15 milhões de toneladas por mês em alguns locais e ao mesmo tempo menos de 3,5 milhões de toneladas em outros.

Além disso, dentro da concessão existem trechos da ferrovia com projetos de traçado que datam de mais de 100 anos atrás e ao mesmo tempo projetos modernos do final da década de 80. Isso, além de outras diferenças como existências de linhas singelas e duplicadas, número expressivo de obras de arte em alguns trechos, tipos de carga e vagões diferentes por região e etc. Todas essas diferenças de características têm de ser consideradas para a escolha do componente adequado e a estratégia de manutenção.

2.1.4 Lastro

O termo lastro em ferrovia refere-se, essencialmente, ao material granular posicionado acima do sublastro ou subleito com propósito de agir como plataforma de suporte para a superestrutura - trilhos, dormentes e etc. (INDRARATNA, 2010). Os dormentes são incorporados à camada de lastro que possui tipicamente uma espessura que varia entre 250 mm a 350 mm (medidos a partir do lado de baixo do dormente).

Para Indraratna (2010), a origem do lastro varia de país para país dependendo da qualidade disponível de rocha, de regulamentações ambientais e das condições econômicas. Não há especificação universal para as características do lastro, tais como tamanho, forma, dureza, fricção, textura, abrasão, resistência e composição mineral que poderá estabelecer a performance ótima da linha submetida a todos os tipos de carga,subsolo e fatores ambientais. Além disso, uma ampla variedade de materiais é utilizada como lastro por todo o mundo. Nesse contexto, os arenitos são materiais que frequentemente apresentam falhas quando utilizados como lastro, principalmente devido ao seu afofamento quando em contato com a água e sua incapacidade em resistir a altas cargas cíclicas.

Segundo Selig (1989), o lastro deve ser capaz de: servir como plataforma de suporte estável para as cargas e dormentes; transmitir as altas tensões da interface entre o dormente e o lastro para a camada de subleito em níveis reduzidos e aceitáveis; oferecer estabilidade para os dormentes contra as forças verticais, laterais e longitudinais; oferecer o grau de elasticidade e resiliência adequado para toda a linha e o mínimo de deformação plástica ao longo dos ciclos de manutenção, além de oferecer permeabilidade suficiente para a drenagem.

2.1.5 Sublastro

O sublastro é, segundo Indraratna (2010), um agregado posicionado entre o lastro e o subleito composto por brita bem graduada ou mistura de areia e cascalho. O sublastro deve ser

projetado para prevenir a penetração de material do lastro no subleito e a migração de materiais do subleito (finos) para cima. O sublastro, ademais, age como um filtro e separa as camadas na infraestrutura, transmitindo e distribuindo as tensões às quais o lastro é submetido para o subleito sobre uma ampla área, além de agir como drenagem.

Segundo Selig (1989), desse modo, na abordagem dos projetos atuais, a principal função do sublastro é proteger a camada do subleito de excessos de carga. Em outras palavras, o sublastro é compactado de forma a adquirir uma rigidez muito superior à do solo natural do subleito, de forma que a distribuição de carga para o subleito seja reduzida significativamente. Deve-se ter atenção durante o dimensionamento do sublastro também para as funções de drenagem e filtragem.

Portanto, o sublastro é usualmente composto por materiais altamente graduados e os métodos de projeto empíricos frequentemente determinam a distribuição de tamanho de suas partículas. Assim, onde não existe sublastro ou onde ele é projetado de forma insuficiente, partículas de argila e lama podem formar uma suspensão ou se liquefazer devido à infiltração deágua. Essa suspensão formada pode subsequentemente ser bombeada para cima contaminando o lastro quando submetido a alto carregamento e esse fenômeno é conhecido como “bombeamento de lama”, enquanto em áreas litorâneas é comumente observado após chuvas de alto índice pluviométrico.

Em resumo, podemos dizer, portanto, que o sublastro deve ser capaz de dissipar as tensões originadas pelo tráfego dos trens na base do lastro para níveis toleráveis no topo do subleito, além de prevenir a mistura ou a interpenetração do subleito e do lastro.

2.1.6 Subleito

O subleito é, para Indraratna (2010), a plataforma na qual a estrutura da via é construída. Sua principal função é oferecer uma base estável para o sublastro e demais camadas do lastro.

Para Indraratna (2010), a influência da carga devido ao tráfego de trens induz tensões que se estendem até 5 metros abaixo da base dos dormentes. Isso está consideravelmente além da profundidade do lastro e do sublastro. Consequentemente, o subleito é um importantíssimo componente da infraestrutura à qual tem uma significante influência sobre a performance da via e sua manutenção. Por exemplo, o subleito é o maior componente da resiliência da

superestrutura e por isso contribui substancialmente para a deformação elástica da via quando submetida a carga da roda.

Além disso, segundo Selig (1989), acredita-se que a rigidez do subleito influencia diretamente na deterioração do lastro, trilhos e dormentes, ele é a origem do diferente assentamento da superestrutura ao longo da ferrovia. Assim, o subleito pode ser dividido em duas categorias: 1) solo natural (base) e 2) solo preenchido artificialmente. Quaisquer tipos de solos existentes localmente são geralmente inviáveis economicamente para utilização como subleito.

De qualquer forma, técnicas estão disponíveis para melhorias dos solos no caso de serem inadequados de modo que, para servir como plataforma estável deve-se evitar que o subleito tenha excessivo assentamento após repetidos carregamentos devido ao tráfego, deve ser capaz de resistir às tensões de cisalhamento provocadas pelo tráfego e não deve ter grande variação no seu volume.

2.2 GEOMETRIA DA VIA

Alguns importantes parâmetros que descrevem o *layout* e o caminho da via são definidos como geometria de via. Para Magalhães (2007), numa definição objetiva, o termo geometria de via se refere à posição que cada trilho ocupa no espaço. Mesmo em via perfeita, a posição das duas filas de trilhos varia no sentido longitudinal por meio de sucessivas inclinações e concordâncias verticais entre os greides, formando o chamado “perfil altimétrico da via”. Da mesma forma, a posição de ambas as filas varia no sentido transversal (em lanta), com seções de tangentes ou retas interligadas por setores curvos com características variáveis, formando o perfil planimétrico da linha.

Pelo projeto, a geometria de via deve conter critérios específicos para assegurar o conforto e a segurança para a operação de trens. Por essa razão, existem comitês de estudo e órgãos regulamentadores por todo o mundo responsáveis por definir esses critérios, assim como os limites de segurança e manutenção.

Atualmente, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (doravante ABNT) tem empenhado esforços para regulamentar os limites de segurança para os parâmetros de geometria de via no Brasil, tanto para as ferrovias de bitola métrica (1,00 m) como para a bitola larga (1,60 m), através de contínuas reuniões e discussões realizadas pelo comitê de

traçado e infraestrutura. Na MRS Logística, os limites de segurança adotados são praticamente os mesmos praticados pela *Federal Railroad Administration* (doravante FRA) sendo um pouco mais restritivos para alguns parâmetros do que o órgão regulamentador americano.

A proposta feita pela ABNT no último ano (2014) converge 100% para os parâmetros adotados pela FRA e existe uma previsão de implementação da fiscalização da manutenção da geometria da via dentro desses parâmetros de segurança para os próximos anos. Não há certeza ainda do modelo a ser adotado, mas existe a expectativa de que todas as ferrovias no Brasil sejam inspecionadas periodicamente e que multas sejam aplicadas às concessionárias nos casos em que houver descumprimento da norma.

Dentro desse contexto torna-se cada vez mais necessário monitorar continuamente as condições da via através de carros controle e utilizar essas informações para definição da estratégia de manutenção de cada corredor de transporte da ferrovia de acordo com as características de cada trecho.

2.2.1 Planimetria

O traçado planimétrico básico de uma estrada compreende a existência de tangentes e curvas, dispostas entre si de forma continua e normalmente alternada em ambas as direções. As tangentes são segmentos de reta que unem duas curvas subsequentes, recebendo essa denominação por tangenciarem as curvas em projeção horizontal.

As curvas circulares, ou de raio constante, podem ser de mesmo sentido ou de sentidos opostos e podem ser separadas por uma tangente ou ligadas entre si. O ideal é que as curvas contíguas tenham a concordância de uma tangente, que deve ter um comprimento mínimo, sem superelevação, equivalente ao maior veículo ferroviário que circule na linha (distância entre eixos extremos) (MAGALHÃES,2007).

2.2.2 Altimetria

Analogamente ao traçado planimétrico, o traçado altimétrico básico também é composto de curvas e tangentes (verticais). Neste caso, dois greides retos definidos por suas respectivas declividades devem concordar entre si por intermédio de uma curva que será côncava (no caso das depressões e bacias) ou convexa (no caso das cristas). Para as concordâncias verticais, as curvas circulares são inadequadas sendo as curvas parabólicas as que mais se adaptam a essa situação (MAGALHÃES, 2007).

O perfil altimétrico é muito importante dentro da ferrovia, pois as composições ferroviárias enfrentam grandes dificuldades tanto para subir como para descer em traçados com perfis contendo rampas acentuadas, devido à grande quantidade de massa dos veículos. Além do citado acima, a altimetria influencia diretamente na eficiência energética e em muitos casos pode tornar o custo operacional de uma ferrovia muito mais caro em função disso.

2.2.3 Relação entre geometria de via e dinâmica dos veículos

Segundo Edsveld (2010) as variações da geometria, tanto verticalmente como horizontalmente ao longo da ferrovia, podem provocar acelerações indesejadas nos veículos que trafegam sobre a linha férrea e devido ao impacto na via podem provocar a redução da vida útil de alguns componentes da superestrutura e infraestrutura caso não sejam corrigidos. Em casos extremos essas variações podem provocar descarrilamentos devido ao aumento da relação entre a carga lateral aplicada nos trilhos pela carga vertical denominada L/V.

Para Edsveld (2010), a geometria pode excitar os vagões de forma transiente ou de forma harmônica, o segundo caso ocorre quando as variações em algum parâmetro de geometria formam comprimentos de onda sobre a via que, associados a determinada velocidade de tráfego da composição, acabam por determinar uma frequência que pode ser a mesma de algum dos movimentos do vagão como *yaw , roll , pitch, bounce* e etc. Desse modo, caso isso aconteça o veículo pode entrar em ressonância com a via conduzindo a esforços excessivos sobre a superestrutura e podendo também levar a descarrilamentos em casos extremos, mesmo que os parâmetros de geometria não ultrapassem os limites estabelecidos pelas normas vigentes.

Esses casos devem ser analisados através de técnicas de processamento de sinais que não serão abordadas neste trabalho e também através de simulações em *softwares* específicos ou ainda através de instrumentação de veículos.

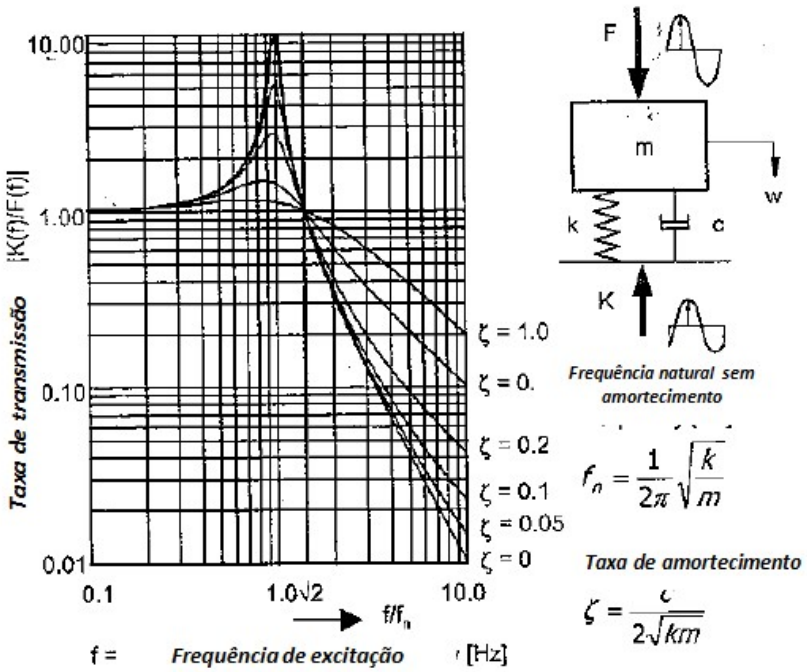


Figura 3 – Sistema massa-mola representando os veículos ferroviários
Fonte: Esveld , 2001 (Modificado)

As variações na geometria provocam aumento dos esforços sobre a via e sobre o veículo e por isso devem ser monitoradas de forma a não extrapolar os limites considerados como críticos à segurança e de maneira a não comprometer a vida útil dos componentes da superestrutura e infraestrutura. O monitoramento é realizado através dos veículos de avaliação da via ou "carros controle" como são conhecidos. Esses veículos são equipados com tecnologia capaz de monitorar as variações nos parâmetros de geometria e servem como uma das principais ferramentas para planejamento de manutenção nas principais ferrovias do mundo.

2.2.4 Principais parâmetros da geometria e bitola

2.2.4.1 Bitola Aberta

Segundo FRA (2007), a bitola é a menor distância entre os boletos nas duas fileiras de trilhos. Deve ser medida em posição próxima ao real ponto de contato do friso com o trilho. Dessa maneira, se a ferrovia opera com rodas no padrão norte-americano com o ponto de bitola da roda 16 mm abaixo do plano de rolamento, então a bitola da via deve ser medida 16 mm abaixo do topo do boleto dos trilhos.

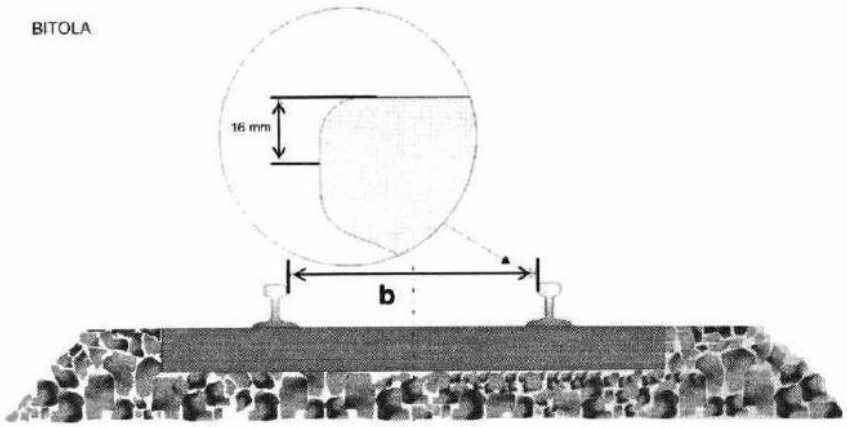


Figura 4 – Bitola
Fonte: Magalhães , 2007

2.2.4.2 Bitola fechada

Ocorre quando a distância entre os trilhos medida a partir do ponto de bitola é inferior a 1,6 m para o caso da bitola larga.

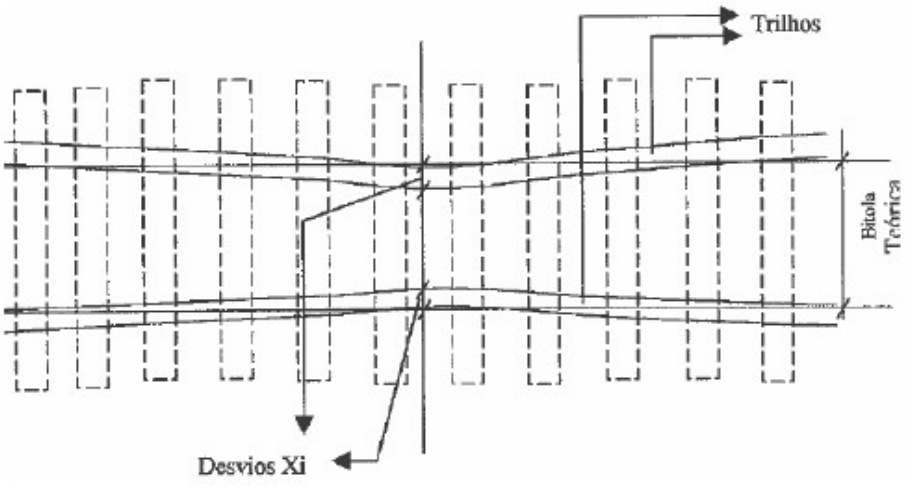


Figura 5 – Bitola Fechada
Fonte: Rodrigues, 2003

2.2.4.3 Superelevação

Magalhães (2007) afirma que superelevação é o incremento de altura que se dá à fila externa de trilhos em curva para que seja possível compensar, no todo ou em parte, a ação da força fictícia.

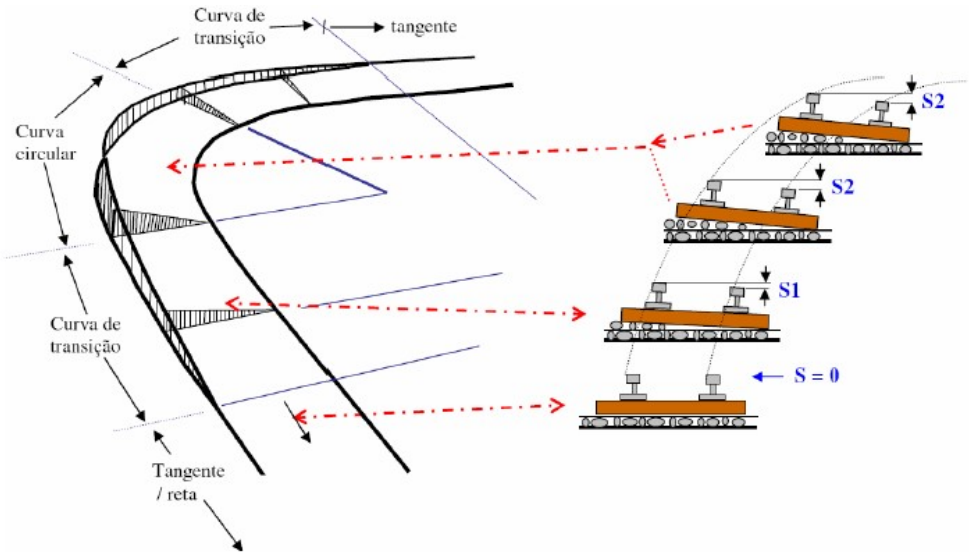


Figura 6 – Superelevação
Fonte: Silva, 2006

2.2.4.4 Alinhamento

Segundo FRA (2007) alinhamento é a variação de curvatura em cada trilho. Na tangente, entende-se que a curvatura deve ser zero. Na curva o alinhamento é medido como a variação em relação ao “alinhamento uniforme” em uma distância específica , entendendo-se “alinhamento uniforme” como a variação de curvatura de projeto da via.

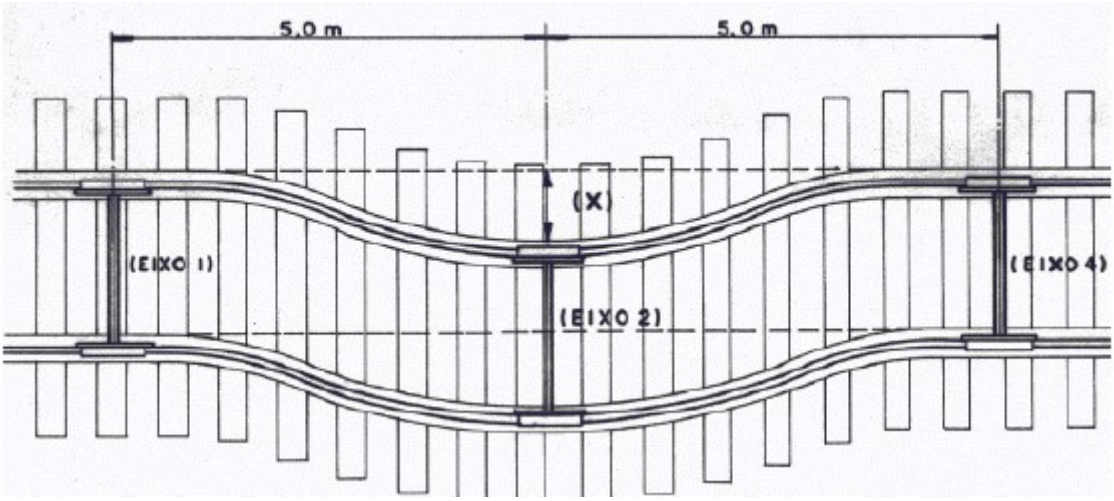


Figura 7 – Desalinhamento em tangente
Fonte: Rodrigues, 2001

2.2.4.5 Nivelamento longitudinal

É a medida no plano horizontal do nível da linha entre dois pontos localizados na superfície do boleto do trilho. As cordas usualmente escolhidas para medir esse parâmetro são de 10 m ou 20 m e os limites variam dependendo da corda escolhida.

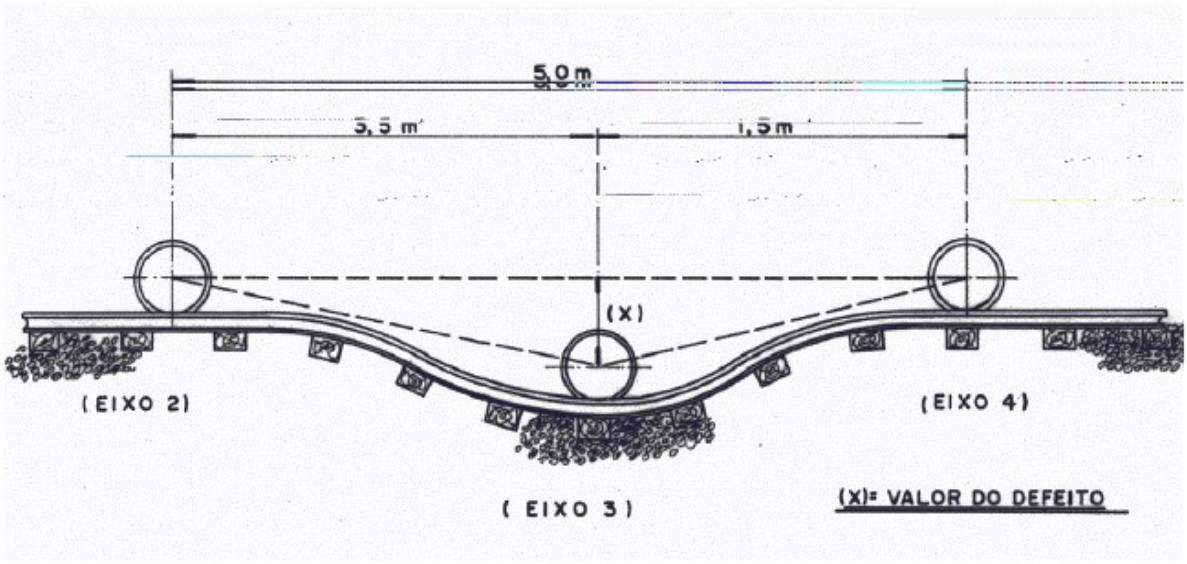


Figura 8 – Desnivelamento Longitudinal
Fonte: Rodrigues, 2001

2.2.4.6 Empeno

Segundo FRA (2007) é a máxima diferença de superelevação medida entre dois pontos em uma tangente ou circular compreendidos dentro de uma corda de 20 m. No caso da MRS Logística o veículo utilizado para realizar essas medições possui uma taxa de amostragem de 1 medição para cada 0,3048 m (1 pé), o que nos oferece aproximadamente 66 medições para uma corda de 20 m dentre as quais devem ser verificadas todas as diferenças de superelevação, sendo a máxima diferença utilizada como valor do parâmetro dentro da corda . Esse tipo de defeito corriqueiramente é responsável por provocar alívio de rodas nos vagões.

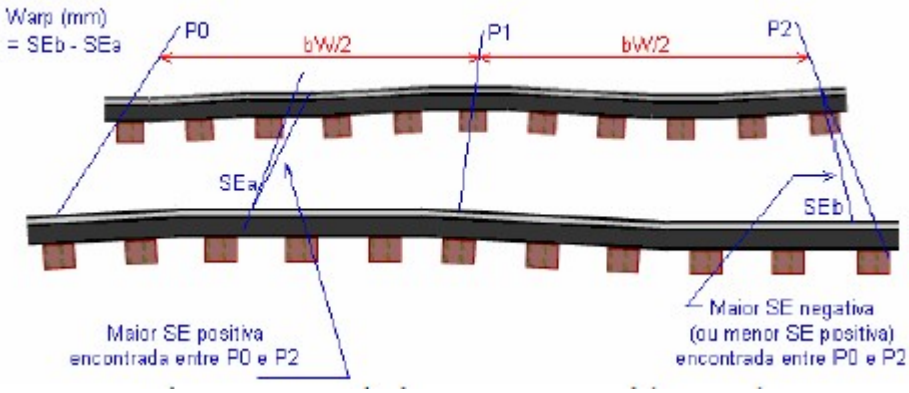


Figura 9 – Desnivelamento transversal (Empeno)
Fonte: Silva, 2006

2.2.4.7 Torção

Segundo a última versão da norma da FRA para geometria das classes de via de 1 até 5, devido a restrições físicas no comprimento da espiral, além das práticas operacionais e experiência, a variação na superelevação em espirais para cada 10 m, acima dos limites estabelecidos por norma é considerada um risco operacional e, portanto, deve ser classificada também um defeito de geometria.

2.2.4.8 Medições de retenção de bitola

Além dos parâmetros citados acima, o carro controle utilizado na MRS Logística também monitora as chamadas medições da retenção da bitola. Os limites de segurança para esses parâmetros estão definidos na norma da FRA, porém não estão definidos ainda pela ABNT e isso se deve muito ao fato de nem todos os veículos de inspeção das demais ferrovias estarem equipados com o eixo aplicador de carga que torna possível o monitoramento desses parâmetros.

De forma objetiva podemos dizer que esses parâmetros dizem respeito à diferença entre bitola estática (sem aplicação de carga) e bitola carregada e dentre eles podemos citar a projeção de bitola carregada, diferença de bitola e taxa de abertura de bitola.

Neste trabalho não será abordado o detalhe do cálculo dessas medições mas, de maneira geral, é possível afirmar que esses parâmetros podem significar incapacidade de retenção de bitola devido a dormente inservível na via ou deficiência na fixação, o que reduz a rigidez lateral do pavimento.

2.2.5 Veículo de inspeção da via

Na MRS Logística, o equipamento utilizado para medição dos parâmetros de geometria além do desgaste de trilhos é o *TrackSTAR* (a sigla *STAR* significa *Strength Test Analysis and Recording*). Esse equipamento é um veículo rodo-ferroviário que percorre toda a malha da MRS Logística realizando as avaliações da via de acordo com os ciclos de inspeção que são determinados, basicamente, pelo volume de transporte de cada trecho.

O equipamento conta com um pacote inercial constituído de um osciloscópio e um acelerômetro e esses componentes são responsáveis por identificar a magnitude da variação

dos parâmetros de geometria em conjunto com o sistema de câmeras a *laser* que é responsável por identificar o nível de desgaste dos trilhos e a medida da bitola da via.

O ponto positivo desse veículo é basicamente, a facilidade na logística de deslocamento para realização das inspeções, já que o equipamento se desloca tanto através da via férrea como através da rodovia, o que é uma grande vantagem em relação a outros equipamentos de inspeção para as características da MRS Logística, uma vez que, dessa forma,há redução da necessidade de intervalos na produção para deslocamento. Isso contribui para agilidade da inspeção, além de reduzir o impacto operacional no caso dos locais da malha com alto volume de transporte.

Além disso, o *TrackSTAR* é equipado com o eixo aplicador de carga que torna possível o monitoramento das medições da capacidade de retenção de bitola da via por parte do sistema de fixação e dormentes. Ao final de cada inspeção, o especialista ou operador do TrackSTAR entrega ao coordenador de via, que é o responsável pela manutenção da superestrutura da linha, um relatório contendo as medições dos parâmetros de geometria e bitola que excederam os limites estabelecidos pela norma praticada na MRS Logística, além dos gráficos gerados pela inspeção.

Desse modo, para cada tipo de defeito e para cada classe de via são determinados prazos de atendimento e reparo de acordo com o procedimento adotado na empresa e caso esses prazos não sejam atendidos deve ser imposta restrição de velocidade no local até que o reparo seja realizado.

Figura 10 – Carro-controle (TrackSTAR)
Fonte: Março, 2006

2.2.6 Limites de segurança para os parâmetros de geometria e bitola

Abaixo são apresentados os limites de segurança para os parâmetros de geometria e bitola adotados na MRS Logística. Como dito anteriormente, esses limites são praticamente os mesmos adotados pela FRA, sendo apenas mais restritivos para os parâmetros de alinhamento.

Tabela 1 – Limites de segurança definidos para parâmetros de geometria

		Descrição do parâmetro de geometria de via	Velocidade - Carga				Notas
			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	
			0-16 km/h	17-40 km/h	41-64 km/h	65-96 km/h	
Bitola	Nº 1	**Limite de bitola aberta (Bitola estática)** Limite de bitola apertada (mm)	38 mm 13 mm	32 mm 13 mm	32 mm 13 mm	25 mm 13 mm	Adicionar valor L. Carregada / Usar PLC
	Nº 2	**Descasamento das pontas dos trilhos nas juntas** Topo do Boleto = Topo (mm) Linha de Bitola = Linha (mm)	Topo = 6 mm Linha = 6 mm	Topo = 6 mm Linha = 5 mm	Topo = 5 mm Linha = 5 mm	Topo = 3 mm Linha = 3 mm	
	Nº 3	**Variação Rápida de Bitola em 10m** (Bitola Estática)	25 mm	19 mm	19 mm	13 mm	
	Nº 4	**Limite de bitola aberta (Bitola carregada)**	47	39	39	32	
Nivelamento longitudinal	Nº 4	**Desnivelamento máximo do perfil longitudinal (Top)** Flecha no topo trilho, no 1/2 da corda de 20m	76 mm 3"	70 mm 2 3/4"	57 mm 2 1/4"	51 mm 2"	Adicionar valor L. Carregada
	Nº 5	**Inclinação Máxima do Perfil Longitudinal (Runoff)** Inclinação do trilho na extremidade da corda de 10m	89 mm 3 1/2"	76 mm 3"	51 mm 2"	38 mm 1 1/2"	
Nivelamento transversal	Nº 6	**Variação do nivelamento transversal em 20 m** (Empeno - Warp) na tangente ou curva circular	76 mm 3"	57 mm 2 1/4"	51 mm 2"	44 mm 1 3/4"	Adicionar valor linha carregada
	Nº 7	**Variação do nivelamento transversal em 10 m** (Torção - Twist) na espiral de entrada ou de saída	51 mm 2"	44 mm 1 3/4"	32 mm 1 1/4"	25 mm 1"	
Alinhamento	Nº 9	**Desalinhamento de curva em 20 m** Variação mínima de flecha horizontal em relação à média das flechas, 1/2 corda de 20 m	127 mm 5"	76 mm 3"	44 mm 1 3/4"	31 mm 1 1/2"	Adicionar Valor Linha Carregada
	Nº 10	**Desalinhamento de curva em 10 m** Variação máxima de flecha horizontal em relação à média das flechas, 1/2 da corda de 10 m	Avaliar na Corda de 20m	25 mm 1"	32 mm 1 1/4"	38 mm 1/2"	
	Nº 11	**Defeito de alinhamento em tangente em 20 m** Variação máxima de flecha horizontal em relação à tangente, 1/2 da corda de 20 m	127 mm 5"	76 mm 3"	44 mm 1 3/4"	31 mm 1 1/2"	
Curvatura	Nº 12	**Excesso de superelevação na tang. ou na curva circular** Em relação ao nível zero ou à super. projetada para a curva circular	76 mm 3"	51 mm 2"	45 mm 1 3/4"	32 mm 1 1/4"	Valores aplicáveis somente

Fonte: MRS Logística (Engenharia de Via) 2015

Como pode ser observado na Tabela 1, a via é classificada de acordo com a máxima velocidade autorizada no trecho (VMA) e as tolerâncias para os limites de segurança dos parâmetros de geometria e bitola são mais restritivas na medida em que se aumenta a classe de via.

2.2.7 Índices de Qualidade de Via

Segundo Berawi (2013), nos últimos anos, várias tentativas foram feitas para construir modelos da degradação da via, a partir de um único parâmetro que possa representar de forma global a degradação da superestrutura e que possa englobar as diversas variáveis que participam desse processo. Esses modelos podem ser classificados em dois diferentes aspectos: 1. Modelos de degradação considerando o ponto de vista estrutural e 2. Modelos de degradação considerando o ponto de vista da geometria.

Do ponto de vista estrutural, o desenvolvimento do modelo é baseado na evolução dos defeitos na estrutura física, tais como assentamento do lastro, desgaste e corrugação. Já do ponto de vista da geometria, o estágio atual de degradação da linha utiliza parâmetros geométricos para realizar essa avaliação, tais como nivelamento longitudinal, alinhamento e etc. De fato, ambos os pontos de vista estão correlacionados, uma vez que qualquer desvio nos parâmetros de geometria é resultado de problemas na estrutura do pavimento. Recentemente, devido à praticidade, os modelos baseados na geometria, denominados "Índice de Qualidade da Via", têm sido adotados em vários países.

Como apresentado nas seções anteriores, as variações na geometria provocam acelerações indesejadas ao veículo que trafega sobre a via e essas acelerações podem tanto se tornar um risco operacional como provocar desconforto durante uma viajem, avaliando sob ponto de vista das ferrovias onde trafegam trens de passageiros. Essas variações, quando ocorrem de forma transiente, podem atingir os limites de segurança estabelecidos pelas normas de cada ferrovia e devem ser corrigidas o mais rápido possível.

Porém, nesses casos talvez apenas uma ação corretiva pontual seja suficiente para eliminar o problema, sem a necessidade da utilização de máquinas de alta produção para esse tipo de serviço de correção geométrica. No entanto, nos casos em que as oscilações na geometria são recorrentes em todo o trecho, contudo, sem a magnitude necessária para extrapolar os limites de segurança, será necessária uma intervenção preventiva de porte maior e, nesse caso, o dimensionamento de recursos para o reparo deverá ser feito levando isso em conta.

Como será apresentado nas sessões subsequentes, a variação na geometria ao longo de grandes extensões pode ter sua origem nas condições inadequadas dos componentes estruturais da via. Veremos adiante que locais em tais condições apresentam maior probabilidade de detecção de defeitos corretivos e que, dependendo do estágio de degradação e da viabilidade econômica, uma intervenção diferenciada deverá ser programada. Assim,

devido a esse contexto, é de extrema importância monitorar e principalmente compreender os índices de qualidade da via, pois esses são de extrema importância dentro da estratégia de longo prazo de manutenção.

2.2.7.1 TQI (*Track Quality Index*)

Segundo Berawi (2013), a *Track Quality Index* (doravante TQI) foi iniciada pela FRA nos Estados Unidos. O conceito básico é o uso do comprimento da curva no espaço para determinar a qualidade da linha. Assim, para um segmento de comprimento específico, quanto mais rugosa for a superfície da linha, maior será o comprimento espacial da curva quando esticada em uma linha reta.

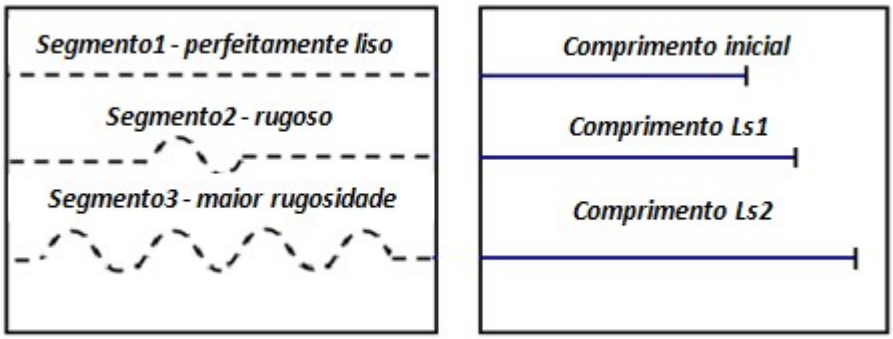


Figura 11 – Representação de degradação da via através do TQI
Fonte: Berawi 2013 (Adaptado)

A fórmula do TQI, para cada parâmetro de geometria como nivelamento, alinhamento, superelevação ou bitola é expressa pela equação abaixo:

$$TQI = \left[\frac{L_s}{L_0} - 1\right] \cdot 10^6$$

Em que:

Ls = Comprimento da corda

L0 = Tamanho do segmento

O comprimento da corda pode ser calculado somando a distância entre dois pontos de medição:

$$L_s = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{\Delta y_i^2 + \Delta x_i^2}$$

Δy = Diferença em módulo entre duas medições do parâmetro consecutivas

Δx = Intervalo de amostragem (depende do veículo de inspeção)

2.2.7.2 Desvio Padrão

O desvio padrão é a medida mais utilizada para representar a dispersão de uma amostra. Ele representa o quanto de variação existe em relação à média. De forma objetiva o desvio padrão nada mais é do que a raiz quadrada da variância de uma amostra.

Uma vez que neste estudo o interesse é representar a variação da geometria ao longo da via,ou seja, a variância de uma população contendo D / 0,3048 amostras, sendo D o tamanho do segmento escolhido para análise e 1/0,3048 a frequência de amostragem do TrackSTAR, o desvio padrão é, portanto, um parâmetro conveniente para modelar essa variação na geometria. Não será demonstrado neste trabalho, porém pode-se dizer que os resultados utilizando TQI para modelar o fenômeno estão correlacionados com os resultados utilizando o desvio padrão.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}$$

$xi =$ Valor para o parâmetro naquele ponto

$\bar{x} =$ Média da irregularidade na via

$n =$ Número de pontos registrados na seção da via analizada

2.2.7.3 PSD (Power Spectral Density)

Segundo Berawi (2013), a motivação inicial para utilização do *Power Spectral Density* (doravante PSD) nas ferrovias foi para análise da dinâmica da interação entre veículo e via. De qualquer forma, vários pesquisadores notaram que o PSD também poderia ser um método apropriado para classificar a via quanto às suas imperfeições e à sua degradação, já

que as características das irregularidades da via podem basicamente serem representadas pelos seus respectivos comprimentos de onda e amplitudes.

Dessa forma, um PSD baixo indica melhores condições da via, enquanto um espectro alto indica a situação oposta. Basicamente, para obter o gráfico do espectro da via, o sinal deve ser transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência utilizando a Transformada de Fourier. Uma analogia pode ser utilizada na geometria de via resultando em um espectro dos comprimentos de onda, o qual é chamado de frequência espacial de uma onda.

$$A = \frac{2}{nfft} \cdot \sqrt{2 \cdot G_{xx}}$$

A= Amplitude do espectro de densidade

nfft = Número de linhas do espectro

Gxx= Power Spectral Density (Unilateral)

A FRA tem classificadas suas vias em 9 categorias de classes, nas quais as classes de 1 a 6 são projetos de via comuns e as classes de 7 até 9 são dedicadas para trens de alta velocidade. Desse modo, para cada classe de via, as irregularidades randômicas da via são descritas utilizando o PSD unilateral. Vale ressaltar que essa função é aplicável apenas em comprimentos de onda variando entre 1,524 m e 304,8. Outras ferrovias ao redor do mundo também utilizam o PSD como ferramenta para avaliar a qualidade da via, como pode ser observado no gráfico abaixo:

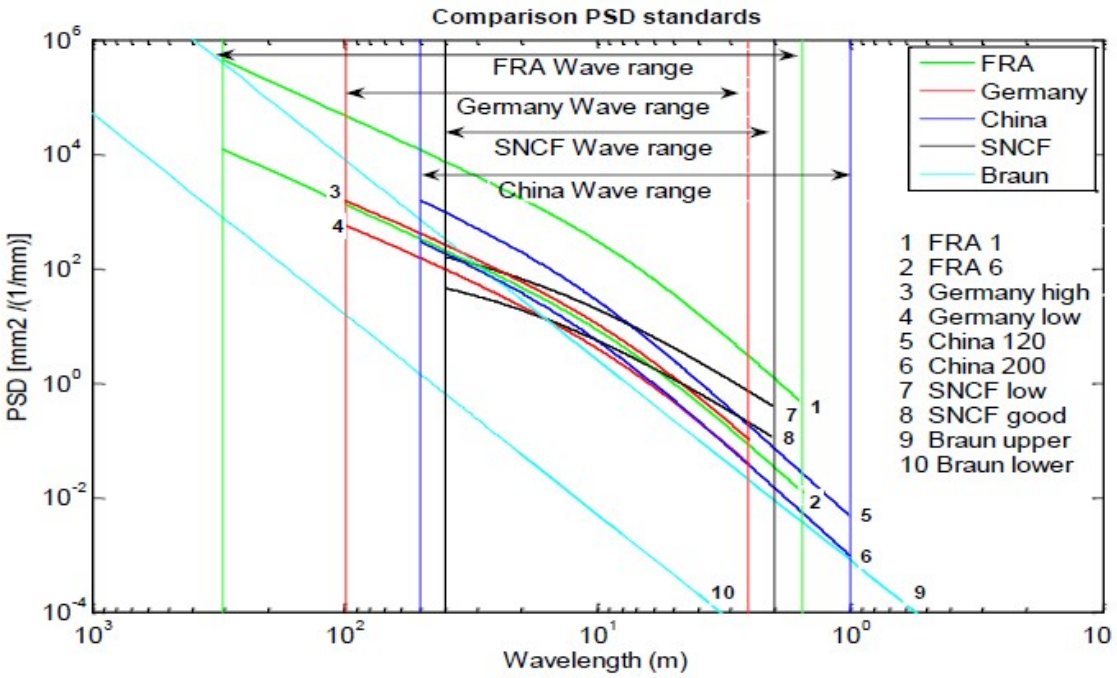


Figura 12 –Espectro de Densidade de Potência de diferentes ferrovias e classes de via
Fonte: Berawi, 2013

No gráfico acima o eixo das ordenadas representa o nível de energia do sinal e o eixo das abscissas representa o respectivo comprimento de onda associado a esse nível de energia. O gráfico de comparação acima mostra os espectros de várias ferrovias no mundo e seus respectivos níveis de energia. Observa-se que, conforme esperado, vias de classes mais elevadas possuem menor nível de energia no sinal e as vias de menor classe apresentam o comportamento oposto. Essa situação pode ser bem exemplificada pelas linhas 1 e 2, que representam as classes 1 e 6 respectivamente de ferrovias norte americanas.

Abaixo segue quadro resumo das ferramentas de avaliação da via em diferentes países do mundo:

Tabela 2 – Exemplos de modelos de degradação estruturais desenvolvidos

No	Modelo	Autor	Fórmula
1	Shenton settlement model	Shenton	$e_n = K \cdot \frac{F_e}{10} \cdot [(0.69 + 0.028 \cdot h) \cdot N^{0.2} + 2.7 \cdot 10^{-6} \cdot N]$
2	Sato degradation model	Sato	$y = \gamma \cdot (1 - e^{-\alpha x}) + \beta \cdot x$
3	Sugiyama model	Sugiyama	$S = 2.09 \cdot 10^{-3} \cdot T^{0.31} \cdot V^{0.98} \cdot M^{1.1} \cdot L^{0.21} \cdot P^{0.26}$
4	ORE model	ORE	$e_n = e_1 \cdot (1 + b \cdot \log N)$
5	TU Munich model	TU Munich	$S = A \cdot p \cdot \Delta N + B \cdot p^{1.21} \cdot \ln N$
7	Archard Model	Archard	$w = \frac{k_w}{H} F \lVert s \rVert$
8	ITDM Model	Queensland University	$w = A \cdot k_h \cdot k_l \cdot W_h \cdot \sin\psi$
9	TU Graz model	TU Graz	$Q = Q_0 \cdot e^{-b \cdot t}$

Fonte: Berawi, 2013

Tabela 3 – Exemplos de modelos de degradação baseados na geometria desenvolvidos

	Modelo	Autor	Fórmula
10	J synthetic coefficient	Polish Railway	$J = \frac{S_z + S_y + S_w + 0.5 S_e}{3.5}$
11	Track Geometry Index	Indian Railway	$TGI = \frac{2UI + TI + GI + 6AI}{10}$
12	European Standards (EN 13848-5)	CEN	SD and Mean
13	Track Quality Index	US railway	$TQI = \left[\frac{L_s}{L_0} - 1\right] \cdot 10^6$
14	Q value	Swedish Railway	$Q = 150 - 100 \cdot \left[\frac{\sigma_H}{\sigma_{H_{lim}}} + 2 \cdot \frac{\sigma_S}{\sigma_{S_{lim}}}\right] / 3$

Fonte: Berawi, 2013

Tabela 4 – Espectros de Densidade de Potência em diferentes países

	Modelo	Autor	Fórmula
17	FRA	United Stated	$S_{av}(\Omega) = \frac{k \cdot A_v \cdot \Omega_c^2}{\Omega^2 \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}$
18	German	Germany	$S_v(\Omega) = \frac{A_p \cdot \Omega_c^2}{(\Omega^2 + \Omega_p^2) \cdot (\Omega^2 + \Omega_c^2)}$
19	Chinese	China	$S(f) = \frac{af^2+b}{cf^2+df^4+ef^2+k}$
20	SNCF	France	$G_{rr}(n) = \frac{A}{\left(1 + {}^{n}/_{n_0}\right)^3}$
21	Braun	ISO	$G_{rr}(n) = Grr(n_0) \cdot \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-w}$

Fonte: Berawi, 2013

2.3 RIGIDEZ DOS COMPONENTES DE UMA VIA LASTREADA

2.3.1 Módulo de via e Rigidez

Conforme Selig (1989), considerando o trilho como uma viga sobre um apoio elástico, uma força vertical concentrada P, originada pela carga do veículo produz uma deflexão vertical na via. A rigidez de via k é definida como a razão entre a tensão aplicada P e a deflexão apresentada pelo pavimento:

$$k = \frac{P}{\delta}$$

O módulo de via *u* é definido pela força suportada por unidade de comprimento de trilho por unidade de deflexão, que é:

$$u = \frac{q}{\delta}$$

Em que q é a força suportada pelo apoio elástico por unidade de comprimento. Ademais, usando ainda a teoria da viga sobre um apoio elástico podemos determinar a relação entre módulo de via e rigidez através de:

$$u = \frac{k^{4/3}}{(64EI)^{1/3}}$$

E = Módulo de elasticidade da barra

I=Momento de inércia da barra

Como pode ser observado, a diferença entre o módulo de via e a rigidez é que a rigidez inclui os módulos de elasticidade e momentos de inércia do trilho.

2.3.2 A importância das medidas de rigidez na manutenção de via

Segundo Gong (2013), várias referências apontam a rigidez vertical como muito importante para determinar o desempenho de uma via ao longo dos ciclos de carregamento aos quais é submetida. A rigidez da via foi verificada como sendo muito útil para o propósito de determinar as causas de alguns tipos de problemas na infraestrutura. Infelizmente, em muitos casos as ferrovias não possuem equipamentos adequados para esse tipo de medição.

Nesse sentido, o teste de rigidez oferece uma técnica potencialmente útil para determinar sistematicamente as condições de segurança e desempenho de uma via. A variação da rigidez contribui significativamente para a degradação da linha, tanto em termos de potencializar o diferente assentamento do lastro causando problemas na geometria da via como para o aumento dinâmico da carga dos veículos. Devido a isso, recomenda-se que medidas de manutenção sejam praticadas para reduzir a variação da rigidez ao longo da ferrovia.

A variação da rigidez pode, em alguns casos, ocasionar um aumento de até oito vezes na carga aplicada pelos veículos na via dependendo da velocidade de tráfego e do comprimento da transição da rigidez. Transições curtas são observadas principalmente em locais próximos a pontes, viadutos e PN, sendo uma grande preocupação principalmente em ferrovias de alta velocidade. O modelo mais comum utilizado para representar a rigidez equivalente da via é uma associação simples de molas e amortecimento de todos os componentes que compõem a infraestrutura e superestrutura da via. Desse modo, cada componente apresenta uma deformação para uma força aplicada em determinada direção.

No que tange a esse princípio, existem técnicas para se estimar a rigidez de determinado pavimento quando se conhece essa relação entre as deformações em diferentes

direções. A rigidez lateral ainda é um fenômeno menos estudado do que a vertical apesar das grandes contribuições de Prud'homme outros pesquisadores nesse campo. Contudo, não será abordada nesse trabalho, apesar de influenciar também na degradação da via.

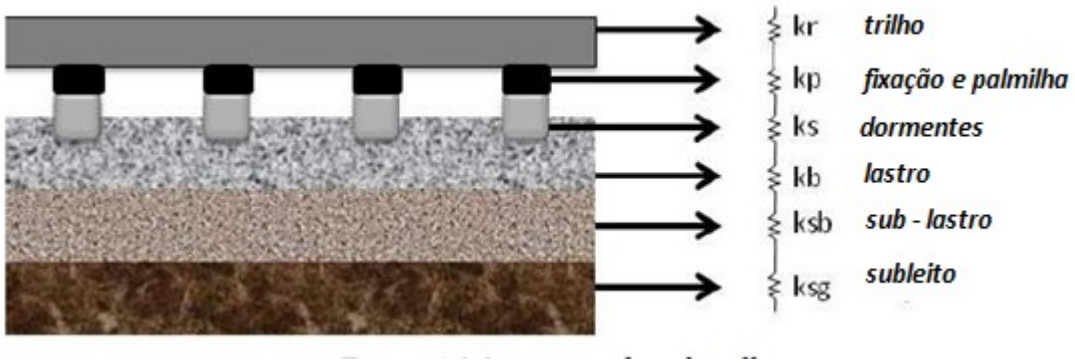


Figura 13 – Associação de rigidez dos componentes da Via Permanente
Fonte: Gong, 2013 (Adaptado)

2.4 MANUTENÇÃO DA VIA PERMANENTE, MÁQUNAS E MÉTODOS

Iremos reter nossas atenções nessa sessão apenas para duas formas de intervenção nas condições da via: a socaria e o desguarnecimento. Isso, por compreendermos que essas duas influenciam de forma mais significativa no lastro e no desempenho da linha em termos de degradação na sua geometria.

É importante lembrar que existem outras formas de atuação que podem também influenciar o sistema de forma significativa, ou até mais, como no caso em que a manutenção é direcionada para o tratamento do subleito, porém apenas as formas mais comuns de intervenção na MRS Logística serão abordadas.

2.4.1 Socaria

A socaria pode ser realizada manualmente ou de forma mecanizada. Segundo Selig (1989), a socaria mecanizada é realizada pelas socadoras, que são máquinas equipadas com dispositivos capazes de melhorar a geometria vertical e lateral da linha. Isso ocorre através dos levantes e dos puxamentos realizados com o objetivo de restaurar as condições geométricas de projeto da via e ao mesmo tempo recompondo a camada superior de lastro, de modo a preencher os espaços vazios entre o dormente e o lastro, aumentando assim a área de contato entre as duas superfícies.

Nesse processo o dormente é levantado e então as ferramentas de soca da máquina são introduzidas no lastro em ambos os lados do dormente. A vibração das pás é escolhida de forma a diminuir a densidade do lastro, o qual é então compactado para dentro e para cima em direção ao fundo do dormente.

Devido a ação de vibração das ferramentas de soca, os melhores resultados de socaria são encontrados em locais nos quais o lastro se encontra em boas condições, ou seja, sem contaminação. A brita também deve ter uma graduação adequada para a performance ótima da socaria, já que existe uma grande dificuldade em se realizar socaria em brita com tamanho inferior a 37 mm.

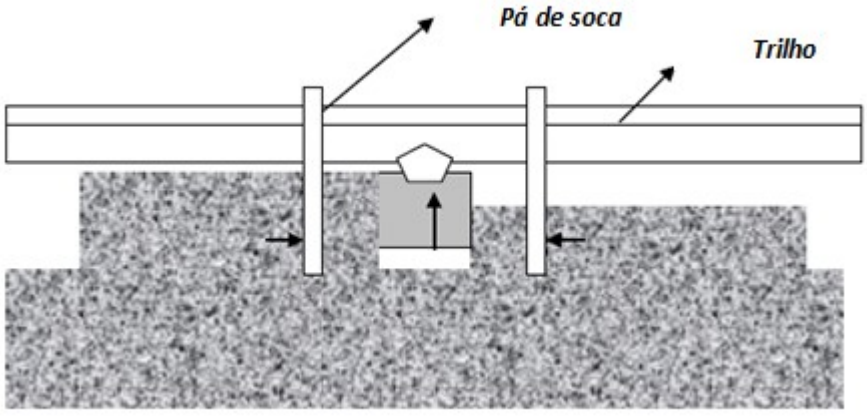


Figura 14 – Esquema representativo da ação da socadora
Fonte: Calla, 2003 (Adaptado)

Figura 15 – Socadora modelo 09-3X
Fonte: Calla, 2003

2.4.2 Desguarnecimento

A MRS Logística possui hoje uma desguarnecedora a vácuo e outra de ombro, porém ainda não possui uma máquina para realizar o desguarnecimento total. Isso se deve muito ao fato desse tipo de manutenção provocar interrupção da circulação de trens por longos períodos, sendo um processo de alto custo operacional para a companhia.

No caso da MRS Logística, uma interrupção do tráfego em uma seção de bloqueio por várias horas inevitavelmente iria acarretar em um grande impacto para operação, pois a maioria da malha é composta por linha singela e não há uma via alternativa para escoar a produção em caso de interrupção para manutenção. Devido a esse cenário, a viabilidade da compra de uma máquina ou serviço de desguarnecimento tem sido bastante discutida nos últimos anos por especialistas.

Com o passar do tempo, o lastro que suporta a via se torna contaminado e com essa deterioração é necessário que seja feita a limpeza desse material ou possivelmente sua substituição. Assim, a desguarnecedora total é um veículo ferroviário projetado para esse fim. É um equipamento com uma corrente de escavação a qual passa abaixo da via. Como o equipamento se move para frente, a correia de escavação remove o lastro da porção inferior da via e o transporta para cima para peneiras que, através da vibração, separam o lastro contaminado. Esse material contaminado é, posteriormente, transportado para longe da linha ou para vagões para subsequente descarte. O lastro limpo é então retornado para via para ser reutilizado.

Figura 16 – Desguarnecedora
Fonte: http://www.remtech.info/REMZ45.htm

2.5 TÉCNICAS APLICÁVEIS A MODELAGEM DO PROBLEMA

2.5.1 Distribuição Normal

Segundo Montgomery (2011), o modelo mais largamente utilizado para a distribuição de uma variável aleatória é a distribuição normal. A função de densidade de probabilidade (doravante PDF) da distribuição normal é definida por:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)}$$

Um resultado fundamental conhecido como teorema do limite central, implica que histogramas têm frequentemente essa forma característica ou pelo menos aproximada. Desse modo, toda vez que um experimento aleatório for replicado, a variável aleatória que for igual ao resultado médio (ou total) das réplicas tenderá a ter uma distribuição normal, à medida que o número de réplicas se torne grande. De Moivre apresentou esse resultado em 1733 e Gauss independentemente desenvolveu uma distribuição normal cerca de 100 anos depois.

Um dos motivos de a distribuição normal ser largamente utilizada deve-se ao fato de sua ocorrência frequente na natureza e por isso pode ser utilizada na modelagem de diversos fenômenos. Isso se deve ao fato de a soma de diferentes distribuições de probabilidade resultar em uma distribuição normal. Como a maioria dos processos presentes no dia-a-dia possui mais de uma variável aleatória e a cada uma dessas variáveis está associada uma

distribuição, a distribuição de probabilidade resultante da maioria dos fenômenos será normal por consequência.

Segundo Taha (2008), a notação N(μ,σ) costuma ser usada para representar uma distribuição normal com média μ e desvio padrão σ. A função de distribuição acumulada (doravante CDF)da variável aleatória normal não pode ser determinada de forma fechada e o resultado é que tabelas normais são preparadas para essa finalidade. Essas tabelas se aplicam a normal padronizada com média zero e desvio padrão igual a 1, isto é N(0,1). Qualquer variável aleatória normal x (com média μ e desvio padrão σ) pode ser convertida em uma normal padronizada Z, usando a transformação:

$$Z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Mais de 99% da área de uma distribuição normal está contida nas faixas μ-3σ≤x≤μ+3σ, conhecida como limites de 6 sigmas.

2.5.2 Distribuição Lognormal

Para Montgomery (2011), variáveis em um sistema seguem às vezes uma relação exponencial como x=exp(w). Se o expoente for uma variável aleatória W, então X=exp(W) será uma variável aleatória com uma distribuição de interesse. Um importante caso especial ocorre quando W tem uma distribuição normal. Nesse caso, a distribuição de X é chamada de uma distribuição lognormal. O nome é proveniente da transformação ln(x)=W. O logaritmo natural de X é normalmente distribuído.

Probabilidades para X são obtidas a partir da transformação de W, porém a faixa de X é $(0, \infty)$. Seja W tendo uma distribuição normal, com média θ e variância ω^2; então, X=exp(W) é uma variável aleatória lognormal, com função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \frac{1}{x\omega\sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{(\ln x - \theta)^2}{2\omega^2}\right]$$

A média e variância de X são

$$\text{E(X)} = e^{\theta+\omega^2/2} \text{ e V(X)} = e^{2\theta+\omega^2}(e^{\omega^2} - 1)$$

Os parâmetros de uma distribuição lognormal são θ e ω^2; porém, é necessário cuidado para interpretar que eles são a média e a variância da variável aleatória *W*. A média e a variância de *X* são funções desses parâmetros.

O tempo de vida de um produto que degrada ao longo do tempo é frequentemente modelado por uma variável aleatória lognormal. No presente estudo essa será uma distribuição comum para as taxas de degradação da via e consequentemente para seu tempo de vida. Uma distribuição de Weibull pode ser usada nesse tipo de aplicação e, com uma escolha adequada de parâmetros pode aproximar uma distribuição lognormal selecionada. Entretanto, uma distribuição lognormal é deduzida a partir de uma simples função exponencial de uma variável aleatória normal; assim, é fácil entender e avaliar as probabilidades.

2.5.3 Regressão Linear

Segundo Montgomery (2011), a regressão linear simples considera um único regressor ou preditor x e uma variável dependente ou variável de resposta. Suponha que a relação verdadeira entre Y e x seja uma linha reta e que a observação Y em cada nível de x seja uma variável aleatória. O valor esperado de x é:

$$E(Y|x) = \mu_{Y|x} = \beta_0 + \beta_1 x$$

sendo βo a interseção e a inclinação $\beta_1$coeficientes desconhecidos da regressão.Considerando que cada observação Y possa ser descrita pelo modelo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon$$

Em que ε é um erro aleatório com média zero e variância σ^2. Os erros aleatórios correspondendo a diferentes observações são também considerados variáveis aleatórias não correlacionadas. As estimativas βo e β_1 devem resultar em uma linha que seja o melhor ajuste para os dados.

O cientista alemão Karl Gauss (1777-1855) propôs estimar os parâmetros βo e β_1 de modo a minimizar a soma dos quadrados dos desvios verticais. Esse método utilizado para estimar os coeficientes de regressão é conhecido como “Método dos Mínimos Quadrados”.

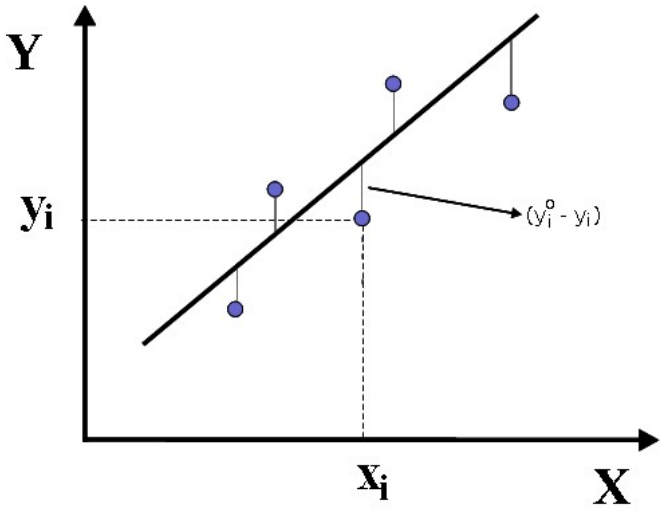


Figura 17 – Regressão e mínimos quadrados
Fonte: Montgomery ,2004

$$\sum_{I=1}^{N} \varepsilon i^2$$

2.5.4 Análise residual

Segundo Montgomery (2011), a análise dos resíduos é frequentemente útil na verificação de que os erros sejam distribuídos de forma aproximadamente normal, com variância constante, assim como na determinação dos termos adicionados no modelo.

Com a verificação aproximada à normalidade, o experimentalista pode construir um histograma de frequência dos resíduos ou um gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Muitos programas computacionais produzirão um gráfico de probabilidade normal dos resíduos e, uma vez que o tamanho das amostras na regressão é frequentemente pequeno para um histograma ser significativo, o método de plotar a probabilidade normal é preferido.

Podemos também padronizar os resíduos, calculando $di = e_{le}/\sqrt{\sigma^2}$, i = 1,2,3...,n. Se os erros forem distribuídos normalmente, então aproximadamente 95% dos resíduos padronizados devem cair no intervalo (-2,+2). Os resíduos que estiverem fora desse intervalo podem significar a presença de *outlier,* ou seja, uma observação que não é típica do resto dos dados.Assim, várias regras têm sido propostas para descartar *outliers*. Entretanto, algumas vezes *outliers* fornecem informações de interesse para os experimentalistas sobre circunstâncias não usuais, não devendo assim ser descartados.

É frequentemente útil plotar os resíduos em uma sequência temporal e é desejável que a variância não se modifique ao longo da série. As transformações mais largamente utilizadas para estabilizar a variância são o uso de $\sqrt{y}$, $ln\ y,$ ou 1/y como resposta. Observando o gráfico dos resíduos pode se identificar além do aumento da variância ao longo do tempo também a inadequação do modelo e a necessidade de adição de termos de ordem maior .Nos casos em que a variância se mantém constante ao longo da série o comportamento dos resíduos não será motivo de preocupação.

2.5.5 Pesquisa Operacional e Modelos de Otimização por Programação Linear

Segundo Taha (2008), em Pesquisa Operacional não temos uma técnica única para resolver todos os modelos matemáticos que podem surgir na prática. Em vez disso, o tipo e a complexidade do modelo matemático é que determina a natureza do método de solução.

A técnica mais utilizada de Pesquisa Operacional (doravante PO) é a Programação Linear. Ela é aplicada a modelos cuja função objetivo e restrições são lineares. Outras técnicas são a programação inteira (na qual as variáveis são valores inteiros), a programação dinâmica (na qual o modelo original pode ser decomposto em problemas mais simples de tratar), a otimização em redes (na qual o problema pode ser modelado como uma rede) e a programação não linear (na qual as variáveis do modelo são não lineares). Essas são apenas algumas das muitas ferramentas de PO disponíveis.

Uma peculiaridade da maior parte das técnicas de PO é que as soluções não são obtidas de forma fechada. Em vez disso, são determinadas por algoritmos. Um algoritmo oferece regras de cálculo fixas que são aplicadas repetidamente ao problema, sendo que à cada repetição (denominada iteração) a solução fica mais perto de se tornar ótima. Como os cálculos associados a cada iteração são entediantes e volumosos é imperativo que esses algoritmos sejam executados por computadores.

Alguns modelos matemáticos são tão complexos que é impossível resolvê-los por quaisquer algoritmos de otimização disponíveis. Nesses casos pode ser necessário abandonar a busca pela solução ótima e adotar regras práticas ou heurísticas.

O modelo de Programação Linear (doravante PL), como qualquer modelo de otimização tem 3 componentes básicos: 1) Variáveis de decisão que precisamos otimizar. 2) Função objetivo que precisamos otimizar (maximizar ou minimizar). 3) Restrições que a solução deve satisfazer.

De forma gráfica, um problema de PL deve ser resolvido em 2 etapas: 1) Determinação da região das restrições que é formada pela interseção das retas (no caso do problema de 2 variáveis) originadas pelas inequações e equações de restrição, determinadas durante a modelagem matemática do problema. Essas retas irão formar uma figura convexa que será a região das soluções; 2) Determinação da solução ótima. Essa etapa é feita na forma gráfica (para2 variáveis de decisão) modelando a função objetivo do problema matematicamente e, posteriormente, transladando a reta que representa essa função através da região da solução no seu sentido de crescimento ou decrescimento, dependendo da natureza do problema, até atingir o vértice mais extremo da região das soluções. Esse vértice será a solução ótima do problema.

Segundo Taha (2008), a solução também pode ser determinada algebricamente através da solução de um sistema de equações contendo n variáveis em equações que têm sua origem na modelagem das restrições do problema. Em um sistema contendo m × n equações se igualarmos nesse sistema n-m variáveis a zero, e depois resolvermos as m equações para as m variáveis restantes, a solução resultante deve corresponder a um ponto extremo (viável ou inviável) da região das soluções. Essa técnica de solução pode ser descrita por um algoritmo denominado “simplex” que tem ampla aplicação em vários *softwares* e modelagem de problemas reais.

2.5.6 Modelo de Transportes e Otimização em Redes

Para Taha (2008) o Modelo de Transportes é uma classe especial de problemas de PL que trata do envio de uma mercadoria de origens para destinos. O objetivo é determinar a programação da expedição que minimize o custo total da expedição e ao mesmo tempo satisfaça os limites de fornecimento e demanda. A aplicação do problema de transporte pode ser estendida a outras áreas como será o caso do problema apresentado nesse trabalho.

No problema de transportes geral existem m origens e n destinos, cada um representado por um nó. Os arcos representam as rotas que ligam as origens aos destinos, à cada arco é associado um custo, à cada arco de origem está associado uma capacidade e aos nós de destino uma demanda. No problema que será tratado neste trabalho as origens serão as capacidades das máquinas de correção geométrica e os destinos serão a extensão total de demanda de correção geométrica de cada corredor da MRS, de acordo com os ciclos de intervenção calculados pela degradação da linha.

2.5.7 Teorema de Bayes

Para Taha (2008) as probabilidades utilizadas na determinação do valor esperado de alguma situação costumam ser determinadas através de dados históricos. Em alguns casos, essas informações podem ser ajustadas utilizando informações adicionais baseadas em amostragem ou experimentação. As probabilidades resultantes são determinadas probabilidades posteriores (ou de Bayes), ao contrário das probabilidades a priori determinadas a partir de dados brutos.

Esse teorema tem ampla aplicação na modelagem de situações reais e será utilizado também neste trabalho para determinar as probabilidades de ocorrerem defeitos de geometria na via permanente dado o desvio padrão da via em determinado trecho.

2.5.8 Processos Estocásticos e Cadeias de Markov

Para Taha (2008) seja *X,* uma variável aleatória que caracteriza o estado do sistema em pontos discretos do tempo t=1,2,3 .... A família de variáveis aleatórias [X] determina um processo estocástico. O número de dados em um processo estocástico pode ser finito ou infinito.

Processos estocásticos são úteis para descrever sistemas operando no tempo, no caso do presente estudo, para descrever a degradação da via ao longo do tempo ou dos ciclos de carga aos quais é submetida. Os processos estocásticos podem ser classificados em relação ao estado e em relação ao tempo. Assim, em relação ao estado podem ser discretos (cadeia) ou contínuos (sequência). Já em relação ao tempo podem ser discretos (finito ou enumerável) ou continuo em caso contrário.

Um processo estocástico é um processo de Markov se a ocorrência de um estado futuro depender somente do estado imediatamente precedente. Isso significa que dados os tempos cronológicos T0,T1,..Tt diz-seque a família de variáveis aleatórias $\{X\}$é um processo de Markov se possuir a seguinte propriedade:

$$P\{X(t_{k+1}) \le x_{k+1} | X(t_k) = x_k, X(t_{k-1}) = x_{k-1}, ..., X(t_1) = x_1, X(t_0) = x_0\} = P\{X(t_{k+1}) \le x_{k+1} | X(t_k) = x_k\}$$
$$t_0 \le t_1 \le ... t_k \le t_{k+1} = 0,1,... \qquad k_0, k_1, ..., k_{t-1}, k_t, k_{t+1}$$

Esse tipo de processo também é chamado de *memoryless process* (processo sem memória), pois os estados passados são desprezados.As probabilidades condicionais apresentadas na propriedade que define uma cadeia de Markov são as probabilidades de transição e representam, portanto, a probabilidade do estado $X(t_{k+1})$ ser X_{k+1}no instante $t_{(k+1)}$ dado que o estado $X(t_k)$ é X_k no instante t_k. Desse modo, para resumir as probabilidades de transição podemos utilizar uma notação matricial do tipo:

$$\begin{bmatrix} P11 & \cdots & P1n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Pn1 & \cdots & Pnn \end{bmatrix}$$

A matriz P define a cadeia de Markov, na qual as linhas e colunas representam os estados possíveis do sistema. Uma propriedade dessa matriz é que todas as suas propriedades de transição p_{ij} são fixas (estacionárias) e independentes ao longo do tempo.

Um processo de decisão Markoviano é composto por espaço de estados, conjunto de decisões e probabilidades de transição. A tomada de uma decisão dentro do universo das possíveis políticas conduzirá o estado presente para um estado futuro e, associado a esta decisão, estará associado um custo C_{ik} que representam o custo esperado de se tomar uma decisão K com o processo no estado i.

Essa abordagem do problema tem como objetivo principal modelar o processo de tal forma que seja possível reduzir o custo total através de uma determinação da política ótima por de programação linear. Neste trabalho, o processo Markoviano se trata da degradação da via permanente e os custos estão associados às políticas de manutenção possíveis para cada estado.

2.6 MODELO DE DEGRADAÇÃO BASEADO NO SURFACE QUALITY INDEX

Como foi apresentada em sessões anteriores, a variação na rigidez do pavimento ao longo da via é um das origens de grandes problemas na geometria e também na vida útil dos componentes da superestrutura. A variação na rigidez pode provocar diferentes conformações do lastro ao longo de determinado trecho e essas diferenças na conformação do lastro acabam provocando os problemas de geometria como empenos, torções, nivelamento e etc.

Essas variações na geometria, por sua vez, também podem, a partir daí, provocar o aumento da carga a que são submetidos os demais componentes, como descrito na seção sobre a interação veículo via. Devido a isso, foram desenvolvidos modelos de degradação a partir

do desvio padrão do nivelamento longitudinal. Devido às características (variabilidade das medições do perfil vertical da via), esse parâmetro modela com precisão o fenômeno descrito acima.

Figura 18 – Modelo de degradação da via baseado no desvio padrão do nivelamento longitudinal
Fonte: Esveld ,2001

A linha verde do gráfico, segundo Esveld (2001), representa a degradação hipotética da linha no caso em que ele fosse levado a se degradar sem qualquer manutenção. Nesse gráfico, podemos observar três estágios distintos: a primeira fase conhecida como inicial, ocorre imediatamente após execução da manutenção e suas características de degradação rápida e substancial são causadas pelo assentamento inicial. Esse período é altamente imprevisível e difere consideravelmente de um local para outro e é, portanto, muito difícil de modelar.

Outro problema desse estágio é o curto espaço de tempo em que as alterações ocorrem, como elas se dão de forma muito rápida, na maioria das vezes não temos informações da geometria do local durante esse período inicial, já que os ciclos de inspeção da via são longos, enquanto que o período de degradação inicial da linha pode, em alguns casos, ocorrer em até 0.5 MTBT. Por essas razões esse estágio é frequentemente eliminado dos modelos de degradação.

A segunda fase, a qual ocorre após a estabilização da linha, mostra uma deterioração aproximadamente linear. Esse tipo de comportamento irá ocorrer durante a maior parte da vida útil da linha e é exatamente o período em que a maioria das análises é baseada.

A terceira fase, por sua vez, ocorre no final da vida útil da linha e se caracteriza por uma degradação maior e mais rápida que pode ser modelada aproximadamente por uma curva exponencial. Normalmente, essa situação nunca deverá ocorrer sob quaisquer circunstâncias, pois nesse estágio a segurança operacional estará comprometida.

Baseado nesse conceito, dados de medição dentro da parte linear do comportamento da linha são analisados. Esse estágio do comportamento da via pode ser modelado por uma regressão linear simples e através do coeficiente angular da reta obtida pode extrapolar os valores futuros da qualidade da via. Isso baseado no volume de transporte previsto no local e, dessa forma, programar a manutenção antes que a linha atinja o terceiro estágio.

Outro aspecto importante observado no modelo é a perda da eficiência da socaria a medida que a via envelhece e não é possível mais a partir de certo estágio implementar a mesma melhoria na qualidade da via que era observada no início do período. Ademais, a outra mudança observada é nas taxas de degradação que também aumentam com o tempo.

Esses dois fatores determinam uma maior frequência na socaria da linha tornando-a cada vez maior ao longo do tempo e o período entre duas intervenções consequentemente se torna cada vez menor. Eventualmente, a frequência de socaria requerida irá se tornar tão alta que não fará sentido realizá-la. De qualquer forma, uma ação definitiva será requerida nesse caso como, por exemplo, a limpeza do lastro através do desguarnecimento total. Caso essas medidas não sejam tomadas, a ferrovia irá conviver com custos de manutenção cada vez maiores e baixos patamares de segurança operacional.

2.7 CURVAS DE EFICIÊNCIA DA SOCARIA

Segundo Selig (1994), foi observado que ao longo dos anos a linha parece ter uma forma inerente que permanece por toda a sua vida. Essa forma inerente parece ser introduzida na via no momento da sua construção. Conseguir mudanças na forma inerente da via é muito difícil e as razões para a existência de uma forma inerente para a via podem ser atribuídas à forma do trilho e o perfil da cama de lastro que o suporta.

Para comprimentos de onda curtos de menos de 5 m, o módulo de elasticidade do trilho é alto se comparado à resistência à deformação apresentada pelo lastro. Devido a isso, o

trilho imprime os comprimentos de onda curtos de sua forma na superfície da cama de lastro. Já para comprimentos de onda longos, o módulo de elasticidade do trilho é baixo se comparado à resistência à deformação do lastro e, como resultado, a linha se conforma como as componentes de longos comprimentos de onda da superfície do perfil da cama de lastro.

Melhorias na qualidade do perfil da superfície da cama de lastro pela eliminação das rugosidades através da socaria normalmente não têm resultado efetivo, existe uma forte tendência que, após a socaria, a linha retorne para sua forma inerente. A razão para esse fenômeno está na relação existente entre o levante imposto a linha pela socaria e o subsequente assentamento. Apenas para levantamentos da linha superiores a 25 mm alguma mudança na forma inerente da via pode ser encontrada.

Devido a esse comportamento da linha após a socaria, foram construídas as denominadas curvas de eficiência, que nada mais são do que uma regressão linear utilizando como variável preditora a qualidade da linha antes da socaria e a variável de resposta, sendo a qualidade da linha após a socaria.

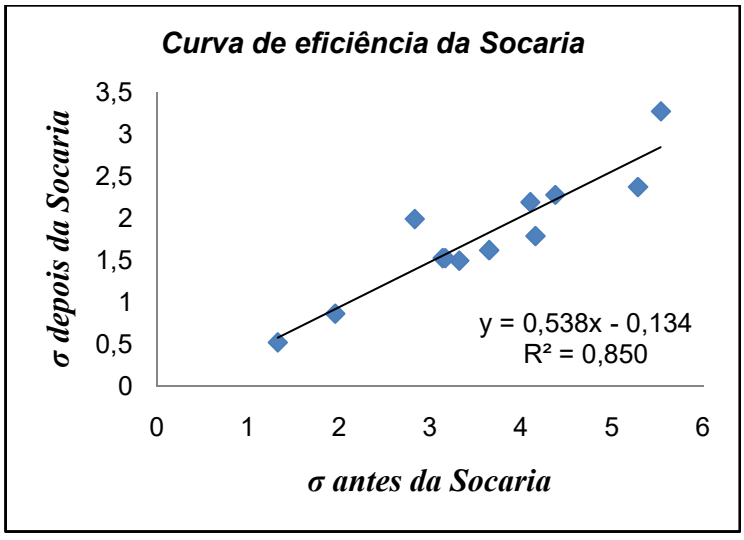


Figura 19 – Taxa de recuperação da via baseado no desvio padrão do nivelamento longitudinal
Fonte: O Autor , 2015

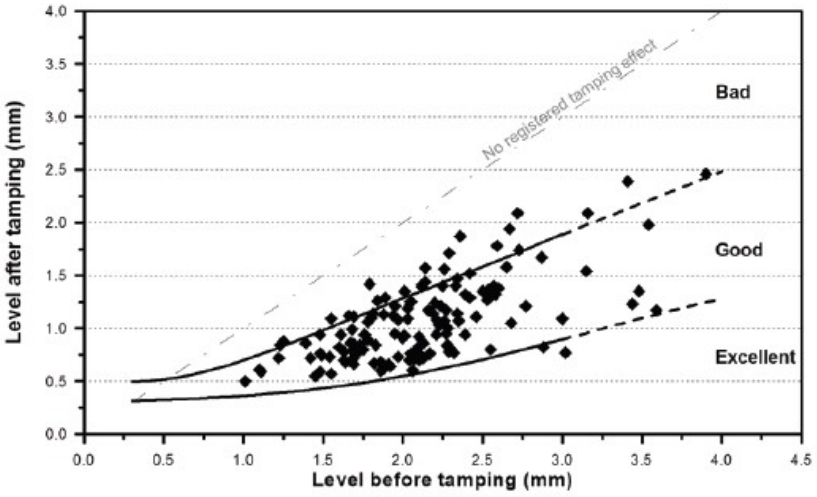


Figura 20 – Referência de recuperação da via baseado no desvio padrão do nivelamento longitudinal
Fonte: Khouy , 2013

A importância dessa ferramenta se deve ao fato de que é ela que modela o poder de recuperação da socaria, que é um dos elementos necessários para a construção do modelo de degradação da via. Além disso, como visto anteriormente, ao longo dos anos essa eficiência é reduzida e consequentemente a frequência com que se deve realizar manutenção na linha aumenta.

2.8 PREDIÇÃO DA CONDIÇÃO DA VIA UTILIZANDO O MODELO MARKOVIANO

Segundo Shafahi (2009), para se obter um gerenciamento eficiente da manutenção de via é necessário prever as condições de cada trecho através do tempo. O transporte de carga, as condições do tempo, a qualidade do material utilizado na execução e a geometria da via afetam o processo de degradação. De qualquer forma, mesmo quando todos esses fatores mencionados são semelhantes, a deterioração pode ser diferente. Assim, devido a esse comportamento randômico, utilizar um modelo probabilístico parece ser uma abordagem adequada para esse tipo de problema. O modelo Markoviano tem as características necessárias para representar claramente o comportamento randômico da via durante sua deterioração.

Conforme apresentado nas seções anteriores, para representar a qualidade da via, diversos índices e critérios foram desenvolvidos por ferrovias no mundo. Normalmente o TQI é usado para representar as condições do trecho de acordo com sua geometria.

A premissa básica do modelo Markoviano é que a probabilidade de passarmos de um estado presente para um estado futuro depende unicamente do estado presente. Conforme descrito anteriormente, a degradação da via possui essa característica, uma vez que o desvio padrão no futuro depende unicamente do desvio padrão no presente acrescido do valor da taxa de degradação determinada pela regressão linear multiplicado pela carga transportada durante o período observado.

Para Prescott (2013), usando os dados do desvio padrão do nivelamento longitudinal é possível analisar a deterioração da via ao longo de seu ciclo de vida, correlacionado essas informações com os registros de manutenção em sistema. No trabalho desenvolvido por Prescott, uma distribuição Weibull de dois parâmetros foi utilizada para descrever os diferentes tempos necessários para a deterioração de um segmento de via. A distribuição depende do volume de transporte e tipos de trilho e dormentes instalados no trecho. Os estados do modelo Markoviano mencionado foram divididos de acordo com o nível de qualidade da via (SD do nivelamento) sendo classificados em:

0< SD <SD crit – via em boas condições
SD crit< SD <SD spd – necessário manutenção
SD spd< SD <SD cls- restrição de velocidade necessária
SD cls< SD – interdição da via

As políticas possíveis nesse caso seriam manutenção (socaria ou renovação), restrição de velocidade e interdição da via. A escolha de qualquer uma dessas políticas acarretará em custos e, para determinar a política ótima de manutenção sem uso de força bruta, é necessária a utilização de programação linear.

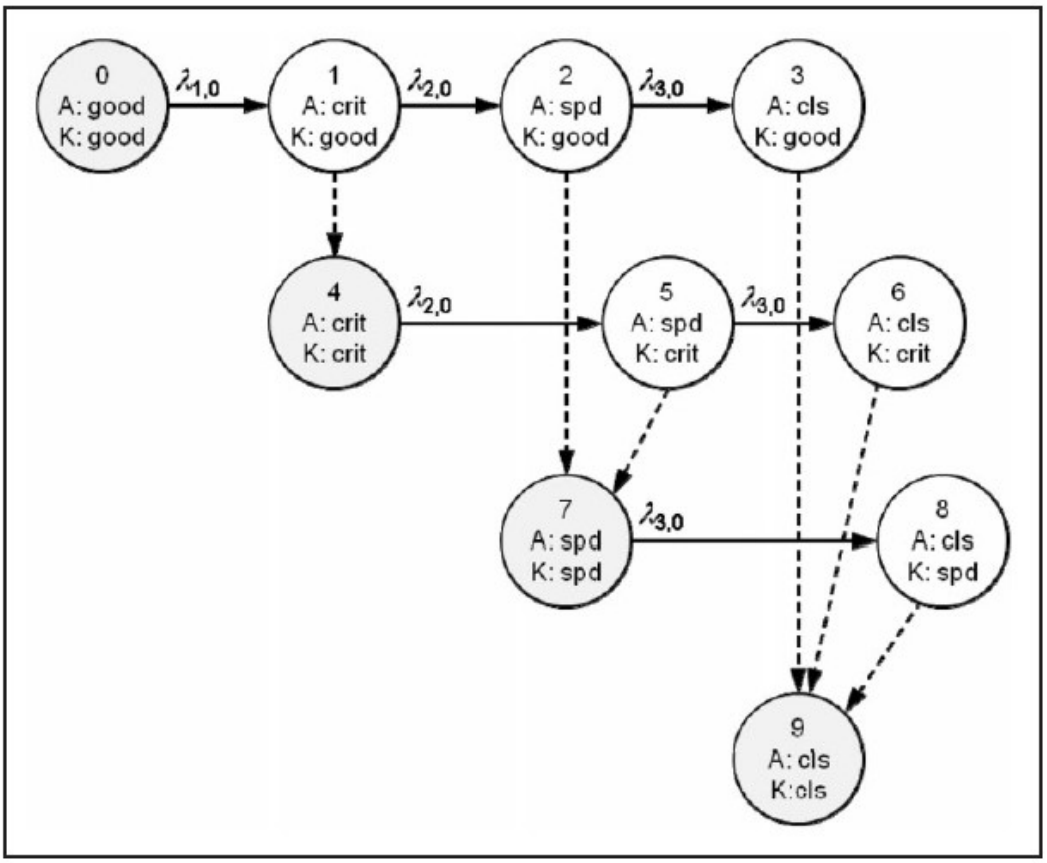


Figura 21 – Estados da Cadeia de Markov
Prescott (2013)

No modelo construído por Prescott (2013) os únicos custos considerados estão associados à socaria e à renovação da linha, porém segundo Khouy (2013) é importante ressaltar que construir um modelo para determinar a política ótima de manutenção que seja aplicável à realidade de uma ferrovia requer mapear e determinar os custos associados a componentes da via que possam ter sua vida útil afetada pela qualidade da geometria, como trilhos, dormentes e fixações.

Conforme apresentado na seção 2.2.3, a baixa qualidade da geometria pode aumentar o fator dinâmico e elevar a carga aplicada nos componentes da via permanente. A qualidade da via também pode influenciar a eficiência energética dos trens (o diesel é em geral um dos maiores custos operacionais de ferrovias de Heavy Haul) e também na frequência requerida de inspeções nos locais em que a taxa de degradação é acelerada, elevando, dessa forma, os custos associados a essa atividade, além de elevar o risco de descarrilamento devido a maior probabilidade de ocorrerem exceções de geometria em locais com baixa qualidade de via.

É importante ainda ressaltar que para locais como túneis, viadutos e AMV's é desejável que se faça um estudo detalhado da degradação da via devido à diferença de rigidez

entre esses pontos e uma plataforma de via comum, pois consequentemente os custos associados a manutenção nesses trechos serão substancialmente diferentes do esperado.

Devido a todos os fatores mencionados, construir um modelo que seja, de fato, aplicável não é uma tarefa simples, pois nem sempre há monitoramento de todas as variáveis relevantes envolvidas no processo. Em sua tese Khouy (2013) determina a política ótima de manutenção através do mapeamento de algumas das variáveis mencionadas e posterior simulação para verificar qual estratégia apresentaria o menor custo por MTBT. Desse modo, consequentemente, também fica estabelecido o valor ideal para a qualidade da via (SD) do ponto de vista econômico, sendo esse um valor de referência para realizar a manutenção preventiva da via permanente.

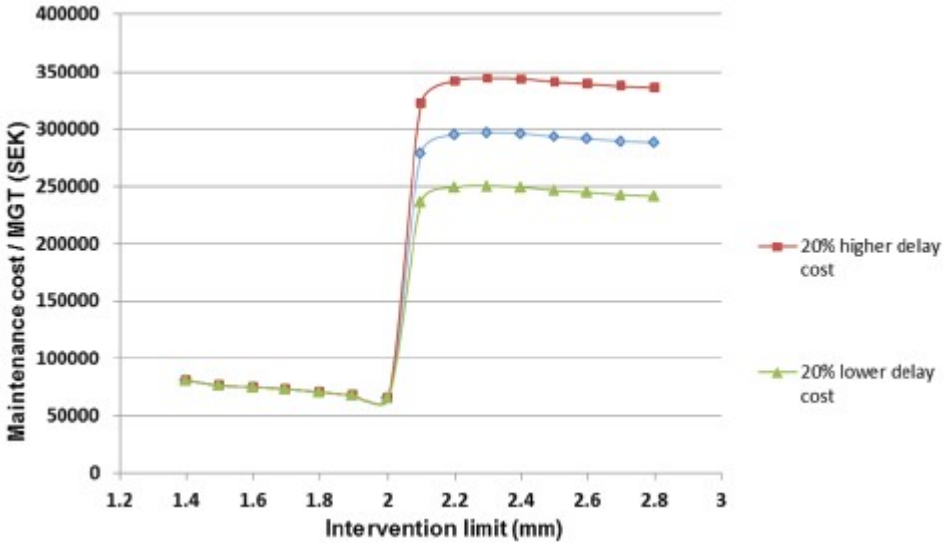


Figura 22 – Custos de manutenção por MTBT x Desvio padrão nivelamento longitudinal
Fonte: Khouy , 2013

3. CASO MRS: O PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DA VIA E A OTIMIZAÇÃO NA ALOCAÇÃO DOS RECURSOS PARA MANUTENÇÃO

3.1. O MODELO DE DEGRADAÇÃO

O modelo de degradação da via considerando as premissas adotadas neste trabalho tem o TQI como variável de entrada e é composto de duas sub-funções, uma função de recuperação e função de degradação ou taxa de degradação que poderão ser diferentes para cada corredor de transporte da MRS.

A resposta do modelo será o ciclo (em MTBT) de correção geométrica necessário para se manter a linha no mesmo padrão de qualidade atual.

$$\text{Ciclo de Socaria} = \frac{[TQI\ atual - \ (TQI\ atual\ x\ Função\ recuperação)]}{Função\ de\ Degradação}$$

3.1.1. FUNÇÃO DE RECUPERAÇÃO

Para determinar a função de recuperação é necessário realizar a regressão linear utilizando como variável de resposta o TQI após correção geométrica e como variável preditora o TQI antes desse serviço.

Para tal deve-se comparar o valor de TQI de cada bloco de 100 m de via (antes e após manutenção) ao longo de um trecho de no mínimo 1 km de extensão.

É importante também para a qualidade dessa análise que o intervalo entre a correção geométrica e a data de inspeção do carro controle não seja superior a 1 mês no trecho carregado e a 3 meses no trecho vazio.

A obtenção dos valores da função através da regressão se dá da seguinte forma:

$Yi = AXi + B\ e$

$Z = \sum_{i=1}^{n} (Y_i - AX_i - B)^2$ Z é a somatória dos quadrados dos resíduos.

Yi – TQI após correção geométrica
Xi – TQI no momento anterior a correção geométrica

Minimizar Z irá determinar os coeficientes de A e B que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos da regressão.

O método para obtenção da função de recuperação deverá ser o mesmo independente do corredor.

3.1.2. FUNÇÃO DE DEGRADAÇÃO

Para determinar a função de degradação é necessário realizar a regressão linear utilizando como variável de resposta o TQI e como variável preditora o MTBT (carga transportada no período).

Para tal deve-se comparar o valor de TQI de cada bloco de 100 m de via a cada inspeção do carro controle ao longo de um trecho mínimo de 1 km.

O método matemático aplicado para a função de degradação é o descrito na seção 3.1.1 e deverá ser o mesmo independente do corredor.

3.2. O MODELO DE ALOCAÇÃO DE RECURSOS POR PROGRAMAÇÃO LINEAR

A alocação de máquinas para realizar os serviços de correção geométrica na via pode ser modelada como um problema de transportes no qual a capacidade anual das máquinas precisa ser alocada de forma a maximizar o atendimento da demanda, que no estudo de caso apresentado neste trabalho se trata da extensão total em km de correção geométrica, calculada a partir do modelo de degradação da via proposto na seção 3.1.

Dados os ciclos de socaria previamente definidos, o problema de alocação das socadoras envolve:

(a) a demanda de socaria por trecho e período, sendo os trechos divididos por sua localização geográfica e ciclo definido;

(b) a capacidade produtiva por período de cada máquina, geralmente dada em metros por hora (já descontando as perdas devido a setup da máquina e a indisponibilidade).

(c) o modelo de intervalo praticado por trecho, ou seja, a disponibilidade de horas de manutenção (horas semanais, duração das paradas, variações do modelo ao longo do tempo, etc). Na MRS, atualmente, há 10 modelos distintos vigentes.

(d) restrições de deslocamento devido ao modelo de atuação das equipes por localização geográfica vigente hoje na MRS, impondo que haja determinação prévia das regiões em que cada equipe poderá realizar manutenção.

(e) restrições de deslocamento das máquinas devido a limitação técnica de execução de manutenção em determinado traçado geométrico. Este tipo de limitação se aplica as máquinas de modelo 3X, que não estão habilitadas para atuar em locais de curvas de raio inferior a 300 m.

Entre as máquinas disponíveis para uso da empresa, é possível que algumas já tenham alocação pré-definida (em projetos específicos) e seja de interesse da empresa (ou devido a existência de contrato) que estas sejam desconsideradas do problema.

Os modelos de intervalo mencionados em (b) são as variáveis mais voláteis do modelo, variando de acordo com a estratégia operacional, que pode ser impactada por flutuações no mercado e decisões de responsabilidade de áreas independentes dos processos de manutenção. Assim, é preciso um alinhamento prévio com as áreas envolvidas nesta decisão para mitigar o risco de grandes mudanças em um horizonte próximo, o que poderia tornar problemática alguma decisão estratégica da manutenção sem tempo hábil para reconsideração e mudança de rumo.

O modelo de programação linear na forma canônica pode ser expresso como:

$$\textit{Maximizar } cTx$$

$$\textit{sujeito a } Ax \leq b \qquad (1)$$

$$\textit{e } x \geq 0$$

onde x é o vetor das variáveis a serem determinadas (a solução), A é uma matriz de coeficientes conhecidos e b e c vetores de coeficientes também conhecidos. Em geral, as soluções desejadas são não-negativas e, por isto, a última linha está em evidência (de fato, esta restrição também pode ser modelada dentro da inequação $Ax \leq b$). A primeira linha evidencia o objetivo de maximizar (em outros problemas poderia ser minimizar) o valor da chamada função objetivo (cTx).

Em síntese, é necessário relacionar as variáveis anteriormente listadas através de relações lineares, para obter o modelo. Em primeiro lugar, está a formulação da função objetivo, ou seja, do valor que se deseja maximizar, no nosso caso particular. Neste trabalho, o modelo construído busca maximizar a produção total (em extensão) do conjunto de equipamentos disponíveis, ou seja, a soma da produção de cada máquina em cada trecho. Note que se é definido que x é o vetor de extensão produzida por máquina por trecho (número de elementos é igual ao produto da quantidade de equipamentos pela quantidade de corredores definidos), então c é um vetor de uns (todos os elementos são iguais a um) de mesmo número de elementos que x.

Esta produção, por sua vez deve ser não-negativa $x \geq 0$, em particular no caso em questão, pois não tem significado real produção negativa. Por outro lado, a produção deve estar limitada pelas horas de intervalo disponíveis por trecho no período considerado. Também é importante notar que a demanda de socaria por corredor deve ser uma restrição. Caso contrário corre-se o risco da solução alocar máquinas para um mesmo local além de sua necessidade real, muitas vezes gerando resultados absurdos, que, matematicamente certamente maximizam a produção, mas o fazem alocando recursos altamente produtivos para um dado local de alta disponibilidade de intervalos. Embora fisicamente seja possível realizar manutenção em um trecho continuamente, dificilmente seria economicamente interessante fazê-lo.

Desta forma, o vetor de restrições b contém os coeficientes correspondentes à disponibilidade de intervalos por corredor e à extensão máxima a ser socada por corredor. A matriz A, por sua vez, contém os coeficientes de produtividade horária. De fato, associado aos tempos disponíveis em b, em A devem estar os coeficientes de produtividade por local e máquina em unidades de tempo por extensão (h/m), ou seja, o inverso da produtividade em extensão por unidade de tempo geralmente informado. Como b também contém a extensão máxima a ser socada por trecho, em A os coeficientes associados a estas restrições são todos iguais a um (o vetor x já representa as variáveis de extensão a ser socada).

Considerando M máquinas e N trechos, o vetor b tem a forma (não negatividade não inclusa):

Tabela 5 – Vetor das Restrições do Modelo

b_{h1}	b_{h2}	..	b_{hN}	b_{e1}	b_{e2}	..	b_{eN}

Fonte: O Autor, 2016

Onde bhi representa horas disponíveis e bei a extensão máxima a ser socada no corredor i. Para as restrições de deslocamento e de limitação técnica dos equipamentos, a solução utilizada para a modelagem foi atribuir o valor zero ao coeficiente tecnológico correspondente a alocação da máquina em uma região inviável.

E a matriz A:

Tabela 6 – Matriz dos Coeficientes Tecnológicos

$a_{1,1}$	...	$a_{1,M}$	0	0	0	...	0	0	0
0	0	0	$a_{2,1}$	...	$a_{2,M}$	...	0	0	0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	0	0	...	$a_{N,1}$	...	$a_{N,M}$
1 0	... 0	1 0	0 1	0 ...	0 1	... ...	0 0	0 0	0 0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	0	0	0	0	...	1	...	1

Fonte: O Autor, 2016

Onde aij representa a produtividade (em h/m) da máquina j no corredor i. A matriz A tem então 2N linhas e N×M colunas. Na modelagem nos softwares próprios, entretanto, muitas vezes a construção da matriz acima não é necessária. Utilizando softwares de spreadsheets, por exemplo, as restrições podem ser quebradas em tabelas menores no modelo, evitando trabalhar com uma matriz muito esparsa.

3.3. PROBABILIDADES DE EXCEÇÕES DADA A QUALIDADE DA VIA

Para determinar as probabilidades de exceções ou defeitos de geometria dada a qualidade da via foi realizado levantamento do TQI de cada bloco de 100 m de via da MRS no ciclo do minério e na região do Vale do Paraíba (Saudade a Pinheirinho). Posteriormente para cada bloco de 100 m de via foram contabilizados todos os defeitos de geometria (torção, empeno, superelevação, alinhamento e nivelamento).

Feito isso, estabeleceram-se primeiramente as seguintes faixas para TQI:

0 <= TQI < 1.66 – Estágio inicial da via

*1.66 <= TQI < 2.*4 – Degradação inicial (via ainda em boas condições)

2.4 <= TQI < 3.4 – Via intermediária

3.4 <= TQI < 5 – Via degradada

TQI >= 5 – Via em estágio avançado de degradação

Finalmente, para cada faixa estabelecida foram contabilizados os defeitos de geometria existentes.

3.4. COLETA DE DADOS E DETERMINAÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES ESTATÍSTICAS

A coleta de dados foi realizada utilizando o histórico de três anos de inspeção do carro controle, assim como volume transportado na MRS e datas de correções geométricas realizadas e disponíveis nas OS's em sistema.

As informações referentes ao MTBT e intervalos estão disponíveis integralmente, já o volume de correção geométrica avaliado corresponde a cerca de 20 % do total realizado dentro do horizonte de 1 ano e as taxas de degradação foram calculadas com base em uma amostra correspondente a 20 % de toda extensão do trecho avaliado.

Já para a determinação das probabilidades de exceções dada a qualidade da via foi considerada apenas a inspeção mais recente do TrackSTAR (51ª) para a contabilização dos defeitos e respectivo TQI associado .Neste caso foi analisada toda a população.

A coleta de dados foi realizada de forma a determinar as distribuições estatísticas para os seguintes parâmetros:

1) Taxa de Degradação

2) Taxa de Recuperação

3) Probabilidade de Exceções de Geometria

E as seguintes constantes do modelo de alocação de máquinas:

4) Coeficientes tecnológicos

5) Restrições

A partir desses dados, utilizando o *Minitab*, foi possível obter a distribuições de probabilidade e utilizando o *Microsoft Excel* determinar os coeficientes tecnológicos e restrições.

3.4.1. VOLUME DE TRANSPORTE POR CORREDOR NA MRS

O volume de transporte (MTBT) do trecho irá determinar em conjunto com a taxa de degradação a velocidade com que uma via recém manutenida irá se deteriorar novamente.

Devido as características operacionais da MRS esse volume pode apresentar grandes diferenças de um trecho para o outro, variando entre 1.8 MTBT/mês nos locais de menor quantidade de carga transportada para mais de 15 MTBT/mês em outros.

Abaixo são apresentadas as tabelas com o MTBT por corredor de transporte da MRS ao longo dos anos de 2015, 2014 e 2013:

Tabela 7 – MTBT por corredor da MRS 2015

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
FERROVIA DO AÇO NORTE	6,31	5,64	6,13	6,30	6,19	6,57	6,85	6,98	6,32	7,84	7,31	7,69
FERROVIA DO AÇO SUL	12,44	11,06	12,47	12,85	12,73	12,88	12,92	13,36	13,29	14,59	12,95	13,51
RAMAL DO PARAOPEBA	3,58	3,09	3,53	3,61	3,90	3,55	3,24	3,28	3,71	3,62	3,31	3,41
LINHA CENTRO	2,46	2,21	2,47	2,44	2,48	2,45	2,50	2,55	2,53	2,74	2,46	2,58
SERRA DO MAR	15,32	13,72	15,37	15,83	15,99	16,15	16,69	16,64	16,91	18,26	16,60	17,37
KM 64-BRISAMAR	12,88	11,46	13,04	13,32	13,36	13,46	13,87	13,87	14,22	15,38	13,89	14,67
BRISAMAR - GUAÍBA	5,29	5,00	5,54	6,08	5,57	5,58	6,14	5,99	5,64	5,73	5,89	6,32
SAUDADE-BARRA	11,98	10,68	12,01	12,37	12,44	12,63	12,82	13,02	13,04	14,17	12,83	13,36
VALE DO PARAIBA	1,21	1,13	1,30	1,37	1,37	1,15	1,12	1,08	1,00	1,20	1,08	0,96

Fonte: O Autor, 2016

Tabela 8– MTBT por corredor da MRS 2014

	2014 jan	2014 fev	2014 mar	2014 abr	2014 mai	2014 jun	2014 jul	2014 ago	2014 set	2014 out	2014 nov	2014 dez
FERROVIA DO AÇO NORTE	5,15	4,43	5,31	5,24	5,56	5,76	6,24	5,58	5,83	6,85	6,44	6,69
FERROVIA DO AÇO SUL	11,27	10,45	12,16	11,17	14,02	14,02	14,02	14,07	12,44	14,13	13,36	13,70
RAMAL DO PARAOPEBA	3,79	3,57	4,02	3,60	4,91	4,77	4,55	4,89	3,69	4,05	3,83	3,84
LINHA CENTRO (km 324-489)	2,34	2,14	2,53	2,41	2,86	2,82	2,82	2,83	2,50	2,89	2,65	2,78
SERRA DO MAR	13,99	12,77	15,28	13,91	17,42	17,55	17,37	17,74	15,55	18,07	16,99	17,27
KM 64-BRISAMAR	11,66	10,69	12,78	11,57	14,63	14,74	14,59	14,70	12,89	15,01	14,13	14,36
BRISAMAR - GUAÍBA	3,79	2,92	3,66	4,87	5,63	5,61	6,01	5,32	4,71	5,85	5,20	5,80
SAUDADE-BARRA	10,95	10,08	11,79	10,77	13,53	13,53	13,54	13,71	12,12	13,78	13,14	13,36
VALE DO PARAIBA	1,43	1,20	1,33	1,25	1,40	1,20	1,14	1,20	1,18	1,22	1,10	1,11

Fonte: O Autor, 2016

Tabela 9– MTBT por corredor da MRS 2013

	2013 jan	2013 fev	2013 mar	2013 abr	2013 mai	2013 jun	2013 jul	2013 ago	2013 set	2013 out	2013 nov	2013 dez
FERROVIA DO AÇO NORTE	4,58	5,19	5,67	5,61	5,25	5,49	5,74	5,59	5,76	5,66	5,43	4,41
FERROVIA DO AÇO SUL	9,19	9,62	11,69	11,62	12,74	12,48	13,19	13,12	13,82	13,86	13,26	11,92
RAMAL DO PARAOPEBA	2,92	2,90	4,00	3,88	4,41	4,35	4,48	4,59	4,87	4,79	4,70	4,19
LINHA CENTRO (km 324-489)	1,94	1,91	2,33	2,30	2,55	2,53	2,61	2,59	2,73	2,82	2,71	2,37
SERRA DO MAR	11,00	11,28	14,24	14,39	15,25	15,12	16,25	16,45	17,26	17,29	16,64	14,62

KM 64-BRISAMAR	9,09	9,38	11,83	12,07	12,89	12,80	13,69	13,89	14,42	14,57	13,96	12,30
BRISAMAR - GUAÍBA	3,90	4,08	5,11	4,36	5,06	5,12	5,20	4,98	5,54	5,26	5,20	4,28
SAUDADE-BARRA	8,77	8,99	11,07	11,20	12,02	12,02	12,78	12,90	13,51	13,64	13,00	11,58
VALE DO PARAIBA	1,47	1,29	1,47	1,26	1,48	1,52	1,48	1,58	1,53	1,67	1,58	1,52

Fonte: O Autor, 2016

3.4.2. MODELOS DE INTERVALOES DE MANUTENÇÃO E PRODUTIVIDADE DE MÁQUINAS

Atualmente existem na MRS 10 diferentes modelos de intervalos de manutenção de via sendo estes sazonais, variando de acordo com a necessidade de produção da empresa no período. Esses intervalos variam em número de dias por semana, horas disponíveis por dia e estratégia de paralisação, que pode ocorrer na forma de blackout (todo o corredor disponível para manutenção) ou também pode ocorrer por seção de bloqueio (apenas um entrepátio está disponível para manutenção).

Para o nosso modelo são relevantes apenas o número de dias por semana e horas por dia disponíveis. Abaixo é apresentado o modelo vigente hoje na MRS:

Tabela 10 – Intervalos de manutenção por corredor da MRS

Painel		Extensão (Km)	INTERVALOS 2015											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Ferrovia do Aço	FOO_FIC	59	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00	2 x 03:00
	FIC_FEU	289	2 x 05:00	2 x 05:00	2 x 05:00	1 x 05:00	1 x 04:00	1 x 04:00	1 x 04:00	1 x 04:00	1 x 04:00	1 x 04:00	1 x 05:00	1 x 05:00
	FOI_FEU	95	5 x 05:00	5 x 05:00	5 x 05:00	2 x 05:00	2 x 04:00	2 x 04:00	2 x 04:00	2 x 04:00	2 x 04:00	2 x 04:00	2 x 05:00	2 x 05:00
Linha do Centro	FAT_FBC	262	2 x 05:00	2 x 05:00	2 x 05:00	1 x 04:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 04:00	1 x 04:00
	FDT_FIL	133	6 x 05:00	6 x 05:00	6 x 05:00	1 x 04:00	1 x03:00	1 x03:00	1 x03:00	1 x03:00	1 x03:00	1 x03:00	1 x04:00	1 x04:00
Barra do Piraí	FPB_FPU	48	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00
	FBP_FQS	50	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00
	FGD_FBA	30	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00	5 x 06:00
Vale do Paraiba	FPB_AlçaIEF	281	5 x 02:00	5 x 02:00	5 x 02:00	3 x 02:00	3 x 02:00	3 x 02:00	3 x 02:00	3 x 02:00	3 x 02:00	3 x 02:00	3 x 02:00	3 x 02:00
Paraopeba	FCY_FMO	48	6 x 05:00	6 x 05:00	6 x 05:00	1 x 04:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 03:00	1 x 04:00	1 x 04:00
	FMO_FLP	29	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30	3 x 01:30
	FLP_FIE	111	5 x 02:00	5 x 02:00	5 x 02:00	5 x 02:00	5 x 01:30	5 x 01:30	5 x 01:30	5 x 01:30	5 x 01:30	5 x 01:30	5 x 02:00	5 x 02:00
	FIE_FLH e FIE_FBO	21	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00	3 x 04:00

Fonte: O Autor, 2016

A produtividade e disponibilidade utilizadas no modelo foram obtidas com base nas informações fornecidas pela Gerência de Equipamentos e Trilhos, tendo já sido descontadas da produtividade dos equipamentos as perdas mecânicas e as perdas de setup (deslocamento e preparação dentro do intervalo).

Já a disponibilidade dos ativos utilizada foi obtida com base no valor médio entre 2014 e 2015 já que não há sazonalidade observada historicamente para essa variável do modelo. Como não havia nos anos anteriores um controle por grupo de máquinas, foi utilizado o valor de 87% para todas sem distinção.

Tabela 11 – Produtividade das socadoras na MRS

SOCADORA	GRUPO	PRODUTIVIDADE m/h
S-13	G1	1500
S-06	G2	300
S-07	G3	300
S-09	G4	300
S-08	G5	300
S-11	G6	300
S-12	G7	300
S-05	G8	300
S-26	G9	800
S-27	G10	800

Fonte: O Autor, 2016

3.4.3. TAXAS DE RECUPERAÇÃO

Utilizando as informações de OS de Socaria Mecanizada em 2015 e os dados de inspeção do carro controle foram levantadas as taxa de recuperação da via para os diferentes corredores de análise do modelo. Com base nessas informações os seguintes gráficos foram gerados:

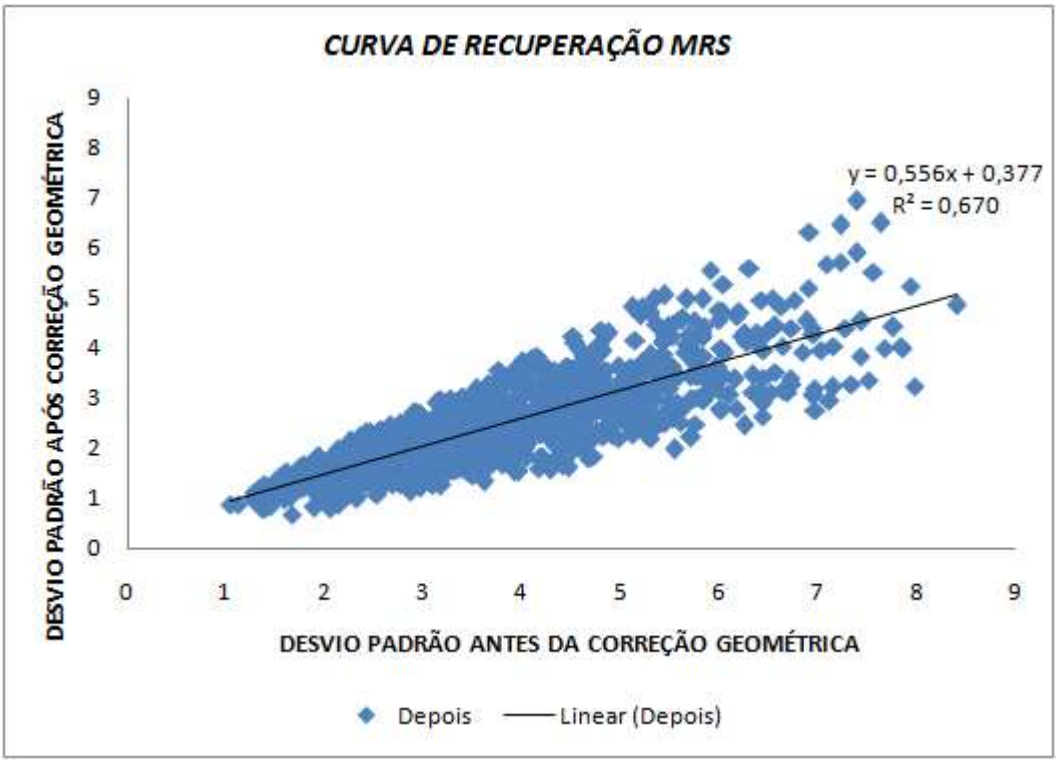


Figura 23 – Função Recuperação de Qualidade MRS

A função recuperação encontrada para MRS através do gráfico possui coeficiente angular igual a 0,556 e coeficiente linear 0,377, o R^2 da função linear foi 0,67.

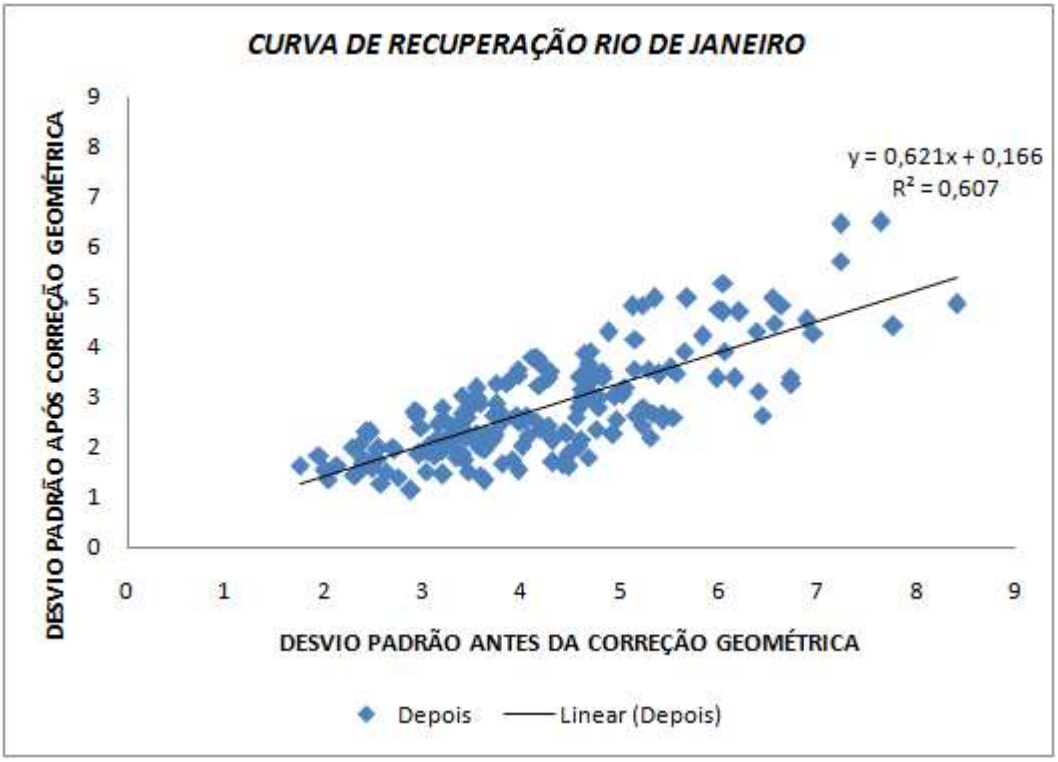


Figura 24 – Função Recuperação de Qualidade Rio de Janeiro

A função recuperação encontrada para o Rio de Janeiro através do gráfico possui coeficiente angular igual a 0,621 e coeficiente linear 0,166, o R^2 da função linear é 0,607. Essa função foi introduzida na fórmula de cálculo do ciclo de socaria do Rio de Janeiro.

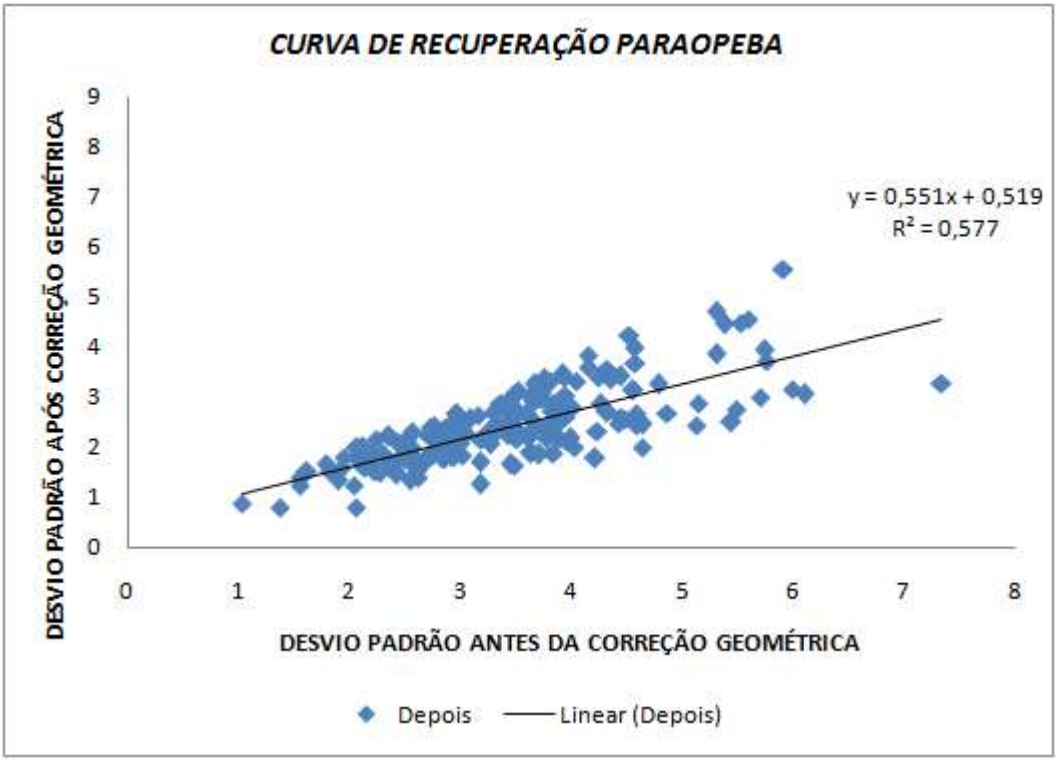


Figura 25 – Função Recuperação de Qualidade Paraopeba

A função recuperação encontrada para o Paraopeba através do gráfico possui coeficiente angular igual a 0,551 e coeficiente linear 0,519, o R^2 da função linear é 0,527. Essa função foi introduzida na fórmula de cálculo do ciclo de socaria do Paraopeba.

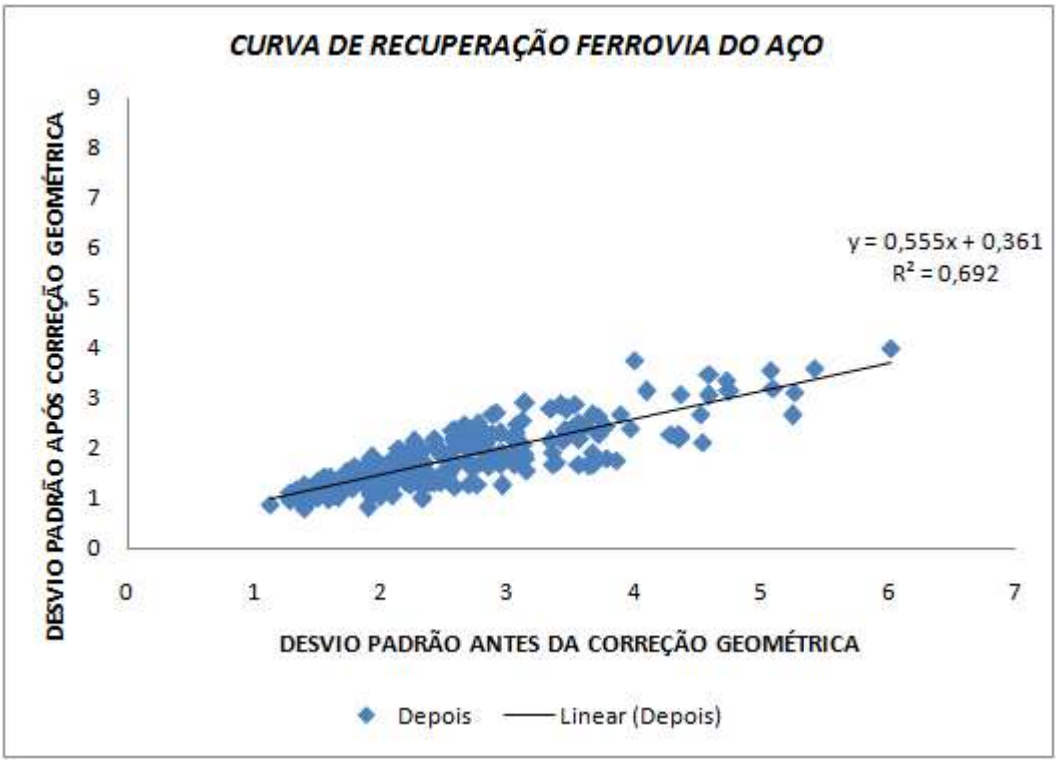


Figura 26 – Função Recuperação de Qualidade Ferrovia do Aço

A função recuperação encontrada para o Ferrovia do Aço através do gráfico possui coeficiente angular igual a 0,555 e coeficiente linear 0,361, o R^2 da função linear é 0,692. Essa função foi introduzida na fórmula de cálculo do ciclo de socaria da Ferrovia do Aço.

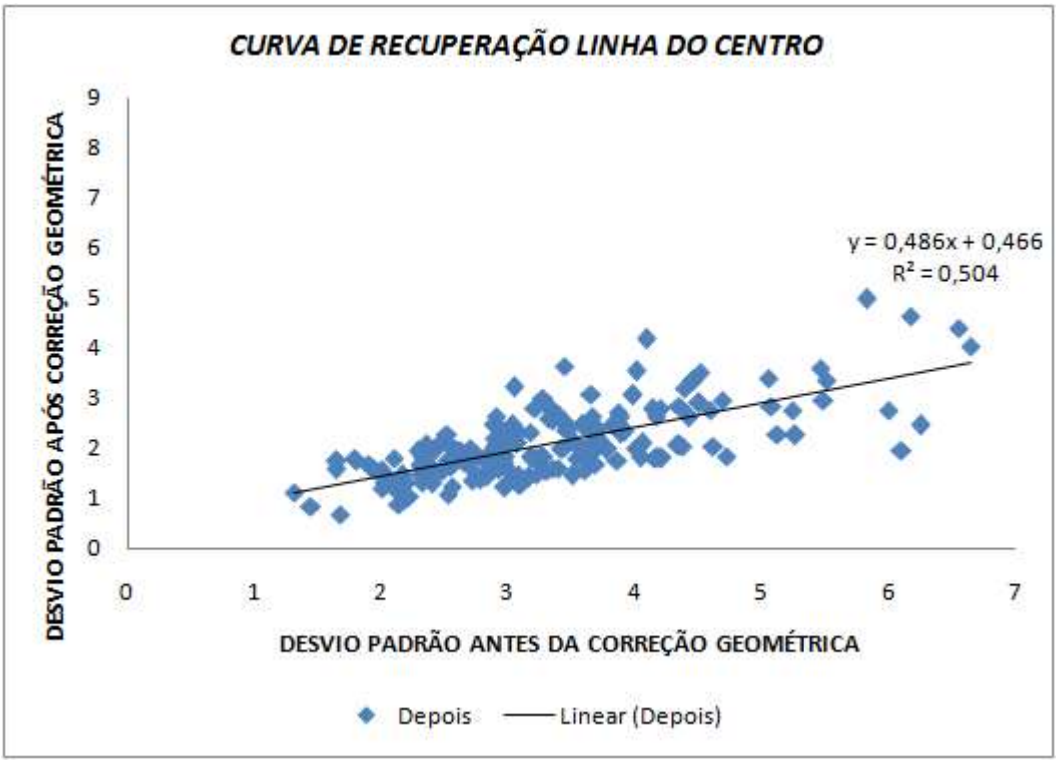


Figura 27 – Função Recuperação de Qualidade Linha do Centro

A função recuperação encontrada para a Linha do Centro através do gráfico possui coeficiente angular igual a 0,486 e coeficiente linear 0,466, o R^2 da função linear é 0,504. Essa função foi introduzida na fórmula de cálculo do ciclo de socaria da Linha do Centro.

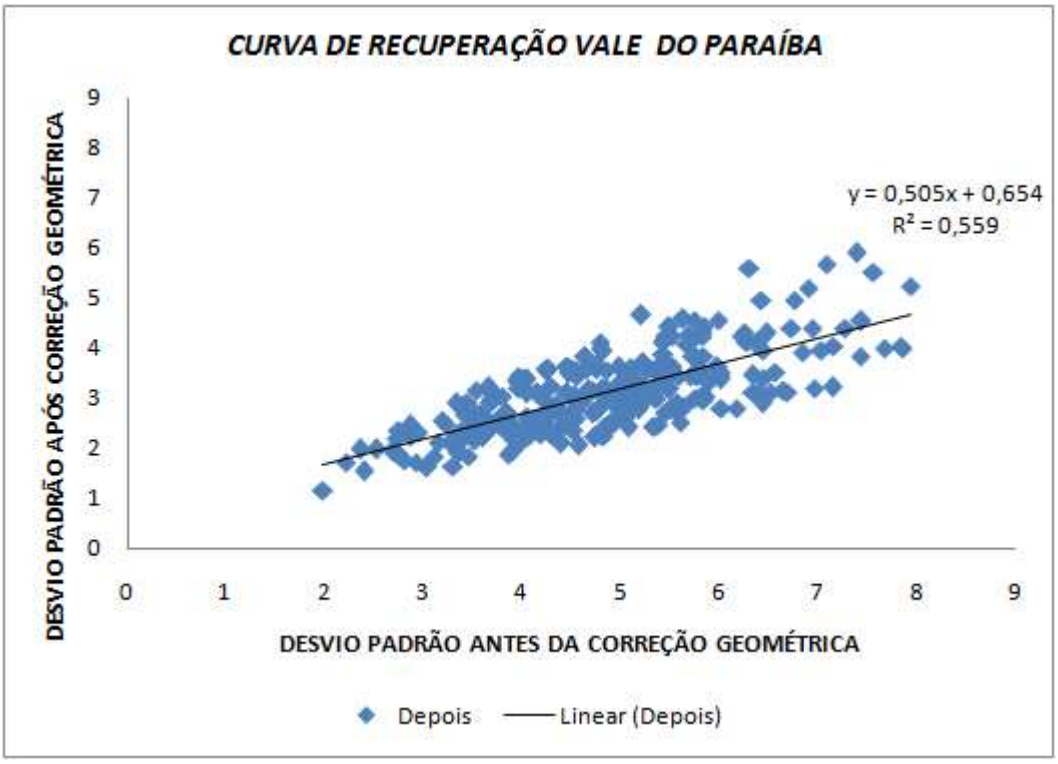


Figura 28 – Função Recuperação de Qualidade Vale do Paraíba

A função recuperação encontrada para o Vale do Paraíba através do gráfico possui coeficiente angular igual a 0,505 e coeficiente linear 0,654, o R^2 da função linear é 0,559. Essa função foi introduzida na fórmula de cálculo do ciclo de socaria do Vale do Paraíba.

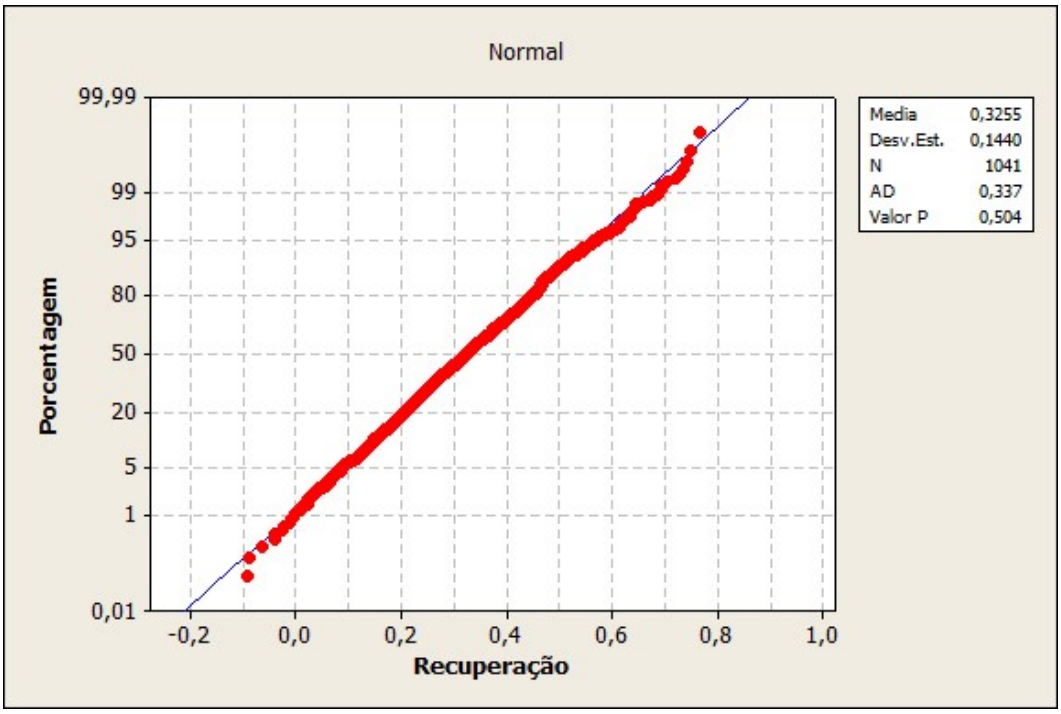


Figura 29 – Teste de Normalidade das Taxas de Recuperação na MRS

Foi realizado um teste de normalidade para verificar se as taxas de recuperação de socaria possuem distribuição Normal. O valor P encontrado é maior do que 0,005 o que caracteriza como verdadeira a hipótese.

3.4.4. TAXAS DE DEGRADAÇÃO

Utilizando as informações de MTBT transportado entre 2013 e 2015 e os dados de inspeção do carro controle foram levantadas as taxa de degradação da via para os diferentes corredores de análise do modelo. Com essas informações os seguintes gráficos foram gerados:

:

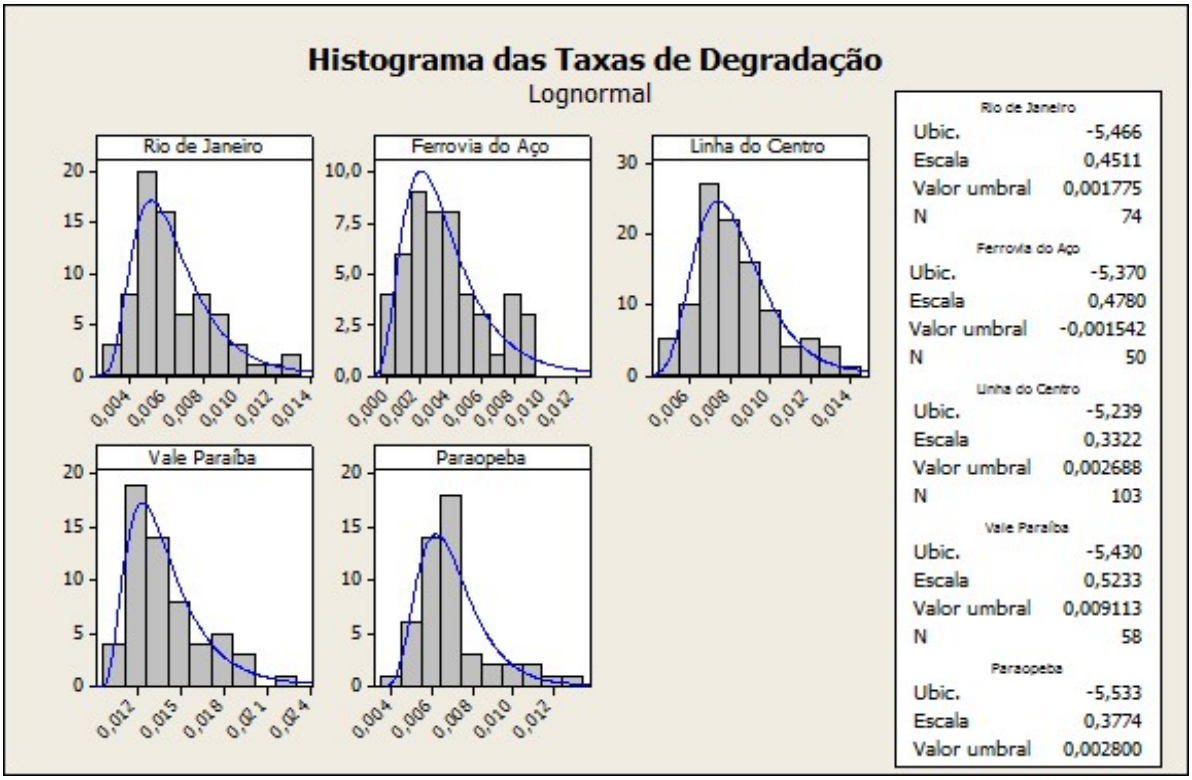


Figura 30 – Distribuições de Probabilidade das Taxas de Degradação dos Corredores da MRS

Para os diferentes corredores foram determinados os seguintes parâmetros das distribuições Lognormais:

Rio de Janeiro – Localização: -5,466 Escala: 0,4511

Ferrovia do Aço – Localização: -5,370 e Escala: 0,4780

Linha do Centro– Localização: -5,239 e Escala: 0,3322

Vale do Paraíba – Localização: -4,430 e Escala: 0,5233

Paraopeba– Localização: -5,533 e Escala: 0,3774

As médias e desvio padrão de cada amostra são:

Tabela 11 –Médias e desvios padrão das amostras

	Rio de Janeiro	Ferrovia do Aço	Linha do Centro	Vale Paraíba	Paraopeba
Média	0,0065	0,0037	0,0083	0,0141	0,0070
Desvio Padrão	0,0022	0,0024	0,0019	0,0027	0,0017

Fonte: O Autor, 2016

3.4.5. PROBABILIDADES DE EXCEÇÕES DE GEOMETRIA

Utilizando as informações disponibilizadas após a última passagem do carro controle foi gerada a distribuição da qualidade da via ao longo de todo o ciclo do minério mais a região do Vale do Paraíba, assim como as exceções de geometria detectadas durante a inspeção. O resultado pode ser observado através do gráfico e da tabela abaixo:

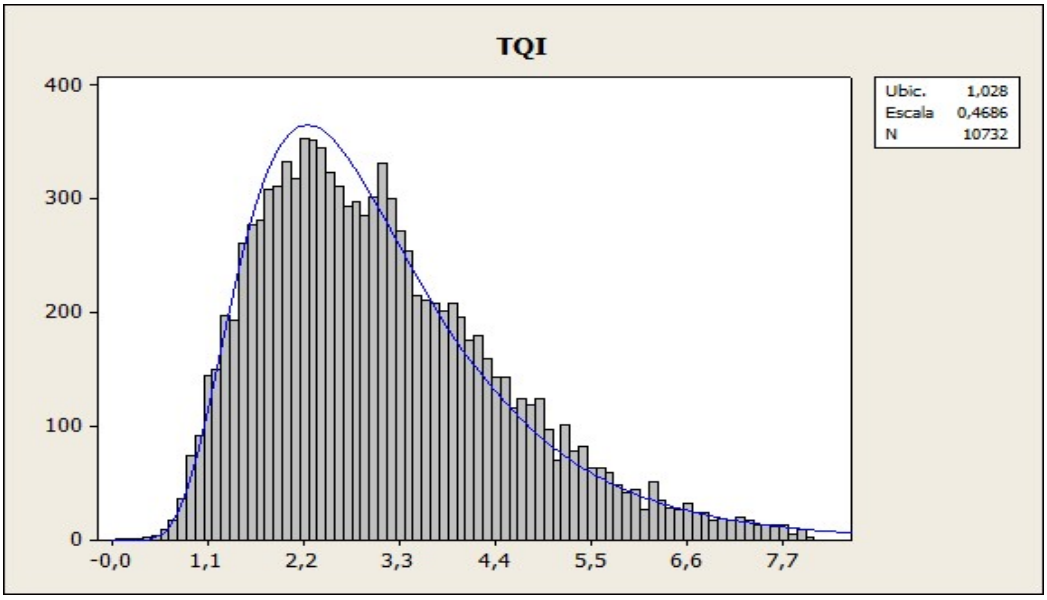


Figura 31 – Distribuições de Probabilidade das Taxas de Degradação dos Corredores da MRS

A distribuição da qualidade da via ao longo do trecho analisado possui média igual a 3,12 e desvio padrão igual a 1,46. Considerando a distribuição como lognormal o parâmetro de localização é igual a 1,028 e a escala igual a 0,4686.

Tabela 12 – TQI x Defeitos

Faixas TQI	***Defeitos***
<=1.66	8
1.66<TQI<=2.4	13
2.4<TQI<=3.4	33
3.4<TQI<=5	210
TQI>=5	127

Fonte: O Autor, 2016

Na tabela acima as faixas de frequência foram distribuídas de acordo com o critério mencionado na seção 3.3 e a quantidade de exceções foi atribuída a cada uma dessas faixas.

4. RESULTADOS

4.1. RESULTADOS ATINGIDOS COM OS MODELOS

Utilizando o modelo descrito no capítulo 3 para cálculo de ciclos de correção geométrica, assim como as informações disponíveis sobre volume de transporte realizado, leituras de inspeções do carro controle e o modelo de programação linear, calculou-se a demanda de socaria, assim como a distribuição das máquinas destinadas a esse tipo de manutenção de forma a maximizar a produção destas no ano.

4.1.1. CICLOS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA E DEMANDA DE SOCARIA

Os resultados obtidos para os ciclos de correção geométrica foram:

Tabela 13 – Ciclos Correção Geométrica Calculados para MRS

Corredor	*MTBT anual*	*Função Recuperação*	*Taxa Degradação*	*TQI Atual*	*Ciclo Calculado MTBT*	*Ciclo a ser praticado*
Rio de Janeiro	194	0,621X+0,166	0,0065	3,9	201,86	1 x ano
Paraopeba	60	0,551X+0,519	0,0070	3,2	131,11	1 x ano
Linha do Centro	36	0,486X+0,466	0,0080	3	134,50	1/3 x ano
Ferrovia do Aço	155	0,555X+0,361	0,0037	2,4	191,08	1 x ano
Vale do Paraíba	22	0,505X+0,654	0,0141	3,7	97,31	1/3 x ano

Fonte: O Autor, 2016

Como descrito nas seções anteriores, os valores das taxas de recuperação e degradação não são determinísticos e sim probabilísticos, portanto, o ciclo calculado também será probabilístico e pode variar de acordo com as condições de cada trecho e equipamento que realizar a manutenção.

Apesar disso, por atual inviabilidade prática de se controlar e planejar a manutenção utilizando gatilhos diferente para os segmentos de via é adotado um ciclo médio por corredor.

Para os corredores Paraopeba, Linha do Centro e Vale do Paraíba, o ciclo calculado é maior do que o que deverá ser praticado. Porém, por estratégia da empresa, nestes trechos foi adotada a postura conservadora de se praticar o ciclo inferior ao calculado.

4.1.2. ALOCAÇÃO DA CAPACIDADE DAS SOCADORAS

Para a alocação das máquinas de correção geométrica foram elaborados 2 cenários em uma tentativa de prever uma possível variação no orçamento que pode ocorrer devido a fatores externos e a estratégia da empresa que também pode sofrer alterações no médio e longo prazo.

Adicionalmente ao ciclo preventivo, em todos os cenários é adicionada à demanda 20% da extensão total devido ao surgimento de atividades emergenciais que tem caráter prioritário e corretivo.

Cenário 1:

a) No cenário 1 do conjunto de 10 máquinas existente, 9 são livres para executar manutenção em qualquer trecho respeitando as limitações técnicas do equipamento e as restrições de deslocamento das equipes.
b) Uma máquina fica dedicada exclusivamente a região do Paraopeba (S-08).
c) Demanda total de 1232 km para correção geométrica

Cenário 2:

a) No cenário 2 do conjunto de 10 máquinas existente, todas são livres para executar manutenção em qualquer trecho respeitando as limitações técnicas do equipamento e as restrições de deslocamento das equipes.
b) Demanda total de 1232 km para correção geométrica
c) Máquinas indisponíveis: S-08, S-09, S-10, S-12, S-05.

Utilizando o modelo de programação linear desenvolvido e a demanda calculada através do modelo da seção 4.1.1, foram alcançados os seguintes resultados:

Cenário 1:

Tabela 14 – Atendimento da demanda de ciclos no cenário 1

Trecho	Demanda	Demanda não atendida
Ferrovia do Aço - Norte	73,2	2,8E-10
P2-06 a P2-14	114	5,0E-10
P1 - 07 a P2 - 06	217,3765	15,4
Ilídio_Mario Castilho	51,6	7,12319E-11
Murtinho_Caetano Lopes	25,2	0
Jeceaba_Ibirité	129,6	2,45535E-10
Dias Tavares- Carandaí	164,4	0
Aristides - Dias Tavares	91,5	6,1E-11
PINHEIRAL	115,2	-6,7E-11

VALE PARAIBA	156	-1,1E-09
BRISAMAR	79,2	-4,6E-11

Fonte: O Autor, 2016

No cenário 1, dos 1232 km de demanda, 15,4 km não são atendidos no trecho P1 - 07 a P2 – 06.

Tabela 15 – Utilização de semanas no cenário 1

	Semanas utilizadas 1º tri	Semanas Disponíveis 1 tri	Semanas utilizadas abr-dez	Semanas disponíveis abr-dec
S-13	8,7	8,7	36,5	36,5
S-06	8,7	8,7	36,5	36,5
S-07	4,3	8,7	36,5	36,5
S-08	8,7	8,7	36,5	36,5
S-09	8,7	8,7	36,5	36,5
S-10	8,7	8,7	36,5	36,5
S-12	8,7	8,7	36,5	36,5
S-05	8,7	8,7	36,5	36,5
S-26	8,7	8,7	36,5	36,5
S-27	8,7	8,7	36,5	36,5

Fonte: O Autor, 2016

Exceto a máquina S-07, as demais utilizam 100% das semanas disponíveis no ano, lembrando que da forma como o modelo foi construído as indisponibilidades são mensuradas nos coeficientes tecnológicos.

A S-07 não utiliza sua sobra de capacidade para atender os 15,4 km faltantes devido a restrição de deslocamento de equipes, que não permite que essa máquina atenda a região entre o P1-07 e o P2-06.

Cenário 2:

Tabela 16 – Atendimento da demanda de ciclos no cenário 2

Trecho	Demanda	Demanda não atendida
Ferrovia do Aço - Norte	73,2	2,4E-11
P2-06 a P2-14	114	-2,6E-11
P1 - 07 a P2 - 06	123,1	109,7
Ilídio_Mario Castilho	51,6	0
Murtinho_Caetano Lopes	0	25,20
Jeceaba_Ibirité	57,1	72,50

Dias Tavares- Carandaí	164,4	0,00
Aristides - Dias Tavares	40,3	5,1E+01
PINHEIRAL	115,2	-8,6E-11
VALE PARAIBA	96,5	5,9E+01
BRISAMAR	79,2	-5,9E-11

Fonte: O Autor, 2016

No cenário 2, dos 1232 km de demanda, 317,98 km não são atendidos. As regiões não atendidas foram P107 a P2-06, Murtinho a Caetano Lopes, Jeceaba a Ibirité, Aristides a Dias Tavares e Vale do Paraíba.

Tabela 17 – Utilização de semanas no cenário 2

	Semanas utilizadas 1º tri	**Semanas Disponíveis 1 tri**	**Semanas utilizadas abr-dez**	**Semanas disponíveis abr-dez**
S-13	8,7	8,7	36,5	36,5
S-06	8,7	8,7	36,5	36,5
S-07	8,7	8,7	36,5	36,5
S-08	0	8,7	0,0	36,5
S-09	0	8,7	0,0	36,5
S-10	0	8,7	0,0	36,5
S-12	0	8,7	0,0	36,5
S-05	0	8,7	0,0	36,5
S-26	8,7	8,7	36,5	36,5
S-27	8,7	8,7	36,5	36,5

Fonte: O Autor, 2016

Todas as máquinas disponíveis utilizam 100 % das semanas no cenário 2.

4.1.3. PROBABILIDADES DE EXCEÇÕES X TQI

Utilizando as informações do item 3.4.5 foi atingido o seguinte resultado:

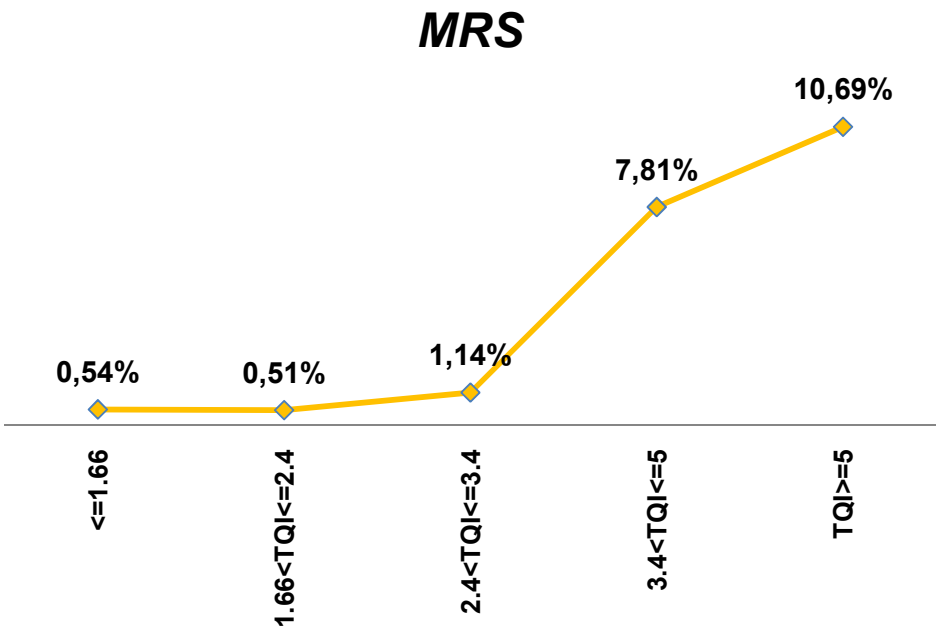


Figura 32 – Probabilidade de Exceções dada a Qualidade da Via na MRS

A partir do TQI maior do que 3,4 ocorrem significativos aumentos da probabilidade de se encontrar uma exceção de geometria na via. Para uma malha de aproximadamente 1700 km esse patamar de qualidade desencadearia uma extensão insustentável de corretivas, levando em conta que os padrões adotados na MRS para exceções são os mesmos dos EUA.

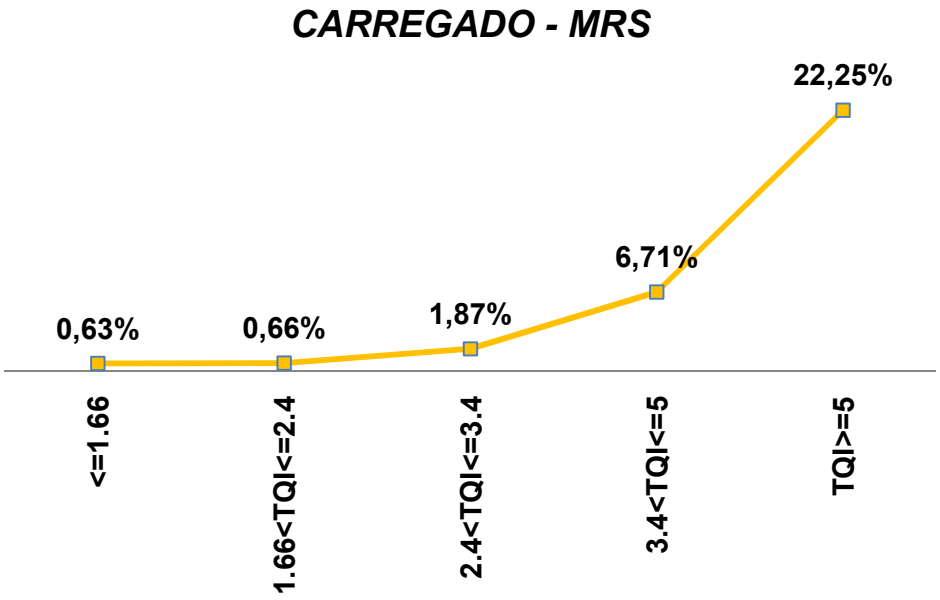


Figura 33 – Probabilidade de Exceções dada a Qualidade da Via no Trecho Carregado

No trecho onde há circulação predominante de trens carregados também pode ser identificada uma mudança de patamar a partir de valores de TQI superiores a 3,4. Para valores de TQI superiores a 5, a probabilidade é maior do que o dobro do apresentado para o mesmo ponto na figura 32.

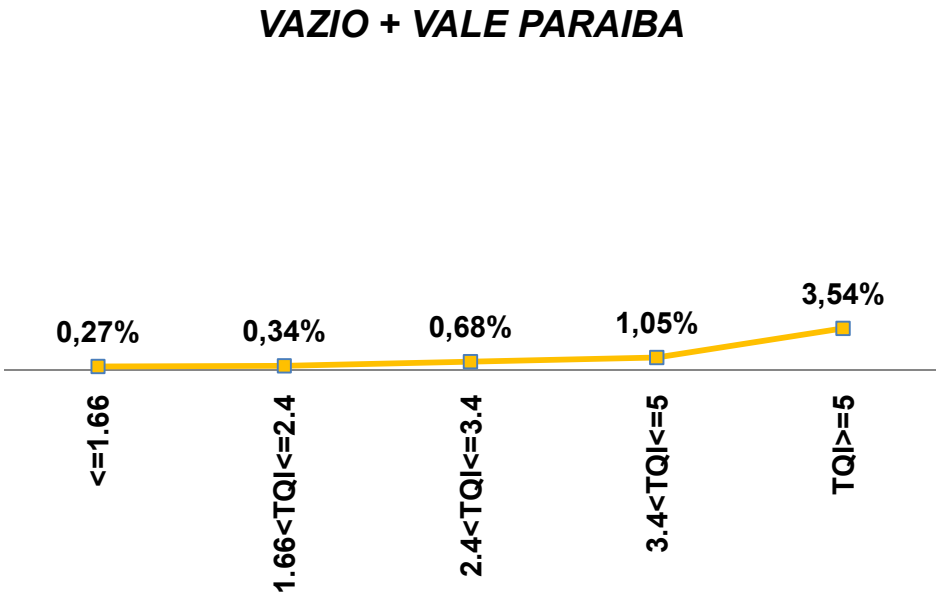


Figura 34 – Probabilidade de Exceções dada a Qualidade da Via no Trecho Vazio + Vale do Paraíba

No trecho onde há circulação predominante de trens vazios o comportamento é bastante diferente do apresentado nas figuras 32 e 33, o máximo valor atingido para probabilidade de exceções é 33% do apresentado na figura 32 e apenas 15,91% do apresentado na figura 33.

4.2. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS, ANÁLISE DA ADERÊNCIA E PROJEÇÕES

4.2.1. ANÁLISE DOS CICLOS DE CORREÇÃO GEOMÉTRICA

No modelo de ciclos de correção geométrica apresentado, um importante parâmetro a ser avaliado é o coeficiente angular da reta que determina a curva de recuperação da via. É esse parâmetro que representa em termos matemáticos a capacidade da via de restabelecer sua condição anterior a degradação sofrida.

Conforme apresentado na seção 2.7, ao longo do seu ciclo de vida, a via tende a perder essa capacidade o que resulta em redução do ciclo de manutenção necessário e conseqüente aumento da demanda de manutenção.

Portanto, quanto maior for o coeficiente angular da reta do modelo de recuperação, menor será a capacidade de recuperação da via no trecho. Os valores apresentados para os diferentes corredores foram:

Rio de Janeiro: 0,621X+0,166
Paraopeba: 0,551X+0,519
Linha do Centro: 0,486X+0,466
Ferrovia do Aço: 0,555X+0,361
Vale do Paraíba: 0,505X+0,654

È possível observar que o trecho do Rio de Janeiro apresenta o maior coeficiente angular seguido da Ferrovia do Aço, Paraopeba, Linha co Centro e Vale do Paraíba.

Os três maiores valores encontrados são locais onde há circulação predominante de trens carregados que, portanto, devido a essas características operacionais são submetidos a maiores esforços se comparados aos demais e desta forma, ao longo de seu ciclo de vida irão sofrer um número maior de intervenções devido a sua acelerada degradação. Um resultado

esperado devido a essa característica é a perda gradual da capacidade de recuperação devido aos vários ciclos de manutenção a que a via é submetida.

É importante também ter conhecimento de que as vias têm diferentes idades, sendo a Ferrovia do Aço um projeto da década de 80 e tanto Paraopeba como Rio de Janeiro, são projetos centenários.

Além disso, o MTBT transportado ao longo do Paraopeba é menos da metade do transportado anualmente pela Ferrovia do Aço e Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro: 194 MTBT

Paraopeba: 60 MTBT

Linha do Centro: 36 MTBT

Ferrovia do Aço: 155 MTBT

Vale do Paraíba: 22 MTBT

Tabela 18 – MTBT x Coeficiente Angular dos Modelos

MTBT	***Coeficiente Angular***
194	0,621
155	0,555
60	0,551
36	0,486
22	0,505

Fonte: O Autor, 2016

Fazendo a correlação entre os valores em MTBT transportados anualmente e os coeficientes angulares das retas dos modelos de recuperação chegamos ao valor de 0,89, o que mostra uma forte correlação entre os dados apresentados e pode ser considerado um forte indício da confirmação prática da teoria de degradação da superestrutura ferroviária.

Outro ponto importante que deve ser avaliado são os resultados dos ciclos estimados em MTBT para cada corredor. Segundo Selig (1989), para dormentes de madeira, que representam hoje cerca de 90% da matriz da MRS, o valor esperado para ciclos de correção geométrica seria 150 MTBT. No modelo apresentado os valores oscilam entre 201,86 e 97,31 e na média de todos os corredores o valor encontrado foi 151,82.

Com base nesses argumentos, pode-se dizer que os valores atingidos com os modelos de degradação são coerentes e satisfatórios.

Segundo Indraratna (2010), o lastro pode apresentar uma vida útil média de 20 anos em ferrovias de Heavy Haul. Utilizando essa premissa foi estimada uma perda anual de 5% da

capacidade de recuperação da via e realizada uma projeção de necessidade de intervenção para os próximos 5 anos. Os resultados atingidos foram:

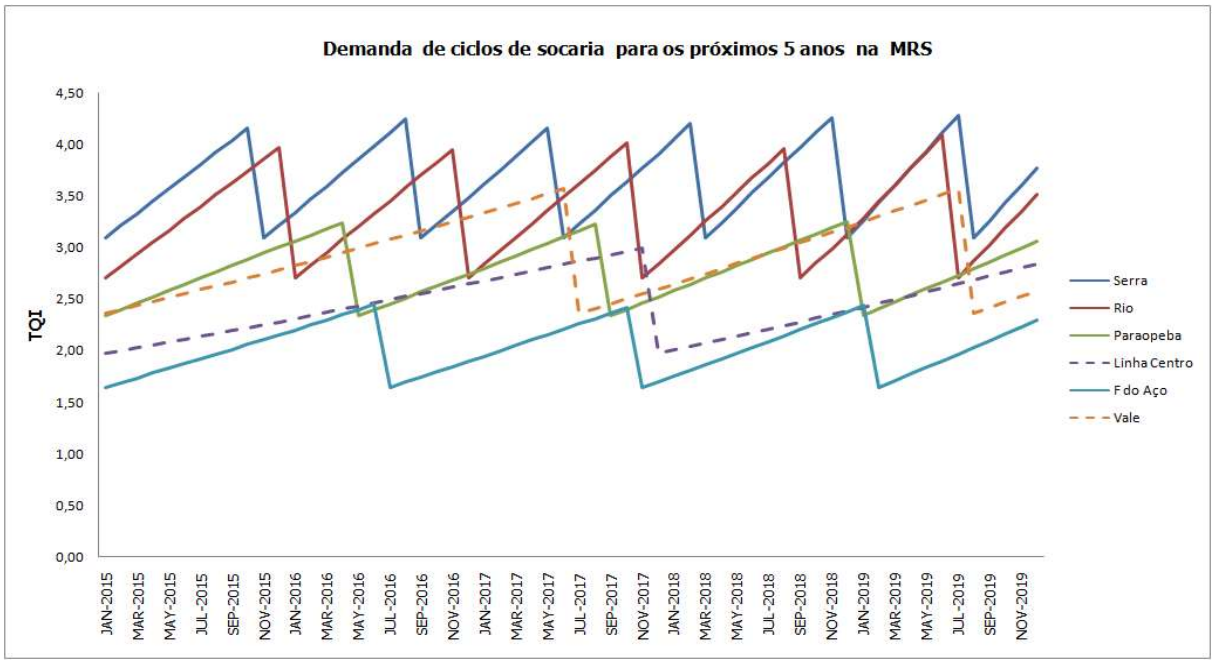


Figura 35 – Ciclos de Socaria Projetados para a MRS

Utilizando o modelo e as premissas de transporte para os próximos anos, os ciclos de manutenção poderiam ser reduzidos para apenas oito meses na região da Serra do Mar e Rio de Janeiro, o que seria extremamente desaconselhável na prática devido a inviabilidade técnica de se realizar socaria em ciclos tão curtos, assim como inviabilidade logística para execução de atividades de manutenção nesse nível no local. Nas demais localidades os ciclos ainda se manteriam em patamares aceitáveis do ponto de vista da manutenção.

Por fim, é importante observar que nenhum dos modelos utilizados atingiu um R^2 igual ou superior a 0,8, porém, tendo o conhecimento desse erro existente e da ausência de alternativa para realização desse tipo de trabalho, podemos considerar como satisfatórios os resultados obtidos.

4.2.2. AVALIAÇÃO DO MODELO DE ALOCAÇÃO DE MÁQUINAS

Para avaliar os resultados apresentados pelo modelo de alocação de máquinas é importante entender que a correção geométrica está atrelada a uma sequência de atividades que são necessárias para sua execução, como é normal em qualquer atividade de manutenção.

No caso da correção geométrica, sua execução é dependente da realização de atividades antecessoras como a descarga de lastro, disponibilidade de reguladoras e substituição de dormentes nos casos em que for aplicável.

Tendo isso em mente podemos comparar os resultados obtidos com os realizados e projetados pelo departamento de Planejamento e Controle da Manutenção.

Para o ano de 2016 foi orçado pelo Departamento de Planejamento e Controle de Manutenção 871 km de correção geométrica. Devido ao cenário de indisponibilidade de algumas das máquinas o número foi revisto para 818 km.

Comparando esses números com os valores obtidos com o modelo de alocação de máquinas temos os seguintes resultados:

Tabela 19 – Diferença em Km entre modelo x real

	Orçado km	***Premissa 2016 km***
Cenário 1	339	399
Cenário 2	36	96

Fonte: O Autor, 2016

O modelo aponta uma produção superior em todos os casos, sendo identificada a maior diferença entre o Cenário1 x Premissa 2016.

As diferenças encontradas entre o Cenário1 e o Real podem ser consideradas excessivas, porém os modelos utilizados para se obter o resultado da tabela 19 possuem diferenças consideráveis que podem tornar difícil uma comparação entre ambos.

O modelo utilizado pelo PCM considera todo o seqüenciamento de atividades necessárias para a realização da correção geométrica como descarga de lastro, disponibilidade de reguladoras e aplicação de dormentes nos casos em que ocorrer. Além disso, o modelo do departamento de planejamento de manutenção não possui algoritmo ou heurística de otimização para suas atividades.

No entanto, apesar das diferenças e assumindo que o cenário real atual se aproxima muito mais do cenário1, podemos dizer que os resultados encontrados estão dentro do esperado, já que não houve nenhuma discrepância que possa ser considerada absurda nas comparações.

Analisando os resultados do modelo, também é possível identificar que as restrições de deslocamento das equipes possuem grande impacto sobre a produção das máquinas. Identificado esse problema, foi simulado um cenário sem essa restrição, no qual foram alcançados os seguintes resultados:

Tabela 20 – Atendimento trechos atendidos sem restrição de deslocamento das equipes

Trecho	Demanda	Demanda não atendida
Ferrovia do Aço - Norte	73,2	0
P2-06 a P2-14	114	0
P1 - 07 a P2 - 06	232,8	0
Ilídio_Mario Castilho	51,6	0
Murtinho_Caetano Lopes	25,2	0
Jeceaba_Ibirité	129,6	0
Dias Tavares- Carandaí	164,4	0
Aristides - Dias Tavares	91,5	0
PINHEIRAL	115,2	0
VALE PARAIBA	156	0
BRISAMAR	79,2	0

Fonte: O Autor, 2016

Tabela 21 – Utilização das semanas sem restrição de deslocamento das equipes

	Semanas utilizadas 1º tri	Semanas Disponíveis 1º tri	Semanas utilizadas abr-dez	Semanas disponíveis abr-dez
S-13	8,7	8,7	36,5	36,5
S-06	8,7	8,7	36,5	36,5
S-07	8,7	8,7	0,0	36,5
S-08	8,7	8,7	26,5	36,5
S-09	8,7	8,7	36,5	36,5
S-10	8,7	8,7	36,5	36,5
S-12	8,7	8,7	36,5	36,5
S-05	8,7	8,7	0,0	36,5
S-26	8,7	8,7	36,5	36,5
S-27	8,7	8,7	36,5	36,5

Fonte: O Autor, 2016

Com a eliminação da restrição de deslocamento das equipes é possível atender a demanda em qualquer cenário previsto com expressiva sobra de capacidade. Pode ser observado na tabela 21 que nesse novo cenário as máquinas S-05, S-07 não serão utilizadas a partir de abril e que a máquina S-08 terá 10 semanas de ociosidade ao longo do período compreendido entre abril e dezembro.

Esse resultado pode ser considerado uma importante saída do modelo, já que a restrição de deslocamento de equipes é uma decisão gerencial, pois não há inviabilidade ou risco técnico em tomá-la. Sendo assim, em um cenário de alta da demanda ou

indisponibilidade dos equipamentos a mesma poderá ser considerada como uma possível saída.

4.2.3. AVALIAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE EXCEÇÕES

Os resultados obtidos através da análise TQI x Defeitos de Geometria indicam que uma via com elevado desvio padrão do nivelamento longitudinal tende a apresentar maior probabilidade de surgimento de outros tipos de defeitos de geometria.

Esse resultado se mostra consistente com a teoria de degradação de superestrutura e reforça a idéia de que manter uma via em boas condições pode resultar em redução dos custos de manutenção associados.

Além disso, em outros trabalhos realizados pelo autor que não serão abordados nesta monografia, também foi identificada a relação do indicador de qualidade da via com o aumento do número de fraturas e redução da eficiência energética devido a perdas provocadas na suspensão secundária dos veículos ferroviários que tem sua origem nas imperfeições da via.

Tendo sido modeladas as distribuições estatísticas das taxas de recuperação e degradação, probabilidades de falha, custos associados a determinado estágio de degradação e custos associados aos reparos, é possível estabelecer uma política ótima de manutenção do ponto de vista econômico a partir de um modelo Markoviano.

As informações disponíveis neste trabalho ainda são insuficientes para tal abordagem do problema, porém esse deve ser o objetivo final de um trabalho que tenha como alvo estabelecer uma política ótima no gerenciamento de manutenção da via permanente.

5. CONCLUSÕES E RECOMEDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Ao realizar o trabalho em modelagem da degradação da superestrutura ferroviária e otimização por programação linear na alocação de recursos foram estabelecidas as seguintes conclusões:

1) Para a empresa objeto deste estudo, uma das saídas propostas foi avaliar a possibilidade de realizar uma intervenção de grande porte na região do Rio de Janeiro, especialmente na Serra do Mar, pois estes locais já se encontram em elevado estágio de degradação e devido ao alto volume de transporte neste trecho

não há possibilidade de se restabelecer uma condição aceitável para a via permanente apenas com realização de correção geométrica.

2) Após avaliações realizadas por consultorias técnicas externas no trecho onde foi recomendada atuação diferenciada, foi constatado que de fato havia essa necessidade. Atualmente o projeto se encontra em andamento na empresa.
3) O modelo utilizado para alocação de máquinas não deve ser utilizado para programação das mesmas, pois não possui visão do seqüenciamento de atividades e pela mudança freqüente que ocorre no curto prazo de todas as variáveis envolvidas no processo. Essas mudanças podem modificar fortemente a decisão a ser tomada.
4) O modelo de alocação poderá ser utilizado como sugestão de longo prazo. Durante o ano deve ser evitado o deslocamento excessivo dos equipamentos ao longo da malha, pois estes resultam em perdas de produção e redução da utilização dos mesmos. Neste sentido, o modelo propõe uma sugestão de alocação dos recursos a qual deve ser buscada no longo prazo.
5) O modelo utilizado pelo departamento de PCM para orçamento deve sofrer adaptações para que seja possível modelar a incerteza das variáveis envolvidas no processo, assim como otimizar a alocação de recursos.
6) Manter a via em elevado estágio de degradação pode resultar em altos custos operacionais. A baixa qualidade da geometria pode impactar outra variável como consumo de combustível e fratura de trilhos o que pode tornar inviável economicamente um cenário de elevada deterioração.
7) As características dos componentes da superestrutura ferroviária, detalhadas ao longo do capítulo 2 influenciam os resultados obtidos pelo modelo de degradação, por isso é essencial sua compreensão. Porém, devido à complexidade de sua modelagem e ausência de tempo e recurso para tal, a aproximação por um modelo baseado apenas na geometria de via se mostrou uma opção viável e com resultados satisfatórios conforme apresentado no capítulo 4.
8) Este trabalho propõe uma mudança na abordagem da gestão da manutenção, migrando de um conceito corretivo para um modelo que objetiva a minimização dos custos operacionais dentro de uma visão holística do negócio.
9) Para trabalhos futuros recomendasse a modelagem do processo através de uma cadeia de Markov para determinação da política ótima de manutenção.

6. REFERÊNCIAS

BRINA, H. L. **Estradas de Ferro 1 – Via Permanente**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2 ed, 1979.

MAGALHÃES, P. C. B. **Programa de capacitação em geometria de linha: Ênfase em segurança e comodidade**. Juiz de Fora: MRS Logística S.A., 2007.

PORTO, T. G. **PTR 2501 – FERROVIAS.** São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 2004.

ESVELD, C. **Modern Railway Track**. Zaltbommel: Editora MRT Productions, 2ª ed, MRT-Productions, 2001

MIGUEL, Paulo Augusto Cauchick et al. (Org**). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

TAHA, Hamdy A. (2013). **Pesquisa operacional**. 2ª ed. São Paulo: Person Prendice Hall.

HILLIER, Frederick S. e LIEBERMAN, Gerald J. (2013). **Introdução à Pesquisa Operacional**, 8ª ed. São Paulo: McGraw-Hill

MARCH, L.D. Reformulação do Planejamento da Manutenção das Socadoras da MRS Logística Baseada em MCC. Monografia apresentada ao curso de especialização em Transporte Ferroviário de Carga do Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em < http://transportes.ime.eb.br/via_perman.html>. Acesso em 03 out 2010

KHOUY, Iman Arasteh. **Cost-Effective maintenance of railway track geometry:** A Shift from Safety Limits to Maintenance Limits. Tese (Doutorado em Engenharia de Operação e Manutenção).2013.144f.Universidade de Tecnologia de Luleå, Luleå.2013.

BERAWI, Abdur Rohim Boy. **Improving track maintenance using power spectrum density (PSD)**. Tese (Doutorado em Sistemas de Transportes). 2013.260 f. Universidade do Porto, Porto, 2013.

INDRARATNA, B.; SALIM, W.; RUJIKIATKAMJORN, C. In: **Advanced Rail Geotechnology Ballasted Track**. Taylor & Francis Group, London, UK, 2011.

SELIG, E. T., WATERS, J. M. **Track Geotechnology and Substructures Management**. Thomas Telford Services Ltd., Londres, 1994. 446 pp.

CALLA, Chaithanya. **Two layered ballast system for improved performance of railway track.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). 2003. 322 f. Universidade de Coventry, Conventry, 2003.

FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. **Track Safety Standards Compliance Manual.** USA: Office of Safety Assurance and Compliance Track and Structures Division, 2007, 155p.

GONG, Cencen. **The Interaction Between Railway Vehicle Dynamics And Track Lateral Alignment.** Tese (Doutorado em Engenharia Ferroviária). 2013. 204 f. Universidade de Huddersfield, Huddersfield, 2013.

PRESCOTT, D. Investigating railway track asset management using a Markov analysis**. Journal of Rail and rapid Transit,** Nottingham, v.229, n.4, p.402 – 416, Outubro. 2013.

7. ANEXO 1 – TABELA 5: – VETOR DAS RESTRIÇÕES DO MODELO

Max ∑Cij*Sij

Cij sendo constantes de produção máxima por trecho.

Sujeito a:

Tabela 5: – Restrição de produção máxima por trecho

	∑Si1	∑Si2	∑Si3	∑Si4	∑Si5	∑Si6	∑Si7	∑Si8	∑Si9	∑Si10	∑Si11
↓	Ferrovia do Aço - Norte	P2-06 a P2-14	P1 - 07 a P2 - 06	Ilídio_Mario Castilho	Murtinho_Caetano Lopes	Jeceaba_Ibirité	Dias Tavares-Carandaí	Aristides - Dias Tavares	PINHEIRAL	VALE PARAIBA	BRISAMAR
Grupos / Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
S-13	148,4*(S-13 - 1)	197,8*(S-13 - 2)	98,9*(S-13 - 3)	0*(S-13 - 4)	0*(S-13 - 5)	0*(S-13 - 6)	0*(S-13 - 7)	0*(S-13 - 8)	0*(S-13 - 9)	0*(S-13 - 10)	0*(S-13 - 11)
S-06	45,7*(S-06 - 1)	60,9*(S-06 - 2)	30,5*(S-06 - 3)	22,8*(S-06 - 4)	34,3*(S-06 - 5)	57,1*(S-06 - 6)	22,8*(S-06 - 7)	22,8*(S-06 - 8)	0*(S-06 - 9)	0*(S-06 - 10)	0*(S-06 - 11)
S-07	0*(S-07 - 1)	53,6*(S-07 - 2)	0*(S-07 - 3)	0*(S-07 - 4)	0*(S-07 - 5)	0*(S-07 - 6)	0*(S-07 - 7)	20,1*(S-07 - 8)	201,2*(S-07 - 9)	40,2*(S-07 - 10)	201,2*(S-07 - 11)
S-08	50,2*(S-08 - 1)	0*(S-08 - 2)	0*(S-08 - 3)	0*(S-08 - 4)	0*(S-08 - 5)	62,8*(S-08 - 6)	0*(S-08 - 7)	0*(S-08 - 8)	0*(S-08 - 9)	0*(S-08 - 10)	0*(S-08 - 11)
S-09	0*(S-09 - 1)	0*(S-09 - 2)	0*(S-09 - 3)	0*(S-09 - 4)	0*(S-09 - 5)	0*(S-09 - 6)	0*(S-09 - 7)	28,7*(S-09 - 8)	287,1*(S-09 - 9)	57,4*(S-09 - 10)	287,1*(S-09 - 11)
S-10	0*(S-10 - 1)	0*(S-10 - 2)	0*(S-10 - 3)	0*(S-10 - 4)	0*(S-10 - 5)	0*(S-10 - 6)	0*(S-10 - 7)	31,5*(S-10 - 8)	315,5*(S-10 - 9)	63,1*(S-10 - 10)	315,5*(S-10 - 11)
S-12	58,3*(S-12 - 1)	77,8*(S-12 - 2)	38,9*(S-12 - 3)	29,2*(S-12 - 4)	43,8*(S-12 - 5)	72,9*(S-12 - 6)	29,2*(S-12 - 7)	29,2*(S-12 - 8)	0*(S-12 - 9)	0*(S-12 - 10)	0*(S-12 - 11)
S-05	0*(S-05 - 1)	0*(S-05 - 2)	0*(S-05 - 3)	0*(S-05 - 4)	0*(S-05 - 5)	0*(S-05 - 6)	0*(S-05 - 7)	21,3*(S-05 - 8)	213,5*(S-05 - 9)	42,7*(S-05 - 10)	213,5*(S-05 - 11)
S-26	0*(S-26 - 1)	126,9*(S-26 - 2)	0*(S-26 - 3)	0*(S-26 - 4)	0*(S-26 - 5)	0*(S-26 - 6)	0*(S-26 - 7)	47,6*(S-26 - 8)	476*(S-26 - 9)	95,2*(S-26 - 10)	476*(S-26 - 11)
S-27	78,6*(S-27 - 1)	104,7*(S-27 - 2)	52,4*(S-27 - 3)	39,3*(S-27 - 4)	0*(S-27 - 5)	0*(S-27 - 6)	39,3*(S-27 - 7)	39,3*(S-27 - 8)	0*(S-27 - 9)	0*(S-27 - 10)	0*(S-27 - 11)

	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA	IA
	Ferrovia do Aço - Norte	P2-06 a P2-14	P1 - 07 a P2 - 06	Ilídio_Mario Castilho	Murtinho_Caetano Lopes	Jeceaba_Ibirité	Dias Tavares-Carandaí	Aristides - Dias Tavares	PINHEIRAL	VALE PARAIBA	BRISAMAR
	73,2	114,0	217,4	51,6	25,2	129,6	164,4	91,5	115,2	156,0	79,2

Tabela 5: – Restrição de capacidade ou tempo em semanas no ano

	Ferrovia do Aço - Norte	P2-06 a P2-14	P1 - 07 a P2 - 06	Ilídio_Mario Castilho	Murtinho_Caetano Lopes	Jeceaba_Ibirité	Dias Tavares-Carandaí	Aristides - Dias Tavares	PINHEIRAL	VALE PARAIBA	BRISAMAR			
Grupos / Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
S-13	(S-13 - 1)	(S-13 - 2)	(S-13 - 3)	(S-13 - 4)	(S-13 - 5)	(S-13 - 6)	(S-13 - 7)	(S-13 - 8)	(S-13 - 9)	(S-13 - 10)	(S-13 - 11)	∑S1j	≤	1
S-06	(S-06 - 1)	(S-06 - 2)	(S-06 - 3)	(S-06 - 4)	(S-06 - 5)	(S-06 - 6)	(S-06 - 7)	(S-06 - 8)	(S-06 - 9)	(S-06 - 10)	(S-06 - 11)	∑S2j	≤	1
S-07	(S-07 - 1)	(S-07 - 2)	(S-07 - 3)	(S-07 - 4)	(S-07 - 5)	(S-07 - 6)	(S-07 - 7)	(S-07 - 8)	(S-07 - 9)	(S-07 - 10)	(S-07 - 11)	∑S3j	≤	1
S-08	(S-08 - 1)	(S-08 - 2)	(S-08 - 3)	(S-08 - 4)	(S-08 - 5)	(S-08 - 6)	(S-08 - 7)	(S-08 - 8)	(S-08 - 9)	(S-08 - 10)	(S-08 - 11)	∑S4j	≤	1
S-09	(S-09 - 1)	(S-09 - 2)	(S-09 - 3)	(S-09 - 4)	(S-09 - 5)	(S-09 - 6)	(S-09 - 7)	(S-09 - 8)	(S-09 - 9)	(S-09 - 10)	(S-09 - 11)	∑S5j	≤	1
S-10	(S-10 - 1)	(S-10 - 2)	(S-10 - 3)	(S-10 - 4)	(S-10 - 5)	(S-10 - 6)	(S-10 - 7)	(S-10 - 8)	(S-10 - 9)	(S-10 - 10)	(S-10 - 11)	∑S6j	≤	1
S-12	(S-12 - 1)	(S-12 - 2)	(S-12 - 3)	(S-12 - 4)	(S-12 - 5)	(S-12 - 6)	(S-12 - 7)	(S-12 - 8)	(S-12 - 9)	(S-12 - 10)	(S-12 - 11)	∑S7j	≤	1
S-05	(S-05 - 1)	(S-05 - 2)	(S-05 - 3)	(S-05 - 4)	(S-05 - 5)	(S-05 - 6)	(S-05 - 7)	(S-05 - 8)	(S-05 - 9)	(S-05 - 10)	(S-05 - 11)	∑S8j	≤	1
S-26	(S-26 - 1)	(S-26 - 2)	(S-26 - 3)	(S-26 - 4)	(S-26 - 5)	(S-26 - 6)	(S-26 - 7)	(S-26 - 8)	(S-26 - 9)	(S-26 - 10)	(S-26 - 11)	∑S9j	≤	1
S-27	(S-27 - 1)	(S-27 - 2)	(S-27 - 3)	(S-27 - 4)	(S-27 - 5)	(S-27 - 6)	(S-27 - 7)	(S-27 - 8)	(S-27 - 9)	(S-27 - 10)	(S-27 - 11)	∑S10j	≤	1

8. ANEXO 2 – TABELA 6: – MATRIZ DOS COEFICIENTES TECNOLÓGICOS

				Ferrovia do Aço - Norte	P2-06 a P2-14	P1 - 07 a P2 - 06	Ilídio_Mario Castilho	Murtinho_Caetano Lopes	Jeceaba_Ibirité	Dias Tavares-Carandaí	Aristides - Dias Tavares	PINHEIRAL	VALE PARAIBA	BRISAMAR
Central	Mk Cativa	Máquina Indisp	Grupos / Trecho	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CG1			S-13	148,4	197,8	98,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CG1			S-06	45,7	60,9	30,5	22,8	34,3	57,1	22,8	22,8	0,0	0,0	0,0
CG2			S-07	0,0	53,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,1	201,2	40,2	201,2
CG1			S-08	50,2	0,0	0,0	0,0	0,0	62,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CG2			S-09	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	28,7	287,1	57,4	287,1
CG2			S-10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	31,5	315,5	63,1	315,5
CG1			S-12	58,3	77,8	38,9	29,2	43,8	72,9	29,2	29,2	0,0	0,0	0,0
CG2			S-05	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	21,3	213,5	42,7	213,5
CG2			S-26	0,0	126,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	47,6	476,0	95,2	476,0
CG1			S-27	78,6	104,7	52,4	39,3	0,0	0,0	39,3	39,3	0,0	0,0	0,0

9. ANEXO 3 – TERMO DE AUTENTICIDADE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA

Termo de Declaração de Autenticidade de Autoria

Declaro, sob as penas da lei e para os devidos fins, junto à Universidade Federal de Juiz de Fora, que meu Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Graduação em Engenharia de Produção é original, de minha única e exclusiva autoria. E não se trata de cópia integral ou parcial de textos e trabalhos de autoria de outrem, seja em formato de papel, eletrônico, digital, áudio-visual ou qualquer outro meio.
Declaro ainda ter total conhecimento e compreensão do que é considerado plágio, não apenas a cópia integral do trabalho, mas também de parte dele, inclusive de artigos e/ou parágrafos, sem citação do autor ou de sua fonte.
Declaro, por fim, ter total conhecimento e compreensão das punições decorrentes da prática de plágio, através das sanções civis previstas na lei do direito autoral[1] e criminais previstas no Código Penal[2], além das cominações administrativas e acadêmicas que poderão resultar em reprovação no Trabalho de Conclusão de Curso.

Juiz de Fora, _____ de _____ de 20____.

_____	_____
NOME LEGÍVEL DO ALUNO (A)	Matrícula
_____	_____
ASSINATURA	CPF

[1] LEI N° 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998. Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.
[2] Art. 184. Violar direitos de autor e os que lhe são conexos: Pena – detenção, de 3 (três) meses a 1 (um) ano, ou multa.

10. ANEXO 4 – DECLARAÇÃO DA EMPRESA

Declaro para os devidos fins, que RAPHAEL DAMASCENO MAROTTA, funcionário da empresa MRS LOGÍSTICA S.A. possui autorização para divulgar o nome da empresa bem como dados não confidenciais na elaboração de seu trabalho de conclusão de curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Juiz de Fora, 19 de julho de 2016.

_____

Paulo Ferreira Gonzaga