WILLIAM HONG

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DE RISCO AO ESTUDO DO
DESCARRILAMENTO**

São Paulo
2011

WILLIAM HONG

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ANÁLISE DE RISCO AO ESTUDO DO
DESCARRILAMENTO**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica de Projeto de
Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Francisco
Martha de Souza

São Paulo
2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 25 de maio de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Hong, William

**Aplicação do método de análise de risco ao estudo do des -
carrilamento / W. Hong. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.
174 p.**

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de
Sistemas Mecânicos.**

**1. Análise de risco 2. Dinâmica veicular 3. Ferrovias (Eficiên-
cia) 4. Material rodante (Confiabilidade) I. Universidade de São
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Meca-
trônica e de Sistemas Mecânicos II. t.**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmã pelo apoio e dedicação que sempre tiveram durante minha vida, me ajudando em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza pela confiança depositada ao longo do trabalho e pela orientação acadêmica.

À Escola Politécnica da USP pela oportunidade de obtenção do título de mestre.

À Débora por todo o companheirismo.

Aos engenheiros Alexandre Facini e Fernando Guevara pelo apoio e incentivo neste projeto.

A todos os meus amigos que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

RESUMO

Este trabalho propõe um método de análise de risco aplicada ao descarrilamento (incidente no qual a roda perde a sustentação provida pelo trilho, podendo ser causado por diversos aspectos como imperfeições na via, falhas no material rodante, obstáculos na via, entre outras que pode acarretar possíveis acidentes e perdas materiais e humanas) de forma a tornar mais seguro o transporte ferroviário, que atualmente não apresenta diminuição da taxa de ocorrência dos descarrilamentos, complementando assim as simulações computacionais e simulações dinâmicas que podem ser aplicadas ao estudo deste evento.

Risco pode ser definido como o potencial de perda resultante da exposição a um perigo, sendo relacionado à probabilidade de ocorrência de um evento ou combinação de eventos acarretando em um perigo e a consequência deste perigo. Este conceito pode ser utilizado para investigar e avaliar as incertezas associadas com um evento. Já Confiabilidade pode ser definida como a probabilidade de um item executar a sua função sob condições pré-definidas de uso e manutenção por um período de tempo específico.

Assim, considerando estes dois conceitos, será apresentada uma metodologia de análise de risco e confiabilidade para análise e discussão do descarrilamento, discorrendo sobre os possíveis parâmetros que podem causar este evento bem como propondo uma alternativa para avaliação da probabilidade de ocorrência do descarrilamento; desta forma permite guiar o gerenciamento da segurança quanto a este evento já que no Brasil não existe a figura da autoridade ferroviária, órgão máximo e responsável final pela regulamentação para a operação de um sistema ferroviário, que poderia determinar o processo que deve ser seguido para a garantia de segurança.

Os objetos de estudo serão veículos ferroviários e conseqüentemente os elementos de interface com este tipo de veículo, como por exemplo, os elementos de via.

Palavras-chave: análise de risco, confiabilidade, descarrilamento, veículo ferroviário.

ABSTRACT

This research proposes a risk analysis method applied to derailment event (characterized by the wheel overlap on the rail, which can be caused by many aspects: rail imperfections, rolling stock failures, obstacles etc and which can cause accidents, material and life loss) to increase the safety level on railway transport that actually does not present decrease of derailment rate. This method also complements computational and dynamic simulations, which can be applied to this event.

Risk can be defined as the potential loss due to a hazard exposure, also related with the probability of occurrence of an event or combinations of events leading to a hazard and the consequence of this hazard. This concept can be applied to investigate and to evaluate the uncertainties related with this event. Reliability can be defined as the probability of an item to perform its function under predefined use and maintenance conditions during a specific period of time.

Thus, considering these two concepts, it will be presented a risk and reliability analysis to study the derailment event, discoursing about the possible parameters that can cause this event and proposing alternatives to evaluate the derailment occurrence probability in order to guide safety management since a railway authority does not exist in Brazil (body with the overall accountability to a regulator for operation a railway system, that could determines the process to be followed to assure safety levels).

This research will cover railway vehicles and consequently the interface, for example, the railroad elements.

Keywords: risk analysis, reliability, derailment, railroad vehicle.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Exemplo de Planilha de FMEA (Adaptado de MIL-STD-1629-A, 1984) ...	8
Figura 2.2 - Porta lógica OU.....	9
Figura 2.3 - Porta lógica E.....	9
Figura 2.4 - Evento não desenvolvido	9
Figura 2.5 - Evento básico	10
Figura 2.6 - Exemplo de comportamento da taxa de falha de um subsistema com componentes substituídos na ocorrência de falha (Adaptada de NPRD-95, 1995)...	10
Figura 2.7 - Fluxograma do Método Probabilístico Condicionado Avançado ¹	17
Figura 2.8 - Exemplo de diagrama de causa e consequência.....	23
Figura 3.1 - Elementos de Via Permanente (SILVA, 2004)	31
Figura 3.2 - Segregação no trilho (COLPAERT, 1959)	32
Figura 3.3 - Talas de Junção (M.I.M.F, 2009)	34
Figura 3.4 - Placa de apoio (BRINA, 1988)	35
Figura 3.5 - Tirefonadora (LAUERMAN, 2008 apud ALL, 2002)	36
Figura 3.6 - Exemplo de Aparelho de Mudança de Via	37
Figura 3.7 - Aparelho de Mudança de Via (LAUERMAN, 2008 apud ALL, 2002).....	37
Figura 3.8 - Modelo para Inscrição Limite (BRINA, 1988)	42
Figura 3.9 - Modelo do Avanço do Friso (Adaptado de BRINA, 1988)	42
Figura 3.10 - Modelo para Inscrição Livre (BRINA, 1988)	44
Figura 3.11 - Modelo para Determinação de Superelevação Máxima (BRINA, 1988)	45
Figura 3.12 - Sistema de Guiagem de Veículos (BARBOSA, 1999)	49
Figura 3.13 - Truque (Adaptada de ALMEIDA, 2006)	50
Figura 3.14 - Truque (Adaptada de PIRES, 2006)	50
Figura 3.15 - Suspensão Primária de Mola e Elastômero (CONSOLI, 2007).....	51
Figura 3.16 - Suspensão secundária (Adaptado de CONSOLI, 2007 apud ANDERSON, 1992).....	52
Figura 3.17 - Rodeiro (PIRES, 2006)	53
Figura 3.18 - Engate Instalado no Trem.....	55
Figura 3.19 - Diagrama Funcional de um Trem de Passageiros (FACINI, 2007)	57

Figura 4.1 - Comportamento da taxa de acidentes dos trens em termos de quilometragem (Adaptado de RAILWAY SAFETY STATISTICS, 2005)	61
Figura 4.2 - Comportamento da taxa de acidentes dos trens em termos de passageiros transportados (Adaptado de RAILWAY SAFETY STATISTICS, 2005).....	61
Figura 4.3 - Causas Sucintas do Descarrilamento em 2005 (<i>RAILWAY SAFETY STATISTICS</i> , 2005)	65
Figura 4.4 - FTA de Descarrilamento	66
Figura 4.5 - Forças de Contato Para o Critério de Nadal (IWNICKY, 2006).....	71
Figura 4.6 - Exemplo de Curva do Efeito do Ângulo de Ataque no limite da relação L/V (IWNICKY, 2006)	71
Figura 4.7 - Referências Móveis e Fixas e Vetores de Força (BARBOSA, 2004)	73
Figura 4.8 - Forças na Rotação do Trilho (IWNICKY, 2006)	74
Figura 4.9 - Exemplo de Falso Contato entre Roda e Trilho (IWNICKY, 2006).....	75
Figura 4.10 - Parâmetros Considerados na Equação (4.10) (IWNICKY, 2006)	75
Figura 4.11 - Aumento da Dimensão da Bitola (IWNICKY, 2006)	76
Figura 4.12 - Instabilidade Lateral do Veículo (ALMEIDA, 2006)	77
Figura 5.1: Método Proposto.....	80
Figura 6.1 - Diagrama Causa Conseqüência – Descarrilamento	84
Figura 6.2 - FTA - Falha dos Elementos de Via	86
Figura 6.3 - FTA - Falha do Truque.....	97
Figura 6.4 - FTA – Falha no Acoplamento	104
Figura 6.5 - FTA – Falha do Sistema de Tração e Frenagem	110
Figura 7.1 - Princípio do Lubrificador de Flange de Roda (REBS, 2009)	124
Figura 7.2 - Princípio de Funcionamento do Sistema de Lubrificação de Flange (REBS, 2009)	124
Figura 7.3 – Limpa-trilhos (CPTM, 2010)	126
Figura 7.4 - Contratrilho (IWNICK, 2006)	127
Figura 7.5 - Fluxograma de Monitoramento	137
Figura (A-1) - Parâmetros do perfil da roda definidos em norma (UIC 510 – 2, 2004)	160
Figura (B-1) - Valores Limite das dimensões Eixo-furo (UIC 813 O, 2003).....	161
Figura (C-1) - Fluxograma Geral de Aprovação de um Veículo ferroviário Quanto aos Testes (UIC 518 OR, 2005).....	162
Figura (D-1) - Trilho com regiões descarbonetadas (COLPAERT, 1959)	163

Figura (D-2) - Trilho com segregação, bolhas e fissura interna (COLPAERT, 1959)	163
Figura (D-3) - Trilho com segregação e fissura (COLPAERT, 1959)	164
Figura (D-4) - Trilho fissurado devido a trincas de fadiga (COLPAERT, 1959)	164
Figura (D-5) - Tirefão com segregação (COLPAERT, 1959)	165
Figura (D-6) - Tirefão com segregação (COLPAERT, 1959)	165
Figura (E-1) - Campos da referência (FMD, 1997)	166
Figura (E-2) - Falhas referentes à roda (FMD-97, 1997)	166
Figura (E-3) - Falhas referentes ao eixo (FMD-97, 1997)	167
Figura (E-4) - Falhas referentes à mola (FMD-97, 1997)	168
Figura (E-5) - Falhas referentes ao redutor (FMD-97, 1997)	168
Figura (E-6) - Falhas referentes às sapatas de freio (FMD-97, 1997)	169
Figura (E-7) - Falhas referentes às sapatas de freio (FMD-97, 1997)	169
Figura (E-8) - Falhas referentes ao cilindro de freio e ao mecanismo (FMD-97, 1997)	170
Figura (E-9) - Falhas referentes ao trilho (FMD-97, 1997)	170
Figura (E-10) - Falhas referentes às talas de junção e fixações (FMD-97, 1997)	171
Figura (F-1) - Perfil de Roda UIC-ERRI para roda com diâmetro entre 1000 mm e 760 mm e altura de flange igual a 28 mm (UIC 510 – 2 OR, 2004)	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Evolução do Transporte Regular Metropolitano	1
Tabela 1.2 - Principais Investimentos das Concessionárias	2
Tabela 2.1 - Níveis de Severidade	7
Tabela 2.2 - Variáveis Básicas e suas Funções Densidade de Probabilidade	20
Tabela 2.3 - Índices de Confiabilidade Obtidos na Validação do Código Computacional	21
Tabela 2.4: Nível de Integridade de Segurança	24
Tabela 2.5 - Frequência de Ocorrência do Evento	25
Tabela 2.6 - Matriz de Risco.....	26
Tabela 2.7 - Ações a serem realizadas para cada categoria de risco	26
Tabela 2.8 - Tabela de Multiplicadores para a Taxa de Falha.....	27
Tabela 2.9 - Exemplos de Testes de Aceitação	29
Tabela 3.1 - Tabela para Substituição e Inversão dos Trilhos.....	34
Tabela 3.2 - Comparativo entre Tipos de Dormentes.....	38
Tabela 4.1 - Taxa de Acidentes dos Trens.....	59
Tabela 4.2 - Sumário Histórico de Acidentes/Incidentes	60
Tabela 4.3 - Causas do Descarrilamento em 2005	62
Tabela 4.4 - Causas Sucintas do Descarrilamento em 2005	65
Tabela 4.5 - Índice de Acidentes no Transporte de Carga	67
Tabela 4.6 - Distribuição de Acidentes de acordo com os Critérios de Descarrilamento	69
Tabela 6.1 - Elementos de Via - Modos de falha considerados e referências.....	87
Tabela 6.2 - FMEA dos Elementos de Via	89
Tabela 6.3 - Sistema Truque - Modos de falha considerados e referências	98
Tabela 6.4: FMEA Sistema Truque	99
Tabela 6.5 - Sistema Acoplamento - Modos de falha considerados e referências ..	105
Tabela 6.6 - FMEA Sistema de Acoplamento.....	106
Tabela 6.7 - Sistema de Tração e Frenagem - Modos de falha considerados e referências.....	111
Tabela 6.8 - FMEA Sistema de Tração/Frenagem	114
Tabela 7.1 - Valores das variáveis no caso exemplo	140

Tabela 7.2 - Valor das probabilidade de falhas de acordo com diferentes quilometragens.....	142
Tabela 7.3 - Valor do custo anual referente ao risco de descarrilamento	144
Tabela 7.4 - Valores das variáveis na análise de sensibilidade	145
Tabela 7.5 - Custo anual referente ao risco de descarrilamento para diferentes valores de coeficiente de atrito.....	145
Tabela 7.6 - Custo anual referente ao risco de descarrilamento para diferentes valores de média da razão L / V	146
Tabela 7.7 - Custo anual referente ao risco de descarrilamento para diferentes valores de taxa de desgaste.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMV	Aparelho de Mudança de Via
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ASEP	Programa de Avaliação de Seqüências de Acidentes - do inglês <i>Accident Sequence Evaluation Program</i>
ATP	Proteção Automático do Trem – do inglês <i>Automatic Train Protection</i>
CPTM	Companhia Paulista de Trens Metropolitanos
FMEA	Análise de Modos e Efeitos de Falha – do inglês <i>Failure Mode Effects Analysis</i>
FMECA	Análise de Modos e Efeitos de Falha Críticos – do inglês <i>Failure Mode Effects and Critical Analysis</i>
FPMK	Falhas por Milhão de Quilômetros
FPMM	Falhas por Milhão de Milhas
FRA	Administração Federal das Ferrovias – do inglês <i>Federal Railroad Administration</i>
FTA	Análise de Árvore de Falhas – do inglês <i>Fault Tree Analysis</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MTBE	Tempo Médio Entre Eventos - do inglês <i>Mean Time Between Events</i>
MTBF	Tempo Médio Entre Falhas – do ingles <i>Mean Time Between Failures</i>
OAT	Árvore de Ações do Operador – do inglês <i>Operator Action Tree</i>
OHA	Análise de Perigos de Operação – do inglês <i>Operating Hazard Analysis</i>
RCM	Manutenção Centrada em Confiabilidade – do inglês <i>Reliability Centered Maintenance</i>
Sev	Severidade
SIL	Nível de Integridade de Segurança – do inglês <i>Safety Integrity Level</i>
TCMS	Sistema de Controle e Monitoramento do Trem – do inglês <i>Train Control and Monitoring System</i>
THERP	Técnica para a Predição de Taxas de Erros Humanos – do inglês <i>Technique for Human Error Rate Prediction</i>
THR	Taxa tolerável do perigo – do inglês <i>Tolerable Hazard Rate</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Z	Função do estado limite, também chamada de $g(X)$
x_i	Variável básica
X	Conjunto das variáveis $x_1, x_2, \dots, x_n$ que descrevem o processo de colapso em estudo.
X^*	Conjunto das variáveis $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ que descrevem o ponto de linearização
m_z	Valor esperado da função de estado limite Z
m_i	Valor esperado da variável básica x_i
σ_z	Desvio padrão da função de estado limite Z
σ_i	Desvio padrão da variável x_i
P_F	Probabilidade de colapso do sistema
β	Índice de confiabilidade
α_i	Constante de proporcionalidade
$\Phi(x)$	Magnitude da função distribuição acumulada da distribuição normal reduzida, calculada no ponto “ x ”.
$\mu_{x_i}^N$	Média da distribuição normal equivalente em um determinado ponto de linearização
$F_i(X_i^*)$	Magnitude da função distribuição acumulada da variável básica x_i calculada no ponto $x_i = X_i^*$;
$\sigma_{x_i}^N$	Desvio padrão da distribuição normal equivalente em um determinado ponto de linearização
$f_i(X_i^*)$	Magnitude da função densidade de probabilidade da variável básica x_i calculada no ponto $x_i = X_i^*$;
$\phi(a)$	Magnitude da função densidade de probabilidade da distribuição normal reduzida
$g_{\Delta K}(x)$	Função de desempenho para análise da vida em fadiga
q_i	Dimensão inicial da trinca
K_{IC}	Fator de intensificação crítica do material
ΔS	Flutuação de tensão.
N	Número de ciclos de carregamento

C	Parâmetro da Lei de Paris.
ΔK_t	Fator de intensificação de tensões
q	Dimensão da trinca
R	Raio de curva
R_1	Raio determinado pelo trilho interno
R_2	Raio determinado pelo trilho externo
f_1	Folga decorrente do raio R_1 e eixos extremos
f_2	Folga decorrente do raio R_2 e eixos extremos
p	Dimensão da base rígida do veículo
u	Seguimento afetado relativo ao avanço do friso em relação ao aro
m	Altura do friso
D_i	Diâmetro da roda medido até o friso
d_f	Distância entre as faces externas dos frisos
B	Distância entre as faces internas das rodas de um eixo
S_u	Valor da superlargura
j	Jogo da via
f	Folga no trilho com relação ao eixo traseiro
d_1	Deslocamento do centro de gravidade
H	Altura do centro de gravidade em relação aos trilho superior
a	Distância de centro a centro dos trilhos
h_p	Superelevação prática máxima, superelevação prática que não provoca o tombamento do trem
α_1	Ângulo entre a horizontal e o dormente
P	Força Peso
F'	Componente da força peso na direção de F_c
F_c	Força centrífuga
v	Velocidade linear de operação do trem
g	Aceleração da gravidade
M_e	Momento estabilizador
M_r	Momento de reviramento
n	Coeficiente de segurança do tombamento
h_T	Superelevação teórica, superelevação teórica que não provoca o tombamento do trem

γ	Aceleração centrífuga
L	Força lateral do contato
V	Força vertical do contato
F_2	Força de reação tangente a superfície de contato entre Flange e Boleto
F_3	Força de reação normal a superfície de contato entre Flange e Boleto.
δ	Ângulo de contato do flange com o boleto
μ	Coeficiente de atrito entre roda e trilho
ψ	Ângulo entre $\vec{X}$ e $\vec{x}$
α	Ângulo entre o plano de contato da roda com o trilho e o eixo $\vec{Y}$
T	Força de Atrito
T_x	Componente da força T referente ao eixo $\vec{x}$
T_w	Componente da força T referente ao escorregamento rotacional
T_L	Componente da força T referente ao escorregamento lateral
M	Momento torsor
d	Distância horizontal entre o ponto de aplicação da força V e o ponto de rotação do perfil do trilho
h	Distância vertical entre o ponto de aplicação da força L e o ponto de rotação do perfil do trilho
G	Bitola
W	Largura da roda
f_w	Largura do flange
S	Dimensão de segurança
t	Tombamento angular do trilho
Y_r	Valor em milímetros da coordenada horizontal dos pares coordenados que determinam o perfil da roda UIC-ERRI para rodas com diâmetro entre 1000 mm e 760 mm
Z_r	Valor em milímetros da coordenada vertical dos pares coordenados que determinam o perfil da roda UIC-ERRI para rodas com diâmetro entre 1000 mm e 760 mm
D	Distância percorrida pelo material rodante
C_m	Custo referente à perda de material
C_{in}	Custo referente a indenizações
C_{mo}	Custo de manutenção referente a mão de obra

C_{mm}	Custo da manutenção referente a material
C_a	Custo anual do risco
Q	Quilometragem entre manutenções

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 - OBJETIVO	2
1.3 - ESCOPO DO ESTUDO.....	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 - CONFIABILIDADE	4
2.1.1 - INTRODUÇÃO	4
2.1.2 - ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS (FMEA).....	5
2.1.3 - ANÁLISE POR ÁRVORE DE FALHAS (FTA)	8
2.1.4 - ANÁLISE DE CONFIABILIDADE POR SOLICITAÇÃO E RESISTÊNCIA	11
2.1.4.1 - Fundamentos do Método Probabilístico Condicionado	12
2.1.4.2 - Fundamentos do Método Probabilístico Condicionado Avançado	14
2.1.4.3 - Correção Aplicada às Variáveis Básicas.....	18
2.1.4.4 - Código Computacional Baseado no Método Probabilístico Condicionado Avançado	19
2.2 - ANÁLISE DE RISCO.....	22
CAPÍTULO 3 - ELEMENTOS DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO.....	30
3.1 - ELEMENTOS DE VIA PERMANENTE.....	30
3.1.1 - INTRODUÇÃO	30
3.1.2 - TRILHO	31
3.1.3 - TALAS DE JUNÇÃO	34
3.1.4 - ELEMENTOS DE FIXAÇÃO	35
3.1.5 - APARELHOS DE MUDANÇA DE VIA.....	36
3.1.6 - DORMENTES	38
3.1.7 - LASTRO E SUBLASTRO.....	40
3.1.8 - PLATAFORMA.....	40
3.1.9 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS	41
3.1.9.1 - Raio Mínimo	41
3.1.9.2 – Superelevação	45
3.2 - VEÍCULOS FERROVIÁRIOS	48
3.2.1 - INTRODUÇÃO	48

3.2.2 - TRUQUE	50
3.2.3 - ELEMENTOS DE SUSPENSÃO	51
3.2.4 - ESTRUTURA	52
3.2.5 - RODEIRO	53
3.3 - ACOPLAMENTO	55
3.4 - SISTEMA DE TRAÇÃO E FRENAGEM	55
3.5 - OUTROS COMPONENTES DO TREM	57
CAPÍTULO 4 - DESCARRILAMENTO	58
4.1 - CRITÉRIOS DE DESCARRILAMENTO	68
4.1.1 - SOBREPOSIÇÃO DO FLANGE DA RODA SOBRE O TRILHO	69
4.1.2 - DIMENSÃO DO BITOLA E ROTAÇÃO DO TRILHO	73
4.1.3 - DESCARRILAMENTO POR AUMENTO DA DIMENSÃO DA BITOLA	76
4.1.4 - INSTABILIDADE LATERAL DO VEÍCULO	77
CAPÍTULO 5 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO	78
5.1 - INTRODUÇÃO	78
5.2 - MÉTODO	79
CAPÍTULO 6 - APLICAÇÃO DO MÉTODO: CASO-ESTUDO	83
6.1 - ANÁLISE DE CAUSA E CONSEQÜÊNCIA - DESCARRILAMENTO	83
6.2 - ANÁLISES DO TIPO FTA E FMEA	85
6.2.1 - ELEMENTOS DE VIA	85
6.2.2 - COMPONENTES DO TRUQUE	96
6.2.3 - COMPONENTES DO ACOPLAMENTO	104
6.2.4 - COMPONENTES DO SISTEMA DE TRAÇÃO E FRENAGEM	109
6.2.5 - FATORES DIVERSOS	121
CAPÍTULO 7 - AÇÕES DE REDUÇÃO DO RISCO	122
7.1 - AÇÕES PREVENTIVAS E PALIATIVAS DE PROJETO	123
7.1.1 - AÇÕES PREVENTIVAS	123
7.1.1.1 – Lubrificador de flange	123
7.1.1.2 – Determinação da vida útil dos componentes	125
7.1.1.3 – Detector de obstáculo	125
7.1.1.4 – Deflector de obstáculo – limpa-trilhos	126
7.1.1.5 – Projeto que respeita os critérios de descarrilamento	126
7.1.1.6 – Instalação de contratrilhos em curvas acentuadas	127

7.1.1.7 – Otimização da suspensão do truque e resistência do movimento de yaw do truque	127
7.1.1.8 – Inserção de monitoramento do sistema.....	128
7.1.1.9 – Inserção de sistemas de proteção (ATP)	129
7.1.2 - AÇÕES PALIATIVAS	129
7.1.2.1 – Detector de Descarrilamento.....	129
7.2 - AÇÕES PREVENTIVAS DE MANUFATURA.....	129
7.2.1 - FMEA DE PROCESSO.....	130
7.2.2 - INSPEÇÕES DE QUALIDADE.....	130
7.2.3 - CONTROLE DA VARIÁVEL HUMANA	131
7.3 - AÇÕES DE PREVENTIVAS E PALIATIVAS DE OPERAÇÃO.....	131
7.4 - AÇÕES PREVENTIVAS DE MANUTENÇÃO	132
7.4.1 - MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE	132
7.4.1.1 – Manutenção corretiva	134
7.4.1.2 – Manutenção preventiva	134
7.4.1.3 – Monitoramento das condições.....	134
7.4.1.4 – Manutenção pró-ativa.....	135
7.4.1.5 – Políticas de manutenção recomendadas.....	135
7.4.2 - MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DE VIA.....	135
7.4.3 - SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS.....	136
7.5 - ANÁLISE DO BENEFÍCIO	138
7.5.1 - CASO EXEMPLO.....	140
CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	148
8.1 - CONCLUSÕES	148
8.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	150
CAPÍTULO 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	152
APÊNDICE A - EXEMPLO DE PARÂMETROS DIMENSIONAIS DA RODA.....	160
APÊNDICE B - TOLERÂNCIAS DAS DIMENSÕES EIXO-FURO.....	161
APÊNDICE C - APROVAÇÃO DE UM VEÍCULO FERROVIÁRIO QUANTO AOS TESTES	162
APÊNDICE D - HETEROGENEIDADES NO TRILHO E FIXAÇÃO	163
APÊNDICE E - MODOS DE FALHA SEGUNDO FMD-97 (1997)	166
APÊNDICE F - EXEMPLO DE PERFIL DE RODA UIC-ERRI.....	172

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O transporte ferroviário vem se tornando cada vez mais importante e, segundo Almeida (2006), o desenvolvimento de uma ampla malha ferroviária pode permitir a ampliação do transporte de cargas e passageiros e o aumento da capacidade de escoamento da malha de transporte. Porém a crescente demanda do transporte ferroviário exige uma melhor análise da segurança e confiabilidade relacionada com a operação. Esta crescente demanda é indicada, por exemplo, na Tabela 1.1 que mostra um aumento considerável no número de passageiros transportados. Tomando como comparação os anos de 2001 e 2006, o número cresceu de 228,7 para 726,6 milhões de passageiros.

Tabela 1.1 - Evolução do Transporte Regular Metropolitano

EMPRESAS	1992	1997	2001	2002	2003	2004	2005	2006
CBTU	377,9	70,2	84,4	80	89,4	93	97	99,3
TRENSURB	31,9	31,5	39,6	41,3	44,5	48,9	48,3	45,8
SUPERVIA			104,7	114,9	125	125	128,3	139,2
CENTRAL	-	-	-	-	-	0,29	0,31	0,24
METROFOR	-	-	-	4,9	10,4	9,3	9,4	7,7
CPTM				345,4	353,8	368,8	389,6	430,2
CTS	-	-	-	-	-	-	-	4,2
TOTAL	409,8	101,7	228,7	586,5	623,1	645,3	672,9	726,6

Valores em milhões de passageiros

(ANTT, 2007)

O Brasil apresenta um crescimento no investimento no transporte ferroviário, como na infra-estrutura, na aquisição do novo material rodante e outros elementos relacionados tal como expõe a Tabela 1.2 obtida dos estudos da ANTT (2007).

Tabela 1.2 - Principais Investimentos das Concessionárias

CATEGORIA	1997	2001	2002	2003	2004	2005	2006
MATERIAL RODANTE	113	243,3	261,7	604,5	1.222,00	2.012,00	1.039,80
INFRA-ESTRUTURA	15,5	122,9	48,6	61	73	185,2	362,4
SUPERESTRUTURA	64,3	328,8	173,5	184,3	364,3	679,3	674,4
COMUNICAÇÃO E SINALIZAÇÃO	10,4	41,8	49,9	66,1	37,8	56,6	74
OUTROS	149,8	73,6	92	156,2	192,5	259	308,3
TOTAL	353	810,4	625,7	1.072,10	1.889,60	3.192,10	2.458,90

Valores em milhões de R\$

(ANTT, 2007)

Diante das evidências do crescimento do transporte ferroviário nacional, cresce a importância de avaliar e analisar a possibilidade de um cenário acidental que pode ser considerado crítico e que deve ser evitado como é o caso do descarrilamento.

1.2- OBJETIVO

O objetivo do trabalho é apresentar um método baseado nos conceitos de análise de risco e confiabilidade por meio das ferramentas como a análise de causa e consequência, a análise por árvores de falhas e a análise do tipo FMEA. Esta última procura identificar causas do possível descarrilamento e desta forma auxilia na proposição de ações de redução de risco que podem ser empregadas em sistemas antigos ou soluções que devem ter sua implementação garantida em sistemas novos para a diminuição da taxa de ocorrência deste evento.

O método também discute uma proposta para a análise da probabilidade de ocorrência do descarrilamento utilizando análise probabilística condicionada avançada, permitindo uma estimativa de custos dos riscos envolvidos.

1.3 - ESCOPO DO ESTUDO

Este trabalho, que tem como foco a apresentação do método de análise de risco aplicado ao estudo do descarrilamento, primeiramente discute o método de análise a ser utilizado, abordando conceitos fundamentais de confiabilidade e algumas ferramentas para análise do descarrilamento do trem, como por exemplo, os diagramas de causa e consequência e as análises de FMEA e FTA.

Feita a descrição do método de análise, serão detalhados os elementos considerados na análise do evento de descarrilamento do trem, ou seja, são abordados de maneira sucinta os sistemas do material rodante e os elementos de via, podendo citar os truques, acoplamentos, trilhos, dormentes entre outros.

Discorre-se também neste trabalho sobre os índices de confiabilidade apresentados no cenário atual pelos diferentes critérios de descarrilamento que já foram desenvolvidos para entendimento do tema e apresentação do cenário atual.

As diversas ferramentas de análise serão aplicadas para o estudo do descarrilamento e, por fim, serão discutidas as ações de projeto e manufatura e políticas de manutenção desenvolvidas no decorrer da evolução ferroviária que podem ser consideradas para evitar o descarrilamento de modo a tornar este evento menos provável de ocorrer.

Adicionalmente, é proposto um método para a análise da probabilidade de ocorrência deste evento baseado no método probabilístico condicionado avançado, assim permitindo uma estimativa de custos dos riscos envolvidos.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são discutidos os conceitos de confiabilidade e as principais técnicas de análise bem como o conceito de análise de risco.

2.1 - CONFIABILIDADE

2.1.1 - INTRODUÇÃO

Pode-se definir confiabilidade, de acordo com Souza (1994) apud *US Military Handbook* (1970) como “a probabilidade de um item executar a sua função sob condições pré-definidas de uso e manutenção por um período de tempo específico”. Em outras palavras, pode-se dizer que é a probabilidade de um item funcionar de maneira pré-determinada sob um período de tempo (uma determinada quilometragem, um número de ciclos etc) pré-determinado.

A confiabilidade empregada em engenharia de projetos surgiu entre 1939 e 1945 durante a Segunda Guerra Mundial para o desenvolvimento de sistemas de maior complexidade e que apresentassem uma menor probabilidade de falha durante o período de uso (VILLEMEUR, 1991). Após a guerra, os conceitos de confiabilidade puderam ser aplicados em outros ramos da engenharia que necessitavam uma predição da vida operacional, dos intervalos de manutenção, entre outras necessidades.

Atualmente, com os mercados cada vez mais exigentes quanto à qualidade de produtos e segurança, se faz necessária a análise da confiabilidade, que pode diminuir os custos e inconvenientes, aumentar a segurança para o consumidor e realizar o estudo da viabilidade de políticas de manutenção.

Para a análise de confiabilidade, é necessária a definição de diversas variáveis, como:

- Clareza da função do equipamento, verificando a forma de utilização, a forma que pode falhar, as causas da falha e a consequência que esta falha pode acarretar;
- O meio ambiente do equipamento, por exemplo, o local em que o item é instalado, as formas em que ocorrerão a manutenção, os usuários e as instalações e
- O período de uso, determinando o tempo de uso e os ciclos de operação.

Para o objeto de estudo, ou seja, o material rodante, a função do equipamento é bastante clara, ou seja, o transporte de pessoas e objetos em uma condição segura. O meio ambiente do equipamento pode ser previamente definido pelo conhecimento das condições de umidade, temperatura entre outros parâmetros ambientais em que o material rodante opera ou operará.

O período de uso é baseado na vida útil do material rodante (normalmente um período de 30 anos).

Três ferramentas que serão empregadas serão a análise de modos e efeitos de falha (FMEA), a análise por árvores de falhas (FTA) e análise de confiabilidade por solicitação e resistência (também conhecida como análise de confiabilidade estrutural).

2.1.2 - ANÁLISE DE MODOS E EFEITOS DE FALHAS (FMEA)

A análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) é um método qualitativo que analisa individualmente as falhas simples de um sistema e os efeitos e impactos que podem causar no mesmo, determinando assim como cada modo de falha afeta o funcionamento do objeto de estudo. Esta definição é apresentada por autores como Sundararajan (1991) e também por Villemeur (1991), sendo que esta ferramenta apresenta grande utilidade na identificação dos itens que podem causar o descarrilamento durante o transporte ferroviário de cargas e passageiros.

A diferença entre FMECA e FMEA é que na análise FMECA (análise de modos e efeitos de falhas críticas) há uma análise quanto à probabilidade de ocorrência e severidade do efeito, desta forma se faz necessário o conhecimento da frequência de ocorrência dos modos de falha para tal análise crítica. Assim, neste trabalho é utilizada a análise do tipo FMEA, já que a probabilidade de falha de cada componente varia de acordo com o tipo e condições de operação do veículo ferroviário.

A análise do tipo FMEA/FMECA tem como benefícios a possibilidade de identificação de deficiências de projeto possibilitando melhorias no mesmo e permitindo também a priorização quanto às ações de redução do risco estudado, porém por se tratar de uma análise de modo de falha simples, ou seja, cada modo de falha é considerado individualmente, combinações de falhas que podem gerar um evento não são identificadas (SUNDARARAJAN, 1991).

Existem diversos modelos de planilhas para a elaboração de FMEA. A norma MIL-STD-1629A (1984) apresenta um exemplo com os seguintes campos principais:

- Número identificador: neste campo é preenchido um número para facilitar a identificação para cada modo de falha de cada componente.
- Identificação funcional ou do item: o nome ou nomenclatura do item ou função do sistema que será analisado através dos seus modos de falha.
- Função: a função que o elemento desempenha, incluindo sua função propriamente dita, assim como sua relação com os demais elementos.
- Modos de falha e causas: os modos de falha são descritos neste campo. As causas mais prováveis associadas com este modo de falha também devem ser descritas. E, para garantir que uma completa análise seja realizada, cada modo de falha deve ser examinado pelas seguintes condições de falha:
 - Operação prematura;
 - Falha na operação em um tempo determinado;
 - Operação intermitente;
 - Falha de parada no tempo determinado;
 - Falha de saída ou durante operação;
 - Saída degradada ou degradação da capacidade nominal;

- Outras condições de falha, quando aplicáveis baseadas nas características do sistema e requisitos de operação.
- Modo ou fase de operação: descrição sucinta do modo ou fase de operação no qual a falha ocorre.
- Efeito das falhas: o efeito causado pelas falhas analisadas. Estes efeitos podem ser analisados quanto aos diversos níveis em um sistema.
- Modo de detecção da falha: descrição do método utilizado para a detecção do modo de falha.
- Ação de gerenciamento: ações recomendadas para a mitigação ou eliminação dos efeitos.
- Severidade (Sev): classificação quanto à severidade dos efeitos. A classificação de severidade será realizada conforme Tabela 2.1.
- Notas: alguma informação que se julgue necessária.

Tabela 2.1 - Níveis de Severidade

Descrição da Severidade do Perigo	Categoria da severidade do perigo	Consequência ao pessoal ou ambiente
CATASTRÓFICO	I	Fatalidade e/ou ferimentos múltiplos severos e/ou danos maiores ao ambiente
CRÍTICO	II	Fatalidade simples e/ou ferimentos severos e/ou danos significativos ao ambiente
MARGINAL	III	Ferimentos menores e/ou ameaça significativa ao ambiente
INSIGNIFICANTE	IV	Possíveis pequenos ferimentos

(EN 50126, 2000)

A Planilha padrão que será utilizada neste trabalho é apresentada na Figura 2.1 e foi adaptada da norma MIL-STD-1629A (1984).

Sistema:												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				

Figura 2.1 - Exemplo de Planilha de FMEA (Adaptado de MIL-STD-1629-A, 1984)

2.1.3 - ANÁLISE POR ÁRVORE DE FALHAS (FTA)

A análise por árvore de falhas (FTA) baseia-se em representar graficamente as possíveis combinações de falhas que podem causar o evento topo analisado utilizando símbolos padrões para esta representação (SUNDARARAJAN, 1991). Esta análise pode ser elaborada em qualquer etapa do projeto, recebendo atualizações quando necessário.

As vantagens que este tipo de análise apresenta são:

- Permitir uma rápida identificação visual dos eventos que causam o evento topo analisado;
- Identificar as causas do evento;
- Permitir a familiarização com o objeto de estudo e
- Sintetizar de uma maneira simples os fatores que causam o evento.

Neste estudo, o software utilizado para a construção desta árvore é o FaultTree+ V7.0.1 da Isograph (ISOGRAPH, 1996). Os principais símbolos utilizados na construção deste tipo de árvore são apresentados da Figura 2.2 à Figura 2.5.

A porta lógica OU, representada na Figura 2.2, indica que a saída é verdadeira quando pelo menos uma das entradas for verdadeira. Esta saída pode ser tanto o evento topo quanto um evento intermediário, sendo necessárias pelo menos duas entradas nesta porta (SUNDARARAJAN, 1991).

Figura 2.2 - Porta lógica OU

A porta lógica E, representada na Figura 2.3, indicada que a saída é verdadeira quando todas as entradas forem verdadeiras. Esta saída pode ser tanto o evento topo (evento indesejável em estudo) quanto um evento intermediário, sendo que são necessárias pelo menos duas entradas nesta porta (SUNDARARAJAN, 1991).

Figura 2.3 - Porta lógica E

O evento não desenvolvido, representado na Figura 2.4, indica um evento em que a análise mais detalhada não foi realizada, normalmente quando é considerada desnecessária ou não se possui informação suficiente no momento.

Figura 2.4 - Evento não desenvolvido

O evento básico, representado na Figura 2.5, é um evento que não pode mais ser desenvolvido em outros sub-níveis, ou seja, não pode ser subdividido.

Figura 2.5 - Evento básico

Para o cálculo da probabilidade de falha do evento topo de uma árvore de falha e estimação das taxas de falha dos eventos básicos, pode-se, por exemplo, considerar o apresentado na NPRD-95 (1995). Assume-se como função que descreve o comportamento da confiabilidade do componente a distribuição exponencial. Esta hipótese é possível, ainda segundo a NPRD-95 (1995), se há a consideração de grandes intervalos de tempo (por exemplo a vida útil do material rodante superior a 30 anos) e se os componentes forem substituídos na ocorrência da falha. Esta estabilização da taxa de falha após um longo intervalo de tempo é apresentada na Figura 2.6, que indica um comportamento com taxa de falha variável no início da vida operacional, e que devido à substituição de componentes em diferentes momentos de operação, a taxa de falha do grupo de componentes acaba seguindo uma taxa de falha constante.

Figura 2.6 - Exemplo de comportamento da taxa de falha de um subsistema com componentes substituídos na ocorrência de falha (Adaptada de NPRD-95, 1995)

2.1.4 - ANÁLISE DE CONFIABILIDADE POR SOLICITAÇÃO E RESISTÊNCIA

No campo da engenharia, as solicitações e resistências não apresentam valores exatos, variando ao longo da vida útil do sistema, afetando assim a possibilidade de operação sem falha do mesmo. Ou seja, os valores de solicitação e resistência não são pontuais, apresentando faixas de valores estatisticamente distribuídas.

Para determinação da probabilidade de falha pelo método de confiabilidade estrutural (também chamado de análise por solicitação e resistência), considera-se que a falha ocorre quando a solicitação é maior que a resistência (SOUZA, 1994).

Diversos métodos podem ser utilizados para a determinação da confiabilidade através da comparação entre solicitação e resistência, como por exemplo, o método de Monte Carlo. Segundo Souza (1994), foram desenvolvidos alguns métodos para a análise de confiabilidade baseada na comparação entre solicitação e resistência empregando-se aproximações e simplificações do modelo de análise, sendo estes modelos divididos em três níveis, de I a III.

O modelo de Nível I é chamado de Método Semi-Probabilístico e utiliza fatores de segurança parciais para as variáveis empregadas no modelo.

O modelo de Nível II, chamado de Método Probabilístico Condicionado, modela o problema através da formulação de uma função de estado limite que descreve o processo de colapso do sistema, assim, determinando a probabilidade desta função ser menor ou igual a zero, a chance desta ser inferior a zero indica a probabilidade de falha do sistema considerando que a mesma ocorre na posição indicada pelos modelos determinísticos. Além disso, as variáveis do problema são descritas através de funções densidade de probabilidade (SOUZA, 1994).

O modelo de Nível III, também chamado de Modelo Probabilístico Puro, calcula a probabilidade de colapso do sistema levando em conta todas as possíveis configurações de colapso que se tornam possíveis pela potencial variação das propriedades mecânicas e das dimensões do elemento estudado (SOUZA, 1994).

Ainda segundo Souza (1994), na comparação destes três métodos, percebe-se que o de Nível I considera diversas simplificações que podem levar a um resultado insatisfatório quanto à probabilidade de falha. Já o de Nível III apresenta uma complexidade elevada em sua aplicação. Assim o método probabilístico condicionado, por ser um ponto de equilíbrio entre os dois outros métodos e por apresentar um bom resultado no cálculo da confiabilidade, é o utilizado neste trabalho.

2.1.4.1- Fundamentos do Método Probabilístico Condicionado

O Método Probabilístico Condicionado, ou método probabilístico de Nível II consiste basicamente na determinação da função do estado limite que descreve o processo, sendo esta função necessariamente linear (SOUZA, 1994).

Esta função pode ser descrita da seguinte forma:

$$Z = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = g(X) \quad (2.1)$$

Sendo $x_1, x_2, \dots, x_n$ as variáveis que descrevem o processo de colapso em estudo.

Porém, a função limite Z do sistema nem sempre é linear, sendo necessária a linearização da função através de expansão em série de Taylor, selecionando-se os termos de 1ª ordem, como indicado na equação (2.2) apresentada por Souza (1994):

$$Z \cong g(X^*) + \sum_{i=1}^n (x_i - x_i^*) g'_i(X^*) \quad (2.2)$$

Sendo:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$$

$$g'_i(X^*) = \frac{\partial g}{\partial x_i}$$

Após algumas manipulações algébricas, é obtida a equação (2.3):

$$Z \cong g(X^*) - \sum_{i=1}^n x_i^* \cdot g'_i(X^*) + \sum_{i=1}^n x_i \cdot g'_i(X^*) \quad (2.3)$$

Ou

$$Z \cong C_0 + \sum_{i=1}^n C_i x_i \quad (2.4)$$

Em que:

$$C_0 = g(X^*) - \sum_{i=1}^n x_i^* \cdot g'_i(X^*) \quad (2.5)$$

$$C_i = g'_i(X^*) \quad (2.6)$$

Através das propriedades de cálculo da média e variância de uma função de variáveis aleatórias, tem-se:

$$m_z = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i m_i \quad (2.7)$$

$$\sigma_z = \left[\sum_{i=1}^n C_i^2 \sigma_i^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

Sendo:

m_z : valor esperado da função de estado limite Z;

σ_z : desvio padrão da função de estado limite Z;

m_i : valor esperado da variável básica x_i ;

σ_i : desvio padrão da variável x_i ;

$C_i = g'_i(X^*)$ com $X^* = (m_1, m_2, \dots, m_n)$.

Com isso, obtido o valor da variável Z, tem-se o colapso quando Z é menor ou igual a zero, caso contrário, não ocorre o colapso. Assim, pode-se determinar o índice de confiabilidade “ β ” expresso pela relação (2.9):

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} \quad (2.9)$$

Logo, tem-se a probabilidade de colapso do sistema através da função distribuição acumulada da distribuição normal reduzida calculada no ponto “ $-\beta$ ”:

$$P_F = \Phi(-\beta) \quad (2.10)$$

Segundo Souza (1994) um problema que se tem neste método é o fato de que o valor obtido depende do ponto escolhido para a linearização da função do estado limite (Z), ou seja, quanto maior a distância deste ponto à superfície definida pela condição $Z=0$, maior o erro cometido no cálculo do índice de confiabilidade. E é devido a este erro que foi desenvolvido o método probabilístico condicionado avançado.

2.1.4.2 - Fundamentos do Método Probabilístico Condicionado Avançado

Neste método, de acordo com Souza (1994, p.43), "o ponto escolhido para a linearização da função do estado limite (Z) deve ser tal que a probabilidade de falha na estrutura seja maximizada, sendo que o mesmo se encontra na curva definida por $Z=0$ ". O procedimento para a determinação do ponto de linearização é o seguinte:

- a) Adotar um valor para o índice de confiabilidade β ;
- b) Adotar para todas as variáveis relevantes no sistema que $x_i^* = m_i$, onde m_i é o valor esperado da variável básica x_i ;
- c) Calcular $g_i'(X^*)$ para as n variáveis básicas;

d) Calcular o valor da constante de proporcionalidade α_i para as n variáveis básicas sabendo-se que a função do estado limite é dada pela equação (2.3) ou (2.4) e o valor esperado da função é dado pelas equações (2.5), (2.6) e (2.7).

Assim, o desvio padrão da função do estado limite é calculado pela equação (2.8) e pela combinação linear dos desvios padrões das variáveis básicas envolvidas no problema, obtém-se a equação (2.11):

$$\sigma_z \cong \sum_{i=1}^n \alpha_i g'_i(X^*) \sigma_i \quad (2.11)$$

Logo, a constante de proporcionalidade referente a cada variável é dada pela equação (2.12):

$$\alpha_i = \frac{g'_i(X^*) \sigma_i}{\left[\sum_{j=1}^n (g'_j(X^*) \sigma_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.12)$$

Onde:

σ_i : Desvio padrão relacionado a cada variável básica

e) Calcular um novo ponto de linearização X^* , utilizando-se a seqüência de atividades abaixo indicadas:

Deduzindo-se o índice de confiabilidade através das expressões do item “d” e sabendo-se que o ponto de linearização deve estar em $Z=0$, tem-se a expressão (2.13):

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - x_i^*) \cdot g'_i(X^*)}{\sum_{i=1}^n \alpha_i g'_i(X^*) \sigma_i} \quad (2.13)$$

Manipulando os termos tem-se (2.14):

$$x_i^* = m_i - \alpha_i \cdot \beta \cdot \sigma_i \quad (2.14)$$

f) Repetir os passos “c” a “e”, até que o ponto de linearização se mantenha constante;

g) Calcular o valor da função do estado limite $Z = g(X^*)$, utilizando-se o ponto de linearização obtido no passo f;

h) Utilizar valores de β e repetir os passos “c” a “h” até obter-se um valor nulo para a função de estado limite, ou seja, $Z=0$;

i) Determinar a probabilidade de colapso utilizando-se a relação:

$$P_F = \Phi(-\beta)$$

Sendo $\Phi(x)$ a função distribuição acumulada da distribuição normal reduzida.

Este algoritmo é apresentado no fluxograma indicado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Fluxograma do Método Probabilístico Condicionado Avançado¹

Porém, este método apresenta certa restrição quanto ao cálculo da média e do desvio padrão para as variáveis básicas, necessitando de certas correções aplicadas às variáveis básicas que não são representadas por distribuições normais (SOUZA, 1994).

¹ As letras do fluxograma indicam a etapa do cálculo, N indica “não” e S indica “sim”.

2.1.4.3 - Correção Aplicada às Variáveis Básicas

O método descrito anteriormente apresenta restrição quanto às variáveis básicas que descrevem o problema. Quando estas não podem ser representadas por uma distribuição normal, são necessárias correções no cálculo da média e do desvio padrão destas variáveis.

Desta forma, segundo Souza (1994 apud RACKWITZ e FIESSLER, 1978), para o cálculo destas correções, é necessário determinar a média e o desvio padrão da distribuição normal equivalente no ponto de linearização através das expressões (2.15) e (2.16):

$$\mu_{x_i}^N = X_i^* - \Phi^{-1}[F_i(X_i^*)]\sigma_{x_i}^N \quad (2.15)$$

$$\sigma_{x_i}^N = \frac{\phi(\Phi[F_i(X_i^*)])}{f_i(X_i^*)} \quad (2.16)$$

Em que:

$\phi(a)$ é a magnitude da função densidade de probabilidade da distribuição normal reduzida;

$F_i(X_i^*)$ é a magnitude da função distribuição acumulada da variável básica x_i calculada no ponto $x_i = X_i^*$;

$f_i(X_i^*)$ é a magnitude da função densidade de probabilidade da variável básica x_i calculada no ponto $x_i = X_i^*$;

$\Phi(b)$ é a magnitude da função distribuição acumulada da distribuição normal reduzida, calculada no ponto b .

2.1.4.4 - Código Computacional Baseado no Método Probabilístico Condicionado Avançado

O código computacional utilizado foi baseado no método probabilístico condicionado avançado apresentado nesta pesquisa e baseado nas pesquisas de Souza (2001). Foi elaborado em “Matlab 7.9.0” em sua versão R2009b e seguindo o fluxograma apresentado na Figura 2.7.

Para a verificação e validação da rotina computacional proposta, os resultados foram comparados com a pesquisa de Souza (2001) e a pesquisa de Souza (2001 apud HARRIS, 1995) para o mesmo caso exemplo utilizado pelas referências.

O exemplo baseou-se em uma chapa infinita com uma trinca central passante e submetida a tensões cíclicas de tração. A expressão considerada da função de desempenho para análise da vida em fadiga, conforme Souza (2001), é:

$$g_{\Delta K}(x) = \frac{1}{\pi^2} \left(\frac{1}{q_i} - \frac{\pi \Delta S^2}{K_{IC}^2} \right) - NC \Delta S^4 \quad (2.17)$$

Onde:

q_i é a dimensão inicial da trinca;

K_{IC} é o fator de intensificação crítica do material;

ΔS é a flutuação de tensão;

N é o número de ciclos de carregamento;

C é o parâmetro da Lei de Paris.

Ainda, segundo Souza (2001 apud HARRIS, 1995), as funções utilizadas para as variáveis básicas bem como os parâmetros, médias e desvios padrões são dados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Variáveis Básicas e suas Funções Densidade de Probabilidade

Variável básica	Símbolo	Tipo de Distribuição	Função Densidade de probabilidade	Parâmetros	Média	Desvio Padrão
Dimensão inicial da trinca	q_i	Exponencial	$f_q(q) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{q}{\lambda}\right)$	$\lambda = 0,02$	0,02	0,02
Parâmetro da lei de Paris	C	Lognormal	$f_c(c) = \frac{1}{\varepsilon c \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(c) - \lambda_c}{\varepsilon}\right)^2\right]$	$\lambda_c = -20,73$ $\varepsilon = 0,50$	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$6,04 \cdot 10^{-10}$
Flutuação de tensão	ΔS	Normal	$f_{\Delta S}(\Delta S) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta S - \mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\mu = 16$ $\sigma = 2$	16,0	2,0
Tenacidade à fratura	K_{IC}	Weibull	$f_{K_{IC}}(K_{IC}) = \frac{k}{w} \left(\frac{K_{IC}}{w}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{K_{IC}}{w}\right)^k\right]$	$w = 32,07$ $k = 7,0$	30,0	5,037

(SOUZA, 2001)

Com as funções densidade de probabilidade apresentadas na tabela, obtiveram-se os resultados indicados na Tabela 2.3 para o índice de confiabilidade, considerando a variação do número de ciclos de carregamento.

Tabela 2.3 - Índices de Confiabilidade Obtidos na Validação do Código Computacional

Número de ciclos de carregamento	Índice de Confiabilidade Souza (2001 apud HARRIS, 1995)	Índice de Confiabilidade Souza (2001)	Índice de Confiabilidade obtido nesta pesquisa (Set/2010)
2×10^3	3,72	3,59	3,76
3×10^3	3,54	3,58	3,32
4×10^3	3,12	3,22	3,02
5×10^3	2,84	2,84	2,79
6×10^3	2,58	2,59	2,60
7×10^3	2,46	2,43	2,44
8×10^3	2,29	2,30	2,31
9×10^3	2,09	2,18	2,19
1×10^4	2,06	2,08	2,09
2×10^4	1,44	1,42	1,43
3×10^4	1,04	1,05	1,06
4×10^4	0,77	0,81	0,81
5×10^4	0,58	0,62	0,63
6×10^4	0,47	0,46	0,48

Os índices de confiabilidade obtidos estão próximos aos apresentados por Souza (2001) e Souza (2001 apud HARRIS, 1995), permitindo assim aplicar o código na computacional baseado no método probabilístico condicionado avançado desenvolvido para a análise de confiabilidade por solicitação e resistência.

2.2 - ANÁLISE DE RISCO

Risco pode ser definido como o potencial de perda resultante da exposição a um perigo e este conceito de risco é utilizado para investigar e avaliar as incertezas associadas com um evento. De acordo com a norma IEC 62278 (2002), o risco está relacionado com dois conceitos:

- a probabilidade de ocorrência de um evento ou combinação de eventos acarretando em um perigo e
- a consequência deste perigo.

A análise de risco é executada considerando (IEC 62278, 2002):

- a descrição da metodologia;
- hipóteses, limitações e justificativas quanto ao uso da metodologia;
- identificação dos resultados estudo do perigo;
- estimativa do risco e nível de confiança;
- resultados de estudos;
- discussão sobre fonte de dados e
- referências.

Para tal pode ser utilizado o diagrama de causa e consequência. Seu objetivo é identificar nos fluxogramas disponíveis os perigos presentes. Este método desenvolvido na década de 70 (VILLEMEUR, 1991 apud NIELSEN, 1971) segue as seguintes etapas:

- Seleção do evento inicial: um evento crítico relacionado com a falha de componentes ou sistemas e que acarretam em consequências indesejadas.
- Identificação das causas do evento inicial: estas causas podem ser identificadas com auxílio de árvore de falhas (FTA) que foi apresentada no tópico 2.1.3.
- Identificação das consequências do evento inicial: neste estudo a consequência indesejada é o descarrilamento.
- Diagrama de causa e consequência e cortes mínimos: o diagrama de causa e consequência sumariza o evento inicial, as causas do evento e

as conseqüências em figuras que facilitam o entendimento e permitem a identificação da mínima combinação de falhas que podem gerar o evento indesejado.

A Figura 2.8 apresenta um exemplo do diagrama de causa e conseqüência.

Figura 2.8 - Exemplo de diagrama de causa e conseqüência

Para a construção de uma matriz de risco, a norma IEC 62278 (2002) determina que “as categorias, seus números e a escala numérica devem ser definidas pela Autoridade Ferroviária, de forma apropriada para a aplicação considerada” ou seja, os valores de freqüência, severidades e aceitabilidade de cada combinação de freqüência com severidade devem ser determinados pela autoridade ferroviária. Ainda segundo a norma IEC 62278 (2002), a autoridade ferroviária é o órgão máximo e responsável final pela regulamentação para a operação de um sistema ferroviário.

A definição das tabelas de Severidade, Freqüência e Matriz de Risco consideraram os critérios estabelecidos nas normas IEC 62278 (2002) ou EN 50126 (2000) e também no “HAZARD ANALYSIS GUIDELINES FOR TRANSIT PROJECTS” elaborada pela *Federal Transit Administration* dos EUA (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, 2000), agência reguladora para segurança de transportes terrestres daquele país. Nesta definição de matriz de risco, a norma IEC 62278 (2002) ou EN 50126 (2000) apresenta seis classes de freqüência de ocorrência, porém não apresenta os valores numéricos, já o “HAZARD ANALYSIS GUIDELINES FOR TRANSIT PROJECTS” (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, 2000) apresenta apenas cinco classes de freqüência com os valores numéricos de MTBE.

Para a frequência “inacreditável”, o valor numérico foi baseado na EN 50129 (2002) utilizando-se um valor de referência maior que o THR requerido para equipamentos com nível de integridade de segurança (SIL) 4, pois o mesmo apresenta o maior nível de segurança e a menor taxa tolerável de ocorrência de um evento não desejado.

O SIL é classificado em quatro diferentes categorias (de 1 a 4). A necessidade de diferentes níveis varia de acordo com a taxa tolerável de ocorrência de um determinado perigo. Esta taxa tolerável do perigo (THR) considera os riscos associados ao perigo, as conseqüências etc. O paralelo com esta taxa tolerável de perigo, segundo a norma EN 50129 (2002), é apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Nível de Integridade de Segurança

THR por hora e por função	SIL
$10^{-9} \leq \text{THR} < 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq \text{THR} < 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq \text{THR} < 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq \text{THR} < 10^{-5}$	1

Deve ser observado que para que o nível SIL desejável seja alcançado, a preocupação não é limitada apenas ao THR, mas também as seguintes condições devem ser consideradas:

- condições de gerenciamento da qualidade;
- condições de gerenciamento de segurança;
- condições técnicas de segurança e
- metas quantitativas de segurança.

Assim, pela combinação das frequências de ocorrência (apresentada na Tabela 2.5) com o nível de severidade das conseqüências dos perigos (apresentada na Tabela 2.1) é construída a matriz de risco conforme Tabela 2.6.

Tabela 2.5 - Frequência de Ocorrência do Evento

Categoria	Descrição	Tempo Médio Entre Falhas MTBE (h)	Probabilidade de falha em 1h (considerando taxa de falha constante)
Freqüente	Susceptível que ocorra freqüentemente. A situação perigosa será experimentada continuamente.	$MTBE < 1000$	$F(t) > 10^{-3}$
Provável	Ocorrerá diversas vezes. Espera-se que a situação perigosa ocorra com freqüência.	$100.000 > MTBE \geq 1.000$	$10^{-3} \geq F(t) > 10^{-5}$
Ocasional	Susceptível de ocorrer diversas vezes. Espera-se que a situação perigosa ocorra diversas vezes.	$1.000.000 > MTBE \geq 100.000$	$10^{-5} \geq F(t) > 10^{-6}$
Raro	Susceptível de ocorrer alguma vez no ciclo de vida do sistema. Espera-se que a situação perigosa ocorra com razoável freqüência.	$100.000.000 > MTBE \geq 1.000.000$	$10^{-6} \geq F(t) > 10^{-8}$
Improvável	Improvável ocorrência mas possível. Supõe-se que a situação perigosa ocorra excepcionalmente.	$1.000.000.000 \geq MTBE \geq 100.000.000$	$10^{-8} \geq F(t) \geq 10^{-9}$
Inacreditável	Extremamente improvável de ocorrer. Assume-se que a situação perigosa não ocorre.	$MTBE > 1.000.000.000$	$F(t) < 10^{-9}$

(Adaptada de IEC 62278, 2002)

Tabela 2.6 - Matriz de Risco

Frequência	Nível do Risco			
Freqüente	Indesejável	Intolerável	Intolerável	Intolerável
Provável	Aceitável	Indesejável	Intolerável	Intolerável
Ocasional	Aceitável	Indesejável	Indesejável	Intolerável
Raro	Desprezível	Aceitável	Indesejável	Indesejável
Improvável	Desprezível	Desprezível	Aceitável	Aceitável
Inacreditável	Desprezível	Desprezível	Desprezível	Desprezível
	Insignificante	Marginal	Crítico	Catastrófico
	severidade			

Pela matriz de risco, é demonstrada a relação entre confiabilidade e segurança (grande parte dos sistemas com maior confiabilidade apresentam maior segurança).

Os critérios de aceitação dos riscos apresentados pela norma IEC 62278 (2002) estão descritos na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Ações a serem realizadas para cada categoria de risco

Categoria do Risco	Ações a serem aplicadas para cada categoria
Intolerável	Deve ser eliminado.
Indesejável	Só deve ser aceito quando a redução do risco é impossível e com o consentimento da autoridade ferroviária ou o da autoridade reguladora de segurança, como apropriado.
Aceitável	Aceitável com adequado controle e com o consentimento da autoridade ferroviária.
Desprezível	Aceitável com/sem o consentimento da autoridade ferroviária.

(IEC 62278, 2002)

Desta forma, considerando a severidade do evento “descarrilamento” como sendo uma severidade catastrófica (I), a probabilidade de falha ideal que se deseja alcançar é inferior ao valor de 10^{-9} em 1 hora. Este valor de probabilidade de falha é

bastante baixo e considerando o valor de MTBE de 1.000.000.000 horas, seria de difícil comprovação em ensaios a eficácia da implementação de uma ação com base na confiabilidade do mesmo.

Segundo a norma NBR 9321 (1986) e considerando a taxa de falha constante, conforme apresentado em 2.1.3, para se realizar uma estimativa por ponto da taxa de falha de um determinado sistema, deve-se ter cuidado para que o tempo relevante de ensaio seja suficientemente grande em relação ao valor esperado de tempo médio até a falha. Caso contrário, a taxa de falha obtida deve ser aumentada, dependendo do intervalo de confiança e do número de falhas que ocorreram durante o ensaio (NBR 9321, 1986). Na Tabela 2.8, que apresenta um exemplo para fatores de multiplicação da taxa de falha de acordo com o limite de confiança desejado, pode-se verificar que para um maior intervalo de confiança deve-se aplicar um fator de multiplicação da taxa de falha obtida durante o ensaio visando o aumento de seu valor, além disso, este aumento é tanto maior quanto menor o número de falhas observadas.

Tabela 2.8 - Tabela de Multiplicadores para a Taxa de Falha

Número de falhas	M (5%)	M (90%)	M (95%)
1	0,051	3,889	4,743
2	0,177	2,662	3,147
3	0,272	2,226	2,584
4	0,341	1,997	2,288
5	0,394	1,854	2,103
10	0,521	1,54	1,695
20	0,662	1,351	1,452
60	0,8	1,184	1,237

(NBR 9321, 1986)

No Brasil não existe a figura da autoridade ferroviária, desta forma, é comum transferir as responsabilidades de aceitação e definição da matriz de risco para as operadoras ou empresas que estão adquirindo o material rodante.

Desta forma, é possível que esta empresa determine o tempo relevante acumulado de ensaio bem como os critérios de aceitação do risco residual.

Para o tempo relevante acumulado, a mesma pode se guiar pela norma IEC 61124 (2006) que estabelece diferentes planos para a comprovação da confiabilidade, como: teste seqüencial truncado, teste com término por tempo ou falha e teste combinado.

O teste seqüencial truncado é caracterizado por regras de aceitação, rejeição ou prorrogação do teste e permite menor tempo de teste para sistemas mais confiáveis, porém pode rejeitar mais rapidamente sistemas com alta taxa de falha prematura.

O teste de término por tempo ou falha é caracterizado por regras de aceitação ou rejeição quando o tempo máximo de teste for alcançado ou o número aceitável de falhas for excedido.

O teste combinado faz uso de uma linha de rejeição que considera um número constante de falhas, enquanto que a linha de aceitação é curva, desta forma itens com alta confiabilidade são aceitos de uma forma mais rápida enquanto itens com alta taxa de falha prematura não são rejeitados imediatamente.

A Tabela 2.9 é baseada na norma IEC 61124 (2006) e apresenta as características, as vantagens e desvantagens destes testes.

Tabela 2.9 - Exemplos de Testes de Aceitação

Tipo de teste	Característica	Vantagens	Desvantagens
Seqüencial truncado		Garante melhor eficiência (menor tempo de teste)	Complicado para se administrar
Término por tempo ou falha		É de simples compreensão	O tempo de teste é maior considerando itens muito confiáveis e itens pouco confiáveis.
Combinado		Combina as vantagens do teste com término por tempo ou falha e o teste seqüencial truncado. Itens mais confiáveis serão aceitos com maior rapidez e itens com muitas falhas prematuras não serão rejeitados precocemente no teste	Muito complicado para se administrar

CAPÍTULO 3 - ELEMENTOS DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO

Os elementos que são abordados neste capítulo são os elementos de via e os componentes e sistemas do material rodante. Os elementos de via serão apresentados no item 3.1 e podem ser caracterizados como todos os componentes que compõem as estruturas que guiam o movimento do trem bem como as estruturas que permitem a interface com o trem. Já o material rodante será apresentado em 3.2 e pode ser definido como todo veículo que apresenta a sua trajetória pré-estabelecida, caracterizado por um ou mais vagões interligados para o transporte de cargas e pessoas. A sua trajetória é limitada pelos elementos via que impedem a alteração da direção do veículo.

3.1 - ELEMENTOS DE VIA PERMANENTE

3.1.1 - INTRODUÇÃO

As primeiras locomotivas, segundo Almeida (2006), não possuíam rodas com flange, podendo utilizar estradas. Porém para a economia de material e melhora da dirigibilidade, criaram-se flanges para as rodas e aliando o movimento das locomotivas aos trilhos.

Os elementos de via podem ser caracterizados como todos os componentes que compõem as estruturas que guiam o movimento do trem bem como as estruturas que permitem a interface com o trem.

É necessária a análise dos elementos de via para a determinação do risco quanto ao descarrilamento do material rodante, já que os mesmos influenciam na operação e no possível descarrilamento.

A Figura 3.1 apresenta elementos de via que serão abordados neste estudo.

Figura 3.1 - Elementos de Via Permanente (SILVA, 2004)

3.1.2 - TRILHO

Os trilhos são os elementos de contato com a roda permitindo o contato metal-metal, servindo de sustentação para o material rodante e devendo apresentar perfil estável ao tombamento com alta resistência lateral, arestas arredondadas para diminuir a ação de tensões residuais e ter a sua vida útil respeitada (SILVA, 2004). Normalmente apresentam o perfil Vignole, que consiste em três áreas como mostra a Figura 3.1, o boleto que apresenta uma maior massa, favorecendo o momento de inércia, a alma que é dimensionada para garantir a resistência à flexão e o desgaste provocado pela corrosão atmosférica e o patim que é responsável por garantir a perpendicularidade do trilho.

As falhas que podem ocorrer nos trilhos são, segundo Brina (1988), separados em defeitos de fabricação e defeitos originados em serviço.

Os principais defeitos de fabricação, que podem afetar a segurança, são divididos em fenômenos chamados de vazio, segregações, inclusões e fissura transversais.

O fenômeno de vazio ocorre durante o resfriamento do aço após a fabricação do trilho. O resfriamento causa a solidificação da região externa do trilho por estar em contato com o ar e por esta razão pode ocorrer um vazio devido à contração do material durante o resfriamento da região interna, assim ocorre uma diminuição da resistência do trilho (BRINA, 1988). Para evitar este defeito, é comum o uso de um massalote, ou seja, uma expansão deste trilho que é envolto de material mau condutor de calor. Esta expansão sofre o processo de “rechupe” e após o termino do resfriamento, o mesmo é descartado.

O fenômeno de segregação é causado pela presença de impurezas na liga de aço utilizado na fabricação, por exemplo, como ocorre na solidificação do metal líquido utilizado na fabricação do trilho, em que os elementos, como o enxofre, tornam-se menos solúveis e tendem a se agrupar na região central do trilho, já que esta região se solidifica depois quando comparada à região externa (COLPAERT, 1959). Desta forma, pode ocorrer alteração das propriedades mecânicas com falta de homogeneidade destas características, podendo apresentar qualidades mecânicas inferiores. A Figura 3.2 demonstra a disposição da segregação que freqüentemente se encontra nas seções de um trilho laminado e forjado.

Figura 3.2 - Segregação no trilho (COLPAERT, 1959)

O fenômeno de inclusão não metálica é causado por elementos insolúveis ao aço como gases ou alguns óxidos, provocando desta forma a perda da homogeneidade e conseqüente qualidade inferior. Tal defeito pode ser evitado por uma desoxidação e práticas de lingoteamento convenientes (BRINA, 1988).

O defeito de fissuras transversais é causado por cavidades formadas no final da laminação e pode gerar fratura em operação. Para se evitar o risco provocado

por este defeito, podem ser empregados equipamentos, como o detector de Sperry (BRINA, 1988), que utiliza corrente elétrica para a geração de campos magnéticos e para determinar a presença destas fissuras ou o Sonirail que se utiliza de sons para a detecção do defeito.

Alguns problemas relacionados com as heterogeneidades são apresentados no APÊNDICE D.

Os principais defeitos originados em serviço (BRINA, 1988) que podem afetar a segurança são divididos em:

- deformação das pontas que ocorre devido ao desnivelamento dos dormentes permitindo choques e flexões nas juntas;
- autotêmpera superficial, fenômeno no qual ocorre o aquecimento da superfície devido, por exemplo, à patinação das rodas e posterior resfriamento rápido, podendo causar assim fissuras ou fragilidade do material;
- escoamento do metal na superfície do boleto, que é uma deformação permanente devido, por exemplo, a choques e causando aumento da superfície do boleto;
- desgaste da alma e do patim por ação química, que é proveniente de produtos transportados ou da ação ambiente;
- desgaste do trilho por atrito, que ocorre devido às forças de atrito atuantes na movimentação do trem;
- fratura dos trilhos originadas em serviço, que pode ser causada pelas fissuras transversais ou fadiga do material.

De acordo com a Federal Railroad Administration (2006), a fratura dos trilhos é responsável por diversos acidentes, entre eles o descarrilamento. Além disso, o mesmo estudo ainda apresenta avaliação da resistência à fratura para trilhos fabricados com aço bainíticos e perlíticos bem como análise do crescimento da trinca pelo evento de fadiga.

Para auxílio e facilitação da manutenção, existem indicações de limites de uso dos trilhos para o fenômeno de desgaste, como exemplo pode-se citar a que apresenta as ações nos trilhos que devem ser realizadas de acordo com o desgaste dos mesmos.

Tabela 3.1 - Tabela para Substituição e Inversão dos Trilhos

BOLETO		63	62	61	60	59	58	57	56	55	54	53	52	51	50	49	48	47	46	45	44	43	42	41
DESGASTE HORIZ.		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
DESGASTE VERT.	1																							
	2																							
	3																							
	4																							
	5																							
	6																							
	7																							
	8																							
	9																							
	10																							
	11																							
	12																							
	13																							
	14

INVERSÃO
EXECUTAR INVERSÃO

SUBSTITUIÇÃO
EXECUTAR SUBSTITUIÇÃO - (fora da tolerância)

(LAUERMAN, 2008 apud ALL, 2002)

3.1.3 - TALAS DE JUNÇÃO

As talas de junção são responsáveis pela união entre os trilhos. Estes elementos são montados na alma do trilho, podendo ter geometria tanto plana quanto angular, além de apresentar tamanhos variados como apresenta a Figura 3.3.

Figura 3.3 - Talas de Junção (M.I.M.F, 2009)

3.1.4 - ELEMENTOS DE FIXAÇÃO

Os elementos de fixação são estruturas que garantem a fixação entre os trilhos e os dormentes. Estas fixações podem ser tanto rígidas quanto elásticas, que apresentam a vantagem de não afrouxar com as vibrações causadas pelos ciclos de operação. Pode-se citar como elementos de fixação: parafusos, arruelas, placas de apoio, pregos de linha, tirefões, grampos elásticos, fixações pandrol e retensores.

Os parafusos e arruelas são utilizados, por exemplo, para o aperto das talas de junção. Já as placas de apoio são utilizadas para aumentar a área do trilho no dormente e melhorar a distribuição da carga, aumentando a vida do dormente. A Figura 3.4 apresenta uma representação da placa de apoio.

Figura 3.4 - Placa de apoio (BRINA, 1988)

O prego de linha é o tipo mais comum de fixação do trilho e é o menos eficiente quando comparado ao tirefão devido ao seu formato de cunha que tende a trincar o dormente. Já o tirefão apresenta seu corpo roscado e cabeça para permitir o uso de ferramentas para sua instalação. Um exemplo desta ferramenta é apresentada na Figura 3.5. Além disso, o APÊNDICE D apresenta-se figuras de problemas que podem ser encontrados em tirefões.

Figura 3.5 - Tirefonadora (LAUERMAN, 2008 apud ALL, 2002)

Outros elementos de fixação são os grampos elásticos, como as fixações pandrol, que são fixações elásticas e por esta razão apresentam menor afrouxamento quando comparados às rígidas. E por fim, os retensores que impedem o deslocamento dos trilhos na direção longitudinal.

Os elementos apresentados são utilizados na atualidade, por exemplo, a TRENSURB (2010) utiliza em seu trecho de via em superfície fixações elásticas nos dormentes de concreto e fixações com placa Pandrol e tirefões nos dormentes de madeira. Já a CPTM em dezembro de 2010, utilizava na estação Comandante Sampaio da linha 8 – Diamante fixações elásticas e na estação Lapa da linha 7 – Rubi fazia uso de fixações pandrol e tirefões.

3.1.5 - APARELHOS DE MUDANÇA DE VIA

Os aparelhos de mudança de via (AMV) são dispositivos que permitem a alteração de rota do trem, uma vez que o trem não apresenta possibilidade de alteração de direção de operação própria. Na Figura 3.6 é apresentado um exemplo de aparelho de mudança de via.

Figura 3.6 - Exemplo de Aparelho de Mudança de Via

Segundo (BRINA, 1988), os aparelhos de mudança de via podem ser classificados como: aparelhos de mudança de via comum, aparelhos de mudança de via especiais (giradores e carretões), triângulos de reversão, cruzamentos e pára-choques.

As estruturas principais dos aparelhos de mudança de via comuns são:

- as agulhas, estruturas metálicas móveis e paralelas entre si permitindo a alteração da direção do movimento;
- as contra-agulhas, que servem de batente para as agulhas;
- os aparelhos de manobra, que permitem a movimentação das agulhas;
- os trilhos de ligação, que ligam as agulhas aos jacarés;
- os jacarés, partes principais dos aparelhos de mudança de via e apresentados na Figura 3.7 e
- os contratrilhos, instalados normalmente nos trilhos externos para evitar que os frisos das rodas se choquem com os jacarés.

Figura 3.7 - Aparelho de Mudança de Via (LAUERMAN, 2008 apud ALL, 2002)

Os aparelhos de mudança de via especiais são utilizados principalmente em áreas de manutenção, como oficinas, de forma a permitir, por exemplo, a mudança do sentido de operação (no caso dos giradores) e a mudança de veículos para diferentes vias (no caso de carretões).

Os triângulos de reversão são constituídos de desvios interligados de modo a alterar o sentido de operação do veículo ferroviário sem a necessidade do uso de giradores (que apresenta um maior preço de instalação). Já os pára-choques de via são instalados nas extremidades de via de modo a evitar o descarrilamento nas pontas dos desvios.

Por fim, os cruzadores permitem o cruzamento entre as duas vias férreas sem a necessidade de alteração do nível das mesmas. Vale ressaltar que este tipo de aparelho não pode ser utilizado em vias comerciais já que são inseguras para estas operações comerciais.

3.1.6 - DORMENTES

Os dormentes, segundo Silva (2004) e Brina (1988), apresentam como funções principais à distribuição da carga no lastro, garantir a bitola, garantir estabilidade e amortecer as vibrações. Existem diversos tipos de dormentes, sendo os principais os de concreto, os de madeira e os de aço. A Tabela 3.2 apresenta um comparativo entre estes três tipos de dormentes.

Tabela 3.2 - Comparativo entre Tipos de Dormentes

	Concreto	Madeira	Aço
Maior massa	X		
Melhor isolamento	X	X	
Suportam supersolicitação		X	X
Resistência a fungos	X		X
Reciclável		X	X
Facilidade de manuseio		X	X

O uso de madeira para a fabricação de dormentes é comum por apresentar características importantes para os mesmos como menor massa quando comparado ao dormente de concreto, bom isolamento elétrico e a possibilidade de reciclagem. Porém, aliado a estas características desejáveis, a durabilidade deste material deve ser considerada, pois é influenciada pela qualidade do material, clima, drenagem da via, peso do trem, velocidade de operação e tratamentos químicos que a madeira recebe.

Os dormentes de aço podem apresentar diversos tipos de formato, sendo o mais comum a forma de U invertido e é uma solução contra o inconveniente dos fungos que podem vir a atacar os dormentes de madeira. Porém, apresentam como inconvenientes o maior barulho em operação, a dificuldade de isolamento elétrico e maior rigidez com conseqüente possibilidade de afrouxamentos dos elementos de fixação (BRINA, 1988).

Os dormentes de concreto foram criados devido à escassez de boas madeiras para dormentes evitando assim o desflorestamento, porém apresentam como inconveniente a incapacidade de suportar supersolicitações, ocorrendo trincas e quebras com a operação dos trens. E para a resolução deste problema, algumas soluções foram propostas para os dormentes de concreto, como: dormentes de concreto protendido, dormentes mistos e dormentes poliblocos.

Os dormentes de concreto protendido apresentam protensão reforçada (introdução na estrutura do dormente de um estado prévio de tensões, melhorando a sua resistência quanto à ação de diversas solicitações) e região central com altura média mais espessa. Já os dormentes mistos são formados por dois blocos de concreto unidos por uma viga metálica, tentando unir as características do concreto (isolamento, resistência etc) e do metal (maior elasticidade quando comparado ao concreto). Por fim, os dormentes poliblocos apresentam três blocos de concreto unidos por fios de aço e material elástico.

3.1.7 - LASTRO E SUBLASTRO

Os lastros são construídos para distribuir os esforços nos dormentes, permitir a manutenção do nivelamento da via e drenagem. Já o sublastro é construído com o intuito de impedir que ocorra a difusão de lama na direção vertical com sentido para cima.

Os principais modos de falha desta infra-estrutura, segundo Porto (1984), são: ruptura geral, deformação excessiva, contaminação do lastro pela presença de finos bombeados do sub-leito e ruptura do lastro. A ruptura geral é caracterizada pela ruptura da infra-estrutura podendo ocasionar deslocamento de material para o lado da via ou para a região entre os dormentes, sendo causado quando o subleito não consegue suportar as cargas do movimento do material rodante. Já a deformação excessiva é caracterizada quando a deformação atinge um limite em que a operação ferroviária não é viável economicamente.

Outro modo de falha, a contaminação do lastro pela presença de finos bombeados do sub-leito, é causada pela ruptura do solo em contato com o lastro ou sub-lastro, seguido de bombeamento da argila e remonte do material fino através do lastro, causando maior rigidez na via e aumentando a velocidade de deterioração da via. Por fim, a ruptura do lastro é causada pelo acúmulo de partículas finas produzidas pelo desgaste do lastro ou de algum outro depósito, impedindo a drenagem e podendo causar a formação de lama que facilita o deslocamento do lastro e pode causar a ruptura do mesmo. Neste caso, o dimensionamento das camadas para se evitar esta falha pode ser realizado através do uso de fatores de segurança.

3.1.8 - PLATAFORMA

A plataforma é o elemento que permite, por exemplo, a acomodação de passageiros e de carga. Ou seja, trata-se da interface entre o trem e as pessoas e a colocação de cargas. Dependendo das regiões, pode apresentar diferentes alturas e comprimentos.

3.1.9 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

As características geométricas da via são limitadas pela dinâmica do movimento do trem, já que esta dinâmica apresenta diversas peculiaridades, como por exemplo, o contato metal-metal que garante o atrito responsável pelo movimento, a restrição quanto às curvas devido ao truque (sistema que é detalhado no item 3.2.2) que apresenta estrutura rígida, a limitação de potência gerada pelo sistema de tração, entre outras. Por esta razão, faz-se importante apresentar as formas de determinação das limitações de via, sendo considerado como as duas principais limitações presentes na ferrovia o raio mínimo permitido e a superelevação.

3.1.9.1 - Raio Mínimo

O raio mínimo permitido é estabelecido por normas e autoridades ferroviárias. Este raio deve limitar o escorregamento entre o trilho e rodas e permitir a inscrição da base rígida dos truques do carro (SILVA, 2004). A existência desta restrição ocorre devido, em última análise, à inscrição dos veículos que se aproxima à de um retângulo com base rígida de inscrição igual à distância entre os eixos extremos (BRINA, 1988). Esta base rígida pode ser observada na Figura 3.8 e Figura 3.10.

De acordo com as dinâmicas dos veículos na via, o mesmo pode tomar algumas posições diferentes: a de inscrição limite ou obrigada e a inscrição livre ou normal.

No caso da inscrição limite, os frisos das rodas extremas estarão em permanente contato com o trilho aumentando a resistência da curva, facilitando o descarrilamento nesta situação; desta forma o dimensionamento da curva neste caso só seria aceito em trechos de velocidade reduzida, como pátios (BRINA, 1988). Alternativamente às normas que limitam o raio mínimo, é possível a estimativa da superlargura (excesso de distância em relação à bitola aplicada em curvas para facilitar a rodagem e a inscrição), considerando-se os parâmetros definidos na

Figura 3.8 e o seguimento afetado relativo ao avanço do friso em relação ao aro definido na Figura 3.9. Nestas figuras considera-se:

R : raio da curva

R_1 : Raio determinado pelo trilho interno

R_2 : Raio determinado pelo trilho externo

f_1 : folga decorrente do raio R_1 e eixos extremos

f_2 : folga decorrente do raio R_2 e eixos extremos

p : dimensão da base rígida do veículo

u : seguimento afetado relativo ao avanço do friso em relação ao aro

m : altura do friso

D_i : diâmetro da roda medido até o friso

Figura 3.8 - Modelo para Inscrição Limite (BRINA, 1988)

Figura 3.9 - Modelo do Avanço do Friso (Adaptado de BRINA, 1988)

Considerando d_f como a distância entre as faces externas dos frisos e j o jogo da via, é obtida a equação (3.1) e (3.2):

$$d_f + f_2 = f_1 + B + S_u \quad (3.1)$$

$$B - d_f = j \quad (3.2)$$

Por consequência o valor da superlargura S_u :

$$S_u = f_2 - f_1 - j \quad (3.3)$$

Sabendo ainda que geometricamente tem-se (desconsiderando f_2^2 e f_1^2 frente a $2R$):

$$\left(\frac{p + 2u}{2} \right)^2 = f_2(2R_2 - f_2) = 2R_2 \cdot f_2 \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{p - 2u}{2} \right)^2 = f_1(2R_1 - f_1) = 2R_1 \cdot f_1 \quad (3.5)$$

Tem-se assim através da manipulação de (3.3), (3.4) e (3.5):

$$S_u = \frac{(p + 2u)^2}{8\left(R + \frac{B}{2}\right)} - \frac{(p - 2u)^2}{8\left(R - \frac{B}{2}\right)} - j \quad (3.6)$$

Considerando ainda:

$$u^2 = d_f m \quad (3.7)$$

é obtida a equação (3.8) da superlargura mínima, ou através de manipulações, do raio mínimo para que ocorra ao menos a inscrição limite.

$$S_u = \frac{pR\sqrt{d_f m} - \frac{p^2 B}{8} - \frac{mBd_f}{2}}{R^2 - \frac{B^2}{4}} - j \quad (3.8)$$

No caso da inscrição livre, o eixo traseiro tomará a posição radial em que o mesmo ficará na direção do raio da curva (BRINA, 1976). Desta forma, considerando-se a Figura 3.10 sendo que f é a folga no trilho com relação ao eixo traseiro:

Figura 3.10 - Modelo para Inscrição Livre (BRINA, 1988)

A equação demonstrada por Brina (1976) para o raio mínimo é expressa por:

$$f = \frac{p^2 - 2pu}{2\left(R - \frac{B}{2}\right)} \quad (3.9)$$

Através da equação (3.8) e (3.9), é possível estimar os raios mínimos, em que normalmente são aplicados fatores de segurança quanto a estes raios. A equação (3.8) refere-se à inscrição limite (que não deve ser utilizada em operações comerciais) e a equação (3.9) refere-se à inscrição livre.

3.1.9.2 – Superelevação

A superelevação é utilizada no projeto de vias férreas com o intuito de diminuir o desgaste do contato metal-metal e o risco de descarrilamento, além de permitir um maior conforto ao passageiro. Assim, é possível o equacionamento da superelevação considerando o carregamento presente em um carro em curva de acordo com a Figura 3.11. Nesta figura considera-se:

d_1 = deslocamento do centro de gravidade;

H = altura do centro de gravidade em relação ao trilho superior;

a = distância de centro a centro dos trilhos;

h_p = superelevação máxima, ou seja, é a maior superelevação prática que não provoca o tombamento do trem;

α_1 = ângulo entre a horizontal e o dormente;

P é a força peso;

F' é a componente da força peso na direção de F_c e;

F_c é a força centrífuga resultante.

Figura 3.11 - Modelo para Determinação de Superelevação Máxima (BRINA, 1988)

Na configuração apresentada na Figura 3.11, segundo Stopatto (1987) e Brina (1988), considerando uma velocidade do trem (v) e o raio da curva (R), a força centrífuga resultante (F_c) é expressa por (3.10).

$$F_c = \frac{Pv^2}{gR} \quad (3.10)$$

Além disso, durante o movimento surgem dois momentos, o momento estabilizador (Me) e o momento de reviramento (Mr). Considerando como ponto de referência o ponto de contato entre a roda e o trilho superior, têm-se as expressões (3.11) e (3.12).

$$Me = P \cdot \cos \alpha_1 \left(\frac{a}{2} - d_1 \right) \quad (3.11)$$

$$Mr = \left(P \frac{h}{a} - \frac{Pv^2}{gR} \right) H \quad (3.12)$$

Assim, para ângulos pequenos de α_1 é obtida a expressão (3.13).

$$Me = P \cdot \left(\frac{a}{2} - d_1 \right) \quad (3.13)$$

Para que ocorra o equilíbrio, o momento de reviramento deve ser igual ao momento estabilizador. Vale ressaltar que são considerados coeficientes de segurança (n) para garantir que não ocorra o tombamento; portanto são obtidas as equações (3.14) e (3.15).

$$Me = n \cdot Mr \quad (3.14)$$

$$h_p = \frac{av^2}{g \cdot R} - \frac{a}{H \cdot n} \left(\frac{a}{2} - d_1 \right) \quad (3.15)$$

Outro critério que deve ser considerado na determinação da superelevação é o critério de conforto, ou seja, a aceleração centrífuga que uma pessoa pode suportar confortavelmente deve ser considerado. De acordo com experimentos, a aceleração centrífuga que uma pessoa pode suportar sem que sinta desconforto é $0,6 \text{ m/s}^2$ (BRINA, 1988). Assim, considerando um veículo percorrendo uma curva com raio de curvatura R , a expressão (3.15) é simplificada desconsiderando a parcela resultado da força peso na direção de F_c , logo é obtida a equação (3.16).

$$h_T = \frac{av^2}{g \cdot R} \quad (3.16)$$

A aceleração centrífuga γ pode ser expressa por v^2/R , causando assim uma parcela de superelevação conforme expressão (3.17):

$$\Delta h = \frac{a\gamma}{g} \quad (3.17)$$

Logo a equação (3.19) representa a superelevação de acordo com o critério de conforto.

$$\Delta h = h_T - h_p \quad (3.18)$$

$$h_p = \frac{av^2}{g \cdot R} - \frac{a\gamma}{g} \quad (3.19)$$

Assim, para a determinação da superelevação máxima, escolhe-se entre o maior valor que atenda às duas equações (3.15) e (3.19).

Além disso, de maneira análoga pode-se determinar a velocidade máxima de operação em cada curva. Já para a determinação da velocidade mínima, considera-se que o tombamento pode ocorrer pelo trilho interno à curva, assim, utilizando-se um equacionamento semelhante pode-se determinar a velocidade mínima de operação de um trem em curva.

3.2 - VEÍCULOS FERROVIÁRIOS

3.2.1 - INTRODUÇÃO

O veículo ferroviário ou material rodante é definido, segundo Almeida (2006) e Santos (2007), como todo veículo que apresenta a sua trajetória pré-estabelecida, caracterizado por um ou mais veículos interligados para o transporte de cargas e pessoas. A sua trajetória é limitada pelos elementos via que impedem a alteração da direção do veículo. Atualmente existem diversos tipos de veículos ferroviários, como: locomotivas, pendulares, metropolitanos, trens regionais, trens de alta velocidade e veículos leves sobre trilhos.

As locomotivas são os veículos que apresentam a possibilidade de movimentação autônoma, fornecendo possibilidade de movimento para os demais veículos a ela ligados, possuindo diversos tipos de propulsão, como por exemplo, a vapor, diesel e elétricas.

Os veículos leves sobre trilhos são veículos de menor massa quando comparados com os demais e operam mais comumente entre bairros e pequenas cidades.

Os trens metropolitanos são utilizados para o transporte de um grande número de pessoas e normalmente são utilizados em metrópoles e percorrem menores distâncias entre as estações quando comparados com os trens regionais.

Os trens regionais normalmente são os que apresentam maior massa quando comparados aos demais trens e apresentam a característica de ligar as regiões de subúrbio com as metrópoles.

Os trens de alta velocidade são trens utilizados para unir diferentes regiões que apresentam grandes distâncias entre si em um menor intervalo de tempo. Normalmente apresentam custo mais elevado para a sua utilização.

Os trens pendulares são veículos guiados sobre trilhos que apresentam em seu movimento um sistema que aumenta o conforto através da inclinação dos veículos em regiões com maior sobrelevação permitindo também uma maior velocidade de operação dos mesmos em vias comuns (FACINI, 2007).

Pode-se ainda classificar os veículos ferroviários de acordo com o seu tipo de guiagem. Estes tipos são apresentados na Figura 3.12.

Figura 3.12 - Sistema de Guiagem de Veículos (BARBOSA, 1999)

No presente trabalho serão abordados apenas os veículos guiados por roda cônica como apresentado na Figura 3.12.

3.2.2 - TRUQUE

O truque pode ser definido como a estrutura de sustentação do trem. É o elemento de contato com o trilho. Os seus componentes principais são: suspensão, estrutura e rodeiro. As figuras 3.13 e 3.14 apresentam estes componentes.

1 – Suspensão Secundária / 2 – Estrutura / 3 – Suspensão Primária

Figura 3.13 - Truque (Adaptada de ALMEIDA, 2006)

1 – Suspensão Secundária / 2 – Estrutura / 3 - Rodeiro

Figura 3.14 - Truque (Adaptada de PIRES, 2006)

3.2.3 - ELEMENTOS DE SUSPENSÃO

A suspensão pode ser dividida em suspensão primária e suspensão secundária. A suspensão primária, segundo Consoli (2007), é “o primeiro filtro de vibração” servindo para diminuir a transmissão ao veículo das altas vibrações. Nos veículos ferroviários esta suspensão normalmente é construída com molas que isolam as vibrações causadas pelo contato roda trilho como mostra a Figura 3.15.

Figura 3.15 - Suspensão Primária de Mola e Elastômero (CONSOLI, 2007)

A suspensão secundária é normalmente construída utilizando molas pneumáticas e isola as vibrações de baixa frequência provenientes da armação do truque, garantindo estabilidade de movimento e conforto aos passageiros (CONSOLI, 2007). A Figura 3.16 apresenta um exemplo de suspensão secundária.

Figura 3.16 - Suspensão secundária (Adaptado de CONSOLI, 2007 apud ANDERSON, 1992)

Em conjunto com a suspensão secundária, normalmente são utilizadas válvulas de nivelamento, que proporcionam o nivelamento dos vagões do veículo. Estas válvulas em conjunto com as hastes de ligação permitem a passagem de ar para a bolsa quando a distância entre a estrutura do truque e a caixa/vagão diminuem. Esta diminuição é causada pelo aumento da carga naquela região; com este aumento, ocorre o aumento da pressão na bolsa de ar e conseqüentemente o nivelamento.

A suspensão secundária não é utilizada em trens de carga, já que o balanceamento dos vagões dos carros é feito na carga do vagão e as cargas não se movimentam, diferentemente dos trens de passageiros em que as cargas são dinâmicas e este nivelamento e compensação do centro de massa deve ser realizado.

3.2.4 - ESTRUTURA

A estrutura do truque garante a fixação de todos os outros elementos, podendo ser de aço ou alumínio, sendo este componente de difícil fabricação devido ao seu tamanho elevado e necessidade de controle de fabricação para se evitar

problemas como trincas e requerendo, por exemplo, soldadores experientes e certificados ou máquinas de custo elevado para tal. Além disso, esta estrutura é de difícil inspeção devido a localização no veículo ferroviário e o seu tamanho elevado como pode ser observado nas figuras 3.13 e 3.14.

3.2.5 - RODEIRO

A estrutura formada pelo eixo, rodas e caixa de rolamentos recebe o nome de rodeiro. A Figura 3.17 apresenta um exemplo desse tipo de montagem.

Figura 3.17 - Rodeiro (PIRES, 2006)

Em truques motores, a caixa de engrenagens também é atribuída ao rodeiro, porém neste trabalho a análise da caixa de engrenagens é realizada no sistema de tração porque a mesma altera a transmissão de velocidade de rotação do motor de tração. Já o perfil da roda é importante na dirigibilidade do material rodante, podendo afetar também a taxa de desgaste do trilho e da roda, ou seja, segundo Almeida (2006), ao se mudar o raio dos pontos de contato e o ângulo de conicidade das rodas no contato, as forças tangencias também mudam. Este fator influencia no descarrilamento, como será apresentado na seção 4.1.

Nesta dissertação, serão estudadas rodas com perfil cônico que melhoram o auto-direcionamento do rodeiro. Além disso, apresentam frisos que limitam o movimento do rodeiro. Existindo normativas que determinam a geometria da roda, como por exemplo a norma UIC 510 – 2 OR (2004) intitulada *Trailing stock: wheels and wheelsets. Conditions concerning the use of wheels of various diameters* que trata perfis de roda de 300 mm a 1.000 mm apresentando também o carregamento permitido no eixo. Um exemplo dos parâmetros geométricos do perfil da roda é apresentado no APÊNDICE A.

Segundo a norma UIC 510 –2 OR (2004) existem especificações para o tipo de material a ser utilizado para a fabricação das rodas e também tratamentos especiais dependendo do uso. Outros aspectos abordados pela norma são os parâmetros quanto às dimensões da roda que devem ser respeitados para a operação segura do mesmo. A mesma menciona que rodas padrões (com diâmetros nominais maiores ou iguais a 840 mm) não necessitam de regulamentações especiais para a determinação de seus diâmetros. Para diâmetros nominais menores que 840 mm, são definidos parâmetros para os ângulos de ataque e forças laterais.

Normas como a UIC 813 O (2003) definem tolerâncias (por exemplo, as tolerâncias entre os eixos e furos apresentados no APÊNDICE B) e parâmetros de prensagem do conjunto eixo-roda presentes no material rodante. Para o rodeiro, segundo esta norma, são definidas as características mecânicas deste item, a resistência elétrica (não deve exceder $0,01 \Omega$), desbalanceamento, dimensões e ações de manufatura (como indicação do número serial, data de aceitação, marca de inspeção etc). Ademais, são apresentados os métodos de manufatura, parâmetros, inspeções dos componentes, inspeções da produção, inspeções das características dos rodeiros e conclusões das inspeções a serem realizadas, forma de entrega, forma em que deve ser fornecida a garantia e requerendo ao final um certificado quanto aos requisitos da especificação técnica.

3.3 - ACOPLAMENTO

O acoplamento ou engate é a estrutura de ligação entre os carros /vagões. Estes elementos sofrem forças decorrentes da movimentação do trem (tração, compressão, torção, flexão). Usualmente existem dois tipos de acoplamentos, os automáticos e os não automáticos. Os automáticos apresentam dispositivos para que o acoplamento seja realizado de forma remota; para tal, faz-se o uso de circuito elétricos e/ou pneumáticos que podem acionar dispositivos de união e/ou separação dos acoplamentos. Já os não automáticos não apresentam estes dispositivos sendo que a união e separação devem ser feitas manualmente com dispositivos de fixação como, por exemplo, parafusos.

A Figura 3.18 contempla um exemplo de engate automático.

Figura 3.18 - Engate Instalado no Trem

3.4 - SISTEMA DE TRAÇÃO E FRENAGEM

O sistema de tração é responsável pelo fornecimento de energia para o movimento do trem. Pode ser decomposto pelo sistema de atuação (motor / redutor) e pelo sistema de controle e comando (sensores, controladores de velocidade etc). Já o sistema de freio é aquele que retira energia cinética do trem, podendo ter atuação tanto elétrica como pneumática.

A atuação elétrica retira a energia cinética e devolve para a linha de alimentação ou dissipa a mesma através de energia térmica. Porém a atuação pneumática segue o princípio similar ao do automóvel com frenagem por atrito.

Normas como a UIC 544-1 OR (2004), UIC 544-2 OR (1983), UIC 541-1 OR (2003), UIC 541-3 OR (2004), UIC 541-4 OR (2004) e UIC 541-5 OR (2006) apresentam diversos aspectos que devem ser considerados durante o projeto e fabricação do sistema de freio do material rodante. Alguns aspectos principais descritos são:

- dimensões e características dos encanamentos de freio;
- características de torneiras e válvulas;
- características de acionamento do freio de emergência;
- tipos de pastilhas de freio e suas aplicações;
- características e sinalizações de aplicação de freio de emergência;
- requisitos para sistemas de auto-ajuste de freio;
- requisitos para o freio eletro pneumático;
- aspectos dos dispositivos elétricos de controle de freio;
- testes que podem ser aplicados e aprovação;
- avaliação do desempenho de frenagem para diferentes velocidades de operação e veículos;
- características de frenagem elétrica.

3.5 - OUTROS COMPONENTES DO TREM

Alguns sistemas do trem são apresentados na Figura 3.19.

Figura 3.19 - Diagrama Funcional de um Trem de Passageiros (FACINI, 2007)

CAPÍTULO 4 - DESCARRILAMENTO

O descarrilamento pode ser definido, segundo Iwnicky (2006), como o incidente no qual a roda perde a sustentação provida pelo trilho, podendo ser classificados como internos (quando a roda se movimenta para dentro da região determinada pelos trilho) ou externos (quando a roda se movimenta para fora da região determinada pelos trilho). É ainda possível classificar o descarrilamento quanto ao impacto, ou seja, se ocorreu em apenas em um rodeiro, se ocorreu em um truque ou se ocorreu no vagão inteiro.

Diversos fatores ou combinação de fatores podem causar este evento e uma estimativa das taxas de ocorrência do descarrilamento é apresentada na Tabela 4.1. Os valores desta tabela foram calculados com base na Tabela 4.2, que é um sumário de acidentes ou incidentes relacionados ao transporte ferroviário extraído do banco de dados de *Railway Safety Statistics* (2005).

Tabela 4.1 - Taxa de Acidentes dos Trens

Ano	Taxa de acidentes dos trens (FPMK)	Número total de acidentes	Número de descarrilamentos	Milhas percorrida por ano	Taxa de descarrilamento dos trens (FPMK) – (N° de descarrilamentos * 1.000.000 / Milhas percorridas por ano)	Taxa de descarrilamento dos trens (FPMK) – (FPMK / 1,6093)	Total de passageiros transportados (em milhões de passageiros)	N° de descarrilamentos * 1.000.000 / Passageiros transportados
1994	3,82	2.504	1.825	6,55x10 ⁸	2,78	1,73	393,600	4,64
1995	3,67	2.459	1.742	6,70 x10 ⁸	2,60	1,62	385,827	4,51
1996	3,64	2.443	1.816	6,71 x10 ⁸	2,71	1,68	397,394	4,57
1997	6,54	2.397	1.741	3,67 x10 ⁸	4,75	2,95	408,619	4,26
1998	6,77	2.575	1.757	3,80 x10 ⁸	4,62	2,87	439,958	3,99
1999	3,89	2.768	1.961	7,12 x10 ⁸	2,76	1,71	464,885	4,22
2000	4,13	2.983	2.112	7,22 x10 ⁸	2,92	1,82	501,750	4,21
2001	4,25	3.023	2.234	7,11 x10 ⁸	3,14	1,95	517,249	4,32
2002	3,76	2.738	1.989	7,28 x10 ⁸	2,73	1,70	503,930	3,95
2003	4,05	3.011	2.126	7,43 x10 ⁸	2,86	1,78	494,229	4,30
2004	4,38	3.373	2.427	7,70 x10 ⁸	3,15	1,96	513,291	4,73
2005	4,08	3.223	2.280	7,90 x10 ⁸	2,89	1,79	522,498	4,36

Tabela 4.2 - Sumário Histórico de Acidentes/Incidentes

Categoria	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
TOTAL GERAL												
Acidentes / incidentes	22465	19591	17690	16698	16501	16776	16919	16086	14403	14330	14467	13957
Taxa de incidentes (Total de acidentes ou incidentes * 1.000.000) /(milhagem total dos trens)	19,14	16,60	15,05	14,14	13,78	13,72	13,94	13,56	12,18	11,99	11,77	11,00
Mortes	1226	1146	1039	1063	1008	932	937	971	951	868	897	888
Condições não fatais	16812	14440	12558	11767	11459	11700	11643	10985	11103	9220	9108	9162
ACIDENTES COM TRENS												
Taxa de acidentes (Total acidentes * 1000000 / milhagem total dos trens)	3,82	3,67	3,64	3,54	3,77	3,89	4,13	4,25	3,76	4,05	4,38	4,08
Número Total	2504	2459	2443	2397	2575	2768	2983	3023	2738	3011	3373	3223
Mortes	12	14	25	17	4	9	10	6	15	4	13	33
Feridos	262	294	281	183	129	130	275	310	1884	228	306	734
Colisão	240	235	205	202	168	205	238	220	192	198	237	269
Descarrilamento	1825	1742	1816	1741	1757	1961	2112	2234	1989	2126	2427	2280
Causado pela via	911	856	905	879	900	995	1035	1121	941	972	1044	1074
Taxa de acidentes causada pela via	1,39	1,28	1,35	1,3	1,32	1,4	1,43	1,58	1,29	1,31	1,36	1,36
Causada por fator humano	911	944	783	855	971	1031	1147	1035	1050	1224	1354	1249
Causada por equipamento	293	279	318	271	307	321	372	427	367	362	427	365
Causada por sinalização	36	27	49	39	38	49	70	42	50	58	69	63
Dano aos equipamentos (milhões \$)	124850	134766	160908	152092	162561	164654	169172	200752	173982	198492	224634	222153
Dano à via (milhões \$)	43899	54458	51407	58637	71337	80435	94040	113713	92550	99392	100290	113589
Passageiros transportados (em milhões)	393,600	385,827	397,394	408,619	439,958	464,885	501,750	517,249	503,930	494,229	513,291	522,498

(RAILWAY SAFETY STATISTICS, 2005)

A Figura 4.1 apresenta o comportamento da taxa de acidentes e de descarrilamento dos trens, demonstrando que não há uma diminuição destes valores ao longo do tempo. Desta forma o presente trabalho tem importância no auxílio da diminuição da taxa de descarrilamento, evento este que pode ter como conseqüências o ferimento e morte de passageiros bem como perdas relacionadas a danos na via, no material rodante, na carga transportada, no meio ambiente etc.

Figura 4.1 - Comportamento da taxa de acidentes dos trens em termos de quilometragem (Adaptado de RAILWAY SAFETY STATISTICS, 2005)

É possível também representar a taxa de acidentes considerando o número de passageiros transportados. Nesta representação, conforme Figura 4.2, também é perceptível que não há uma diminuição destes valores ao longo dos anos, ou seja, estes mantêm-se aproximadamente constante.

Figura 4.2 - Comportamento da taxa de acidentes dos trens em termos de passageiros transportados (Adaptado de RAILWAY SAFETY STATISTICS, 2005)

A taxa de falha por cada tipo de causa pode ser obtida de Railway Safety Statistics (2005) e é relacionada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Causas do Descarrilamento em 2005

continua

Causa	N° de Ocorrências	Taxa de Falha (FPMM)	Taxa de Falha (FPMK)	Comentário
Geometria da via	399	0,505	0,314	Classificada como falha da via, neste caso devido à falha da geometria da via, podendo ser por projeto, instalação ou manutenção.
Trilho, talas de junção, dispositivos de fixação	381	0,482	0,300	Classificada como falha da via, neste caso devido a falhas das fixações.
Uso de Aparelhos de mudança	237	0,300	0,186	Classificada como falha humana por erro de no uso do AMV.
Jacarés, aparelhos de mudança de via, equipamentos de via	199	0,252	0,157	Classificada como falha da via, neste caso devido a aparelhos de mudança de via.
Regras de mudança	177	0,224	0,139	Classificada como falha humana por erro durante mudanças de via ou determinação errada das regras.
Condições operacionais não usuais	147	0,186	0,116	Classificada como falha causada por razões diversas.
Manobras do veículo ferroviário	121	0,153	0,095	Classificada como falha humana por manobra do veículo ferroviário.
Outras causas	75	0,095	0,059	Classificada como falha causada por razões diversas.
Truque	64	0,081	0,050	Classificada como falha do material rodante, neste caso devido a alguma falha do truque em geral.
Rodas	61	0,077	0,048	Classificada como falha do material rodante, neste caso devido a alguma falha das rodas do truque.

continuação

Causa	N° de Ocorrências	Taxa de Falha (FPMM)	Taxa de Falha (FPMK)	Comentário
Eixo e rolamentos	52	0,066	0,041	Classificada como falha do material rodante, neste caso devido a alguma falha dos eixos ou ao rolamentos do truque, como por exemplo travamento.
Velocidade	45	0,057	0,035	Classificada como falha humana por erro de aplicação de operação por maior ou menor demanda de tração.
Uso dos Freios	43	0,054	0,034	Classificada como falha humana por erro de aplicação de freio (maior demanda ou menor demanda). Ou seja, devido a maior velocidade de operação em determinado trecho ou a maior aplicação de freio.
Condições ambientais	37	0,047	0,029	Classificada como falha causada por razões diversas, neste caso por condições ambientais adversas.
Processos de carregamento	37	0,047	0,029	Classificada como falha causada por razões diversas, neste caso por falhas no carregamento da carga causando desequilíbrio no trem.
Acoplamento	33	0,042	0,026	Classificada como falha do material rodante, neste caso devido a alguma falha do sistema de acoplamento.
Assentamento da via	32	0,041	0,025	Classificada como falha da via, neste caso devido a falha de assentamento, por exemplo, falha no lastro ou sublastro.
Freios	26	0,033	0,020	Classificada como falha do material rodante, neste caso devido a alguma falha de freios (maior ou menor demanda).
Falha de sinalização	25	0,032	0,020	Classificada como falha de sinalização.
Estrutura	20	0,025	0,016	Classificada como falha do material rodante, neste caso devido a alguma falha da estrutura do trem, como por exemplo, a do truque.

conclusão

Causa	N° de Ocorrências	Taxa de Falha (FPMM)	Taxa de Falha (FPMK)	Comentário
Falha de identificação de sinalização fixa de via e comunicação de rádio	19	0,024	0,015	Classificada como falha humana causada por erro de operação na visualização e compreensão da sinalização e comunicação.
Miscelânea de Fatores Humanos	15	0,019	0,012	Classificada como falha humana.
Portas	14	0,018	0,011	Esta taxa de falha será considerada como participante do material rodante, mas julga-se que a classificação quanto ao componente (portas) não esteja corretamente classificada (a causa desta incoerência é abordada após a tabela).
Outros defeitos de via	13	0,016	0,010	Classificada como falha dos elementos de via.
Locomotivas	4	0,005	0,003	Falha atribuída a locomotiva e classificada como falha do material rodante.
Falha das autoridade de via	3	0,004	0,002	Falha classificada como falha humana, sendo relacionada com o erro de autorizações de movimentação.
Condições físicas dos empregados	1	0,001	0,001	Classificada como falha humana.
Total	2280	2,886	1,793	Mesmos valores apresentados na Tabela 4.1.

(RAILWAY SAFETY STATISTICS, 2005)

O uso de bancos de dados deve ser avaliado com cuidado, pois os mesmos podem ser baseados em registros cadastrados com pouco critério a respeito da real causa do descarrilamento, ou ser registrado por pessoas inexperientes quanto ao trato dessas informações. Além disso, durante um evento descarrilamento, os componentes causadores deste evento podem ser destruídos ou comprometidos devido aos estragos que o acidente pode causar, dificultando assim a real identificação do item que gerou o mesmo.

Em suma, as falhas do descarrilamento podem ser agrupadas segundo Tabela 4.4 e Figura 4.3.

Tabela 4.4 - Causas Sucintas do Descarrilamento em 2005

Causa	Número de Falha	Taxa de Falha (FPMM)	Taxa de Falha (FPMK)
Fatores Humanos	661	0,837	0,520
Sinalização	25	0,032	0,020
Defeitos de Via	1024	1,296	0,805
Falha Mecânica ou elétrica do Material Rodante	274	0,347	0,216
Diversas	296	0,375	0,233
Total	2280	2,886	1,794

(*RAILWAY SAFETY STATISTICS*, 2005)

Figura 4.3 - Causas Sucintas do Descarrilamento em 2005 (*RAILWAY SAFETY STATISTICS*, 2005)

Nesta dissertação não são tratadas as falhas humanas, pois o foco do estudo está nas falhas decorrentes dos elementos de via ou do material rodante. Além disso, a metodologia apresentada neste trabalho não seria totalmente aplicável a análise da confiabilidade humana. Para esta análise humana utilizam-se metodologias como a técnica para a predição de taxas de erros humanos (THERP), programa de avaliação de seqüências de acidentes (ASEP), árvores de ações do operador (OAT) entre outras, sendo portanto diferentes das utilizadas neste estudo.

Estas causas podem ainda ser agrupadas no diagrama de árvore de falhas estabelecido na Figura 4.4. Nesta figura, as taxas de falhas (r) estão estabelecidas em falhas por milhas.

Figura 4.4 - FTA de Descarrilamento

Corroborando com as discussões dos principais causadores do descarrilamento, Wagner (2004) dividiu os causadores do descarrilamento nos seguintes grupos:

- falha de projeto, componente ou manutenção;
- falha de carregamento, fluidos transportados que podem causar desbalanceamento ou incertezas não consideradas no carregamento;
- dinâmica de interação entre a via e o veículo;
- critérios de descarrilamento atendidos que serão apresentados no 4.1;
- dinâmica do trem como impacto, vibrações e forças não previstos;
- fatores humanos como erro de operação;
- combinação destes fatores.

Os fatores humanos podem ser divididos em falha de operação e falha de manutenção. Já a falha de operação (como por exemplo, no balanceamento e distribuição dos fluídos transportados) não é objeto de análise deste trabalho.

Nesta dissertação, por haver uma maior riqueza de dados da *Railway Safety Statistics* (2005), a mesma será utilizada ao invés de dados da ANTT. Esta opção pode causar uma perda de aderência quanto às informações apresentadas, pois o banco de dados utilizado pode não refletir o cenário brasileiro das causas dos acidentes e das causas dos descarrilamentos. Entretanto, o uso deste banco de dados americano é válido já que o mesmo apresenta maior detalhamento quanto às causas do descarrilamento e indica de formas gerais os principais causadores do evento (diferentemente da referência brasileira), além disso, o foco desta dissertação não é o valor da taxa de ocorrência do descarrilamento, pois este trabalho tem como objetivo a aplicação do método de análise de risco a um acidente ferroviário.

A seguir serão apresentados alguns critérios de descarrilamento, porém pela metodologia adotada, o foco principal da análise será a aplicação da metodologia de análise de risco aplicada aos componentes e sistemas tanto do material rodante quanto da via.

4.1 - CRITÉRIOS DE DESCARRILAMENTO

Diversos autores como Iwnicky (2006), Wagner (2004) e Almeida (2006) abordam critérios de descarrilamento em seus estudos. Os critérios apresentados neste trabalho são os mesmos considerados por Iwnicky (2006), que aborda o descarrilamento por falha de parâmetros do contato roda e trilho, e são:

- descarrilamento por sobreposição do flange da roda sobre o trilho, que é um critério relacionado ao descarrilamento externo;
- descarrilamento por dimensão indevida da bitola e rolamento do trilho, que é um critério relacionado ao descarrilamento interno;
- descarrilamento causado por Aumento da Bitola, que é um critério relacionado ao descarrilamento interno;
- descarrilamento por Instabilidade Lateral do Veículo, que está relacionado tanto ao descarrilamento interno quanto externo.

A distribuição dos incidentes ocorridos relacionados com os critérios acima é apresentada na Tabela 4.6 (IWNICKY, 2006).

Tabela 4.6 - Distribuição de Acidentes de acordo com os Critérios de Descarrilamento

Ano	Número de Incidentes Considerados	Dimensão indevida da bitola e rolamento do trilho	Aumento da Bitola	Instabilidade Lateral	Sobreposição do Flange	Outras Causas
2000	3193	295	46	7	13	985
1999	2924	234	52	6	18	914
1998	2745	189	54	3	6	770
Soma	9972	718	152	16	37	2669

(IWNICKY, 2006)

Considerando os quatro critérios que serão estudados, a Tabela 4.6 apresenta como maior causador do descarrilamento a dimensão indevida da bitola e rotação do trilho. Conforme será discutido em 4.1.2, às dinâmicas de interação entre o veículo ferroviário e a via estão relacionadas com estes critérios de descarrilamento, sendo que esta dinâmica acaba sendo afetada por falha nos fatores de via, do material rodante, por fatores humanos (por exemplo falha de manutenção), entre outros. Estas causas também foram apresentadas na Tabela 4.3.

4.1.1 - SOBREPOSIÇÃO DO FLANGE DA RODA SOBRE O TRILHO

O descarrilamento por sobreposição do flange é um critério que considera a razão entre a força horizontal e a força vertical. Estas forças surgem devido ao contato que ocorre entre a roda e o trilho (IWNICKY, 2006). A quantificação da razão para a geração de uma instabilidade não será realizada nesta dissertação.

A elevada força lateral é atribuída ao grande ângulo de ataque e distribuição irregular das massas do truque. Este fenômeno é determinado principalmente pelo raio de curvatura, o perfil da roda e trilho, as características da suspensão do truque e da velocidade do veículo. A definição para que ocorra a sobreposição do flange baseado no critério de Nadal é estabelecida através da relação L/V , ou seja, a relação entre a força lateral e a força vertical.

O critério de Nadal é equacionado a seguir baseado na relação L/V :

- Considerando a Figura 4.5 que representa as forças L (força horizontal de contato), V (força vertical de contato), F_3 (força de reação normal a superfície de contato) e F_2 (força de reação tangente a superfície de contato).
- Estas forças são equacionadas nas equações (4.1) e (4.2):

$$F_3 = V \cos \delta + L \sin \delta = V \left(\cos \delta + \frac{L}{V} \sin \delta \right) \quad (4.1)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} F_2 = V \sin \delta - L \cos \delta = V \left(\sin \delta - \frac{L}{V} \cos \delta \right) & \text{quando } (V \sin \delta - L \cos \delta) < \mu \cdot F_3 \\ F_2 = \mu \cdot F_3 & \text{quando } (V \sin \delta - L \cos \delta) \geq \mu \cdot F_3 \end{array} \right. \quad (4.2)$$

- Assim, é obtida a equação (4.3) para a relação L/V :

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan \delta - \frac{F_2}{F_3}}{1 + \frac{F_2}{F_3} \tan \delta} \quad (4.3)$$

- A relação de Nadal foi proposta considerando a relação $F_2/F_3 = \mu$, obtendo-se assim a expressão (4.4).

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan \delta - \mu}{1 + \mu \tan \delta} \quad (4.4)$$

Figura 4.5 - Forças de Contato Para o Critério de Nadal (IWNICKY, 2006)

Neste critério, o descarrilamento depende do ângulo de contato do flange com o boleto δ e do coeficiente de atrito entre roda e trilho μ . Ou seja, quando a relação L/V resultar em um valor menor que o determinado pela equação (4.4), o descarrilamento não ocorre. Porém, este critério de Nadal é eficiente para grandes ângulos de ataque e é bastante conservativo para pequenos ângulos de ataque. A quantificação da magnitude do ângulo de ataque é realizada pelo levantamento de curvas que dependem das características do veículo. Um exemplo desta curva é apresentado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Exemplo de Curva do Efeito do Ângulo de Ataque no limite da relação L/V (IWNICKY, 2006)

Outros critérios para a sobreposição do flange já foram estabelecidos, como por exemplo, o critério de Weinstock, critério de FRA entre outros. Para o problema de sobreposição do flange, Barbosa (2004) e Barbosa (2005) propuseram um critério de segurança quanto ao descarrilamento considerando as forças de contato em uma abordagem em 3 dimensões devido à limitação que o critério de Nadal apresenta (ser bastante conservativo e funcionar bem apenas com grandes ângulos de ataque e grandes coeficientes de atrito).

A formulação do problema foi baseada na definição de uma referência móvel ortonormal $O\vec{X}\vec{Y}\vec{Z}$ conforme a Figura 4.7. Nesta referência, $\vec{X}$ está alinhado com o vetor velocidade e o plano determinado por $\vec{Y}\vec{Z}$ contém o centro da curva. Outra referência $c\vec{x}\vec{y}\vec{z}$ apresenta a origem c no ponto de contato da roda com o trilho, o plano $\vec{y}\vec{z}$ sendo vertical e paralelo ao eixo e o eixo $\vec{z}$ perpendicular ao plano de contato. Quando ocorre o movimento do rodeiro, a rotação em torno do eixo $\vec{Z}$ causa um ângulo ψ entre $\vec{X}$ e $\vec{x}$. Já a rotação em torno de $\vec{x}$ causa o ângulo α entre o plano de contato da roda com o trilho e o eixo $\vec{Y}$.

Este critério é apresentado na equação (4.5):

$$\frac{L}{V} = \frac{A\mu - B \tan \alpha}{B + A\mu \tan \alpha} \quad (4.5)$$

A equação (4.5) é complementada por (4.6) e (4.7).

$$A = k_x \sin \psi + (1 + k_y) \cos \psi \quad B = \sqrt{k_x^2 + 1 + 2k_y + k_y^2} \quad (4.6)$$

$$k_x = \frac{T_x}{T_L} \quad k_y = \frac{T_\omega}{T_L} \quad (4.7)$$

T_x é a componente da força de atrito T no eixo $\bar{x}$, T_w é a componente da força T referente ao escorregamento rotacional e T_L é a componente da força T referente ao escorregamento lateral.

Figura 4.7 - Referências Móveis e Fixas e Vetores de Força (BARBOSA, 2004)

4.1.2 - DIMENSÃO DO BITOLA E ROTAÇÃO DO TRILHO

Os descarrilamentos por bitola indevida e rotação do trilho ocorrem devido às deflexões do trilho ou à distância indevida entre os trilhos quando comparado à bitola. Isso pode ser causado pelas forças laterais que ocorrem ou por erros de projeto e/ou manutenção.

Existem diversos critérios definidos para o descarrilamento por bitola indevida e por rotação do trilho. Os critérios que serão apresentados são o critério apresentado em Iwnicky (2006) apud AAR (1993), o critério da dimensão da bitola e o de desgaste irregular do perfil. Para a rotação do trilho, o critério apresentado no capítulo XI do AAR é estabelecido empregando também a relação L/V ; nele é assumido que o trilho apresenta rotação causada pelas forças de contato. O momento torsor, considerando a Figura 4.8, é expresso na equação (4.8):

$$M = Vd - Lh \quad (4.8)$$

No equilíbrio, o momento pode ser aproximado a zero. Logo é obtida a equação (4.9).

$$\frac{L}{V} = \frac{d}{h} \quad (4.9)$$

Assim, o descarrilamento ocorre quando o valor da relação L/V é maior que o valor da relação d/h .

Figura 4.8 - Forças na Rotação do Trilho (IWNICKY, 2006)

O critério de desgaste irregular do perfil da roda é definido como a diferença radial entre a extremidade do perfil da roda e a região central da mesma. Neste caso, como mostrado na Figura 4.9, ocorre um contato indevido entre a roda e trilho, causando um momento torsor indevido e podendo também causar rotação do trilho.

Figura 4.9 - Exemplo de Falso Contato entre Roda e Trilho (IWNICKY, 2006)

O critério da dimensão da bitola está apresentado na equação (4.10).

$$G \geq B + W + f_w \quad (4.10)$$

sendo G , B , W e f_w apresentados na Figura 4.10.

Figura 4.10 - Parâmetros Considerados na Equação (4.10) (IWNICKY, 2006)

Neste caso, é atribuída uma dimensão de segurança S para que este critério não seja atendido e não provoque descarrilamento. Esta dimensão é expressa pela equação (4.11).

$$(B + W + f_w) - G > S \quad (4.11)$$

Ademais, combinando os critérios apresentados por Iwnicky (2006) conforme descritos nesta seção, pode-se relacionar a equação (4.11) e o tombamento angular do trilho (t) causado pela rotação do trilho, adicionando-se uma parcela nesta equação conforme (4.12).

$$(B + W + f_w) - (G + t) > S \quad (4.12)$$

4.1.3 - DESCARRILAMENTO POR AUMENTO DA DIMENSÃO DA BITOLA

O descarrilamento causado pelo aumento da dimensão da bitola é causado pelo aumento gradual desta distância devido à falha de componentes de via (podendo ser relacionados com a qualidade dos dormentes, falha nas fixações e desgaste do trilho). Este aumento da bitola é causado principalmente pela baixa resistência dos elementos de via. A Figura 4.11 ilustra este tipo de aumento da distância da bitola.

Figura 4.11 - Aumento da Dimensão da Bitola (IWNICKY, 2006)

4.1.4 - INSTABILIDADE LATERAL DO VEÍCULO

A instabilidade lateral do veículo é causada pelo desalinhamento do eixo em relação à via, e devido ao perfil cônico da roda, este movimento acaba seguindo um perfil senoidal, desta forma, caso seja elevado, pode causar o descarrilamento. Este fenômeno também é conhecido como *hunting*, caracterizado pela variação em torno da linha central de equilíbrio.

Figura 4.12 - Instabilidade Lateral do Veículo (ALMEIDA, 2006)

Tal fenômeno normalmente ocorre em veículos leves e depende de parâmetros de via e do veículo, como por exemplo, a massa do veículo, momento de inércia do rodeiro, rigidez da suspensão primária, raio de rolamento das rodas, conicidade, bitola da via e rigidez do contato.

CAPÍTULO 5 - DESCRIÇÃO DO MÉTODO

5.1- INTRODUÇÃO

As simulações computacionais são uma importante ferramenta da engenharia para prever os comportamentos e reações dos sistemas. Estas simulações são aplicadas desde a década de 80. Porém, o comportamento dinâmico em simulações operacionais, dependendo do número de variáveis que o modelo em estudo apresenta, pode apresentar um custo operacional grande, o que encarece o valor da simulação e pode tornar este tipo de ferramenta pouco viável em licitações de aquisição de sistema ferroviários que apresentam como primeira escolha a oferta do menor preço.

Uma alternativa para estas simulações computacionais é a simulação real do sistema. Esta simulação de operação pode ser realizada tanto na via original em que o sistema operará ou em uma via propriamente construída para esta simulação. Este tipo de alternativa é requerida em diversas especificações técnicas de operadoras de transporte ferroviário, sendo realizados através de equipamentos no veículo e na via como sensores, por exemplo, acelerômetros, esforcímetros etc.

Algumas normas podem ser aplicadas para realizar a da operação, por exemplo, para a simulação de via, segundo Iwnicki (2006), é possível utilizar o Capítulo XI do *Manual of Standard and Recommended Practices* (que foi aprovado pela *Association of American Railroads*). Neste documento são estabelecidas as condições de testes que incluem:

- *hunting* (instabilidade lateral do veículo);
- curva constante;
- espiral;
- giro;
- *pitch*;
- *yaw*, *sway* e
- curva em movimento.

A norma UIC 518 OR estabelece as diretrizes dos testes a serem realizados na dinâmica do movimento em termos de segurança, fadiga da via e comportamento quanto ao movimento. O processo de aprovação de um veículo ferroviário, segundo esta norma, é apresentado no APÊNDICE C.

Conforme discutido em 2.2, no Brasil não existe a figura da autoridade ferroviária, órgão máximo e responsável final pela regulamentação para a operação de um sistema ferroviário (IEC 62278, 2002), desta forma, é comum transferir as responsabilidades de aceitação para as empresas que estão adquirindo o material rodante. Ademais, cada empresa que adquire o material rodante ou cada empresa que é responsável pela operação dos mesmos pode definir seus próprios critérios de aceitação quando da ausência desta figura ferroviária.

Para tal, normas como EN 50126 (2000), MIL-STD-882C (1993) e IEC 62278 (2002) baseada na norma EN 50126, apresentam formas de gerenciamento e condução de estudos de segurança que podem ser considerados, cabendo à autoridade ferroviária estipular se as mesmas serão aceitas.

Desta forma, é proposto um método de análise de risco aplicada ao descarrilamento que complementa as simulações computacionais e simulações dinâmicas de forma a tornar mais seguro o transporte ferroviário que não apresenta diminuição da taxa de descarrilamentos conforme demonstrado em Figura 4.1. Esta metodologia é apresentada no item 5.2.

5.2 - MÉTODO

O método de análise de risco ora proposto, aplicado ao descarrilamento, considera as seguintes etapas: entendimento do problema e identificação dos elementos sob análise, análise de causa e consequência, elaboração de FTA, elaboração de FMECA e proposta de cálculo da probabilidade de ocorrência do evento. O fluxograma que descreve este método é apresentado na Figura 5.1.

Figura 5.1: Método Proposto

O entendimento do problema e identificação dos elementos sob análise se fazem necessários pois conforme já apresentado em 2.1.1, a confiabilidade é a probabilidade de um item executar a sua função sob condições pré-definidas de uso e manutenção por um período de tempo específico; ou seja, para o estudo da confiabilidade é necessário o entendimento das funções do sistema bem como os mecanismos que podem causar a falha (no caso o descarrilamento) do mesmo. Esta

discussão sobre o problema foi realizada no CAPÍTULO 4, em que se discorre sobre a definição de descarrilamento, as taxas de falha que o transporte ferroviário apresenta no cenário atual, componentes participantes do perigo, bem como diferentes critérios de descarrilamento já desenvolvidos.

A análise de causa e consequência (realizada no item 6.1.), cuja definição e explicação se encontram no item 2.2, tem por objetivo identificar nos fluxogramas disponíveis os perigos presentes, ou seja, através da compilação em um formato visual os eventos que podem influenciar na ocorrência do perigo estudado e para detalhamento destes eventos, faz-se uso primeiramente da análise do tipo FTA para sintetizar de maneira simples os fatores que causam o evento e após esta análise, utiliza-se a FMEA para obtenção dos mecanismos de falhas que geram estes fatores.

A elaboração e análise por árvore de falhas (FTA), cujos conceitos foram abordados em 2.1.3, visa auxiliar a análise de causa e consequência e permitir uma rápida identificação visual dos eventos que causam o evento topo analisado, identificar em um nível mais detalhado as causas do evento e permitir a familiarização do estudo do descarrilamento. O FTA é construído no item 6.2.

As análises dos modos e efeitos de falha (FMEA), cujos conceitos foram abordados em 2.1.2, tem por objetivo complementar as análises de causa e consequência e as análises por árvore de falhas de forma a permitir além da identificação dos componentes que podem vir a causar o descarrilamento, possibilitar a identificação dos modos de falha destes componentes, as possíveis causas destes modos de falha, os efeitos dos mesmos no sistema e os possíveis modos de detecção e ações de gerenciamento para as falhas. Ou seja, é uma análise que possibilita um maior detalhamento quanto ao problema. Estas análises são realizadas no item 6.2.

A elaboração de análises do tipo FMEA com posterior análise do tipo FTA não foi realizada (optando-se pela ordem inversa) pois teve-se como objetivo através da FTA primeiramente a definição dos eventos que seriam abordados na FMEA.

Ao final, é proposto um método de cálculo da probabilidade de falha de um componente baseado no método probabilístico condicionado avançado, conforme os conceitos apresentados no item 11. Este método é um ponto de equilíbrio entre o método semi probabilístico (que utiliza fatores de segurança parciais para as variáveis empregadas no modelo) e o método probabilístico puro (que considera todas as possíveis configurações de colapso). Esta aplicação do método é realizada no item 7.5. Desta forma é possível avaliar o custo e o benefício em termos de confiabilidade de uma solução proposta.

CAPÍTULO 6 - APLICAÇÃO DO MÉTODO: CASO-ESTUDO

6.1 - ANÁLISE DE CAUSA E CONSEQÜÊNCIA - DESCARRILAMENTO

Diferentemente da abordagem em que são estudados os critérios de descarrilamento e a determinação quantitativa das forças e parâmetros para se investigar a ocorrência ou não de um descarrilamento, esta dissertação discutirá o problema de descarrilamento por análise de risco pelo método de análise de causa e conseqüência. O diagrama de causa e conseqüência é apresentado na Figura 6.1.

Esta análise, apesar de não apresentar os valores quantitativos dos parâmetros como, por exemplo, pelo critério de Nadal, apresentará os itens que contribuem para o descarrilamento e os métodos de prevenção propondo assim uma abordagem com foco nos componentes e não na dinâmica de operação.

Esta abordagem apresenta limitações quanto à dificuldade da determinação quantitativa de variáveis que indicariam o descarrilamento, porém é eficiente para avaliação dos componentes que influenciam neste evento uma vez que identifica através de análises do tipo FTA e do FMEA. Neste diagrama, divide-se a análise em dois principais ramos: análise do material rodante e análise dos elementos de via.

As análises de cada subsistema apresentado no diagrama de causa e conseqüência na Figura 6.1 são realizadas no item 6.2.

Figura 6.1 - Diagrama Causa Conseqüência – Descarrilamento

O diagrama de causa e consequência iniciou com as falhas que podem gerar um descarrilamento, separando primeiramente em falhas da via e em falhas dos demais componentes. Através de perguntas cujas respostas devem ser “sim” ou “não”, é elaborado o mesmo, sendo que a primeira pergunta está relacionado com a via que participa com 45% das causas do descarrilamento conforme Figura 4.3.

Caso haja uma resposta negativa quanto ao descarrilamento decorrente dos elementos de via, é questionado se a causa é proveniente do material rodante, sendo detalhados os diferentes sistemas que contribuem para o descarrilamento, e em caso negativo quanto ao material rodante, é questionado quanto às falhas humanas e de sinalização.

6.2 - ANÁLISES DO TIPO FTA E FMEA

Os eventos indicados no digrama de causa e consequência da Figura 6.1 são apresentados nesta seção. Além das análises do tipo FTA, são apresentadas também, para uma análise mais completa do problema envolvido, análises do tipo FMEA para compreensão do problema. Nestas análises são abordadas apenas as falhas que apresentam maior probabilidade de estarem relacionadas ao descarrilamento.

6.2.1 - ELEMENTOS DE VIA

A árvore de falhas referente aos elementos de via está apresentada na Figura 6.2. Nesta figura são representadas as combinações de falhas referentes aos elementos de via que podem gerar um descarrilamento.

Figura 6.2 - FTA - Falha dos Elementos de Via

A Tabela 6.1.apresenta os modos de falha para cada item/componente, com uma descrição de cada modo de falha e da fonte de referência que foi obtido o respectivo modo de falha.

A fonte de referência mais utilizada para os modos de falha foi a FMD-97 (1997). No APÊNDICE E são apresentados os trechos deste banco de dados referentes a componentes descritos nesta tabela. Além disso, uma parte das referências os modos de falha foram provenientes de hipóteses e outras da referência Reliability Toolkit (1995). Há ainda uma parte proveniente do trabalho de Porto (1984). Os modos de falha considerados e suas fontes são apresentados na Tabela 6.1.

Como ressalva, não foram considerados todos os modos de falha apresentados por Porto (1984) conforme descrito no item 3.1.7 pois, de acordo com o julgamento, os demais modos de falha não influenciam o descarrilamento.

É importante observar que para vias que não apresentam talas de junção dos trilhos, ou seja, os trilhos não apresentam emendas aparentes, os modos de falha considerados neste trabalho são os mesmos dos trilhos com junções aparentes.

Tabela 6.1 - Elementos de Via - Modos de falha considerados e referências

continua

Item	Função	Modo de Falha	Descrição	FONTE
Trilho	Elemento de contato entre a roda causando o contato metal-metal. Serve de sustentação para o material rodante	Quebrado	Trilho quebrado ou com danos estruturais com possíveis causas descritas em 3.1.2	FMD-97 (1997)
Aparelho de mudança de via	Permitir a alteração de rota do trem	Mudança incompleta	Falha que ocorre quando há demanda para mudança, porém o AMV se movimenta, mas não até a sua posição final correta	Hipótese
		Perda das características geométricas	Falha caracterizada pela alteração geométrica do componente de forma a causar discontinuidades na via	Hipótese
		Posição errada	Deslocamento indevido do aparelho de mudança de via sem uma demanda efetiva do dispositivo de controle ou não alteração da posição quando demandado	Hipótese

conclusão

Item	Função	Modo de Falha	Descrição	FONTE
Dormente	Distribuir a carga no lastro, garantir a bitola, garantir estabilidade e amortecer as vibrações.	Falha na distribuição da carga no lastro	Falha do dormente causando distribuição errada de carga no lastro.	Hipótese
		Não garante a bitola	Falha do dormente de modo a não garantir a bitola da via	Hipótese
Fixação	Garantir a fixação entre os trilhos e as bitolas	Junção – Quebrada	Junção quebrada ou com danos estruturais	FMD-97 (1997)
		Junção - desgastada	Junção desgastada, permitindo jogo excessivo	FMD-97 (1997)
		Junção - Trincada	Junção com trincas	FMD-97 (1997)
		Junção – Vibração excessiva	Junção permite uma vibração excessiva do conjunto montado	FMD-97 (1997)
		Junção - Quebrada	Junção quebrada ou com danos estruturais	FMD-97 (1997)
Tala de junção	Montadas nas almas, unem os trilhos	Junção - desgastada	Junção desgastada, permitindo jogo excessivo	FMD-97 (1997)
		Junção - Trincada	Junção com trincas	FMD-97 (1997)
		Junção – Vibração excessiva	Junção permite uma vibração excessiva do conjunto montado	FMD-97 (1997)
Lastro Sublastro	Distribuir os esforços nos dormentes, permitir a manutenção do nivelamento da via e drenagem. Impedir que ocorra a difusão de lama na direção vertical com sentido para cima.	Ruptura geral	É caracterizada pela ruptura da infra-estrutura podendo ocasionar deslocamento de material para o lado da via ou para a região entre os dormentes.	Porto (1984)
		ruptura do lastro.	A ruptura do lastro é causada pelo acúmulo de partículas finas produzidas pelo desgaste do lastro ou de algum outro depósito, impedindo a drenagem podendo causar a formação de lubrificante. A lama produzida facilita o deslocamento do lastro e pode causar a ruptura do mesmo.	Porto (1984)
Geometria	Determinar as características geométricas	Raio da curva menor que o mínimo	Raio de curvatura menor que o permitido por normas.	Hipótese
		Sobre-elevação elevada	Sobre-elevação maior que a permitida por normas	Hipótese

A Tabela 6.2 apresenta a implementação da análise do tipo FMEA para os elementos de via.

Tabela 6.2 - FMEA dos Elementos de Via

continua

Sistema: Elementos de Via												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
EV1-A	Trilho	Elemento de contato entre a roda causando o contato metal-metal. Serve de sustentação para o material rodante	Quebrado	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Perda de função	Aumento da bitola ou rotação do trilho. Descontinuidade dos trilhos	Pode ocorrer descarrilamento pela descontinuidade do trilho. Possível descarrilamento por aumento da bitola ou rotação do trilho.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV1-B				Erro de manufatura (vazio, segregações, inclusões e fissura transversais)					Controle de qualidade dos itens. Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade e inspeções durante manufatura. Deve haver correto controle do processo, por exemplo utilizando-se massalotes para evitar o fenômeno de vazio ou uso de material adequado para evitar a segregação.	I	
EV1-C				Erro de montagem					Testes operacionais. Inspeções de qualidade	Inspeção em controle de qualidade. Estudos e testes.	I	
EV1-D				Erro de manutenção (deformação das pontas, autotêmpera superficial, escoamento do metal na superfície do boleto, desgaste da ação e do patim por ação química, desgaste dos trilhos por atrito e fratura dos trilhos)					Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. O manual deve contemplar este item e os funcionários devem receber correto treinamento para a atividade	I	

continuação

Sistema: Elementos de Via													
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas	
						Item	Sistema	Trem					
EV2-A	Aparelho de mudança de via	Permitir a alteração de rota do trem	Mudança incompleta	Falha de manutenção	Em movimento	Componente não realiza corretamente a função	Perda da continuidade da via	Possível descarrilamento por não haver continuidade dos trilhos	Detectável em manutenção periódica	Correto treinamento da equipe de manutenção. Correto manual de manutenção. Inserção de sinalização quanto à posição do AMV	I		
EV2-B				Falha de projeto						Verificação dos cálculos e certificados	Projeto deve atentar para o perigo e realizar o dimensionamento correto. Projeto pode inserir monitoramento da posição do AMV.	I	
EV2-C			Perda das características geométricas	Falha de montagem	Em movimento	Componente não realiza corretamente a função	Perda da continuidade da via	Possível descarrilamento por não haver continuidade dos trilhos	Detectável em testes de via e inspeções visuais	Inspeção visual após a montagem Simulação dinâmica do trem na via construída. Projeto pode inserir monitoramento da posição do AMV.	I		
EV2-D				Falha de manutenção					Detectável em manutenção periódica	Correto treinamento da equipe de manutenção. Correto manual de manutenção. Projeto pode inserir monitoramento da posição do AMV.	I		
EV2-E				Falha de projeto					Verificação dos cálculos e certificados	Projeto deve atentar para o perigo e realizar o dimensionamento correto. Projeto pode inserir monitoramento da posição do AMV.	I		
EV2-F			Posição errada	Falha de montagem	Em movimento	Componente não realiza corretamente a função	Perda da continuidade da via	Possível descarrilamento por não haver continuidade dos trilhos	Detectável em testes de via e inspeções visuais	Inspeção visual após a montagem Simulação dinâmica do trem na via construída. Projeto pode inserir monitoramento da posição do AMV.	I		
EV2-G				Falha de manutenção					Detectável em manutenção periódica	Correto treinamento da equipe de manutenção. Correto manual de manutenção. Projeto pode inserir monitoramento da posição do AMV.	I		

continuação

Sistema: Elementos de Via												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
EV3-A	Dormente	Distribuir a carga no lastro, garantir a bitola, garantir estabilidade e amortecer as vibrações.	Falha na distribuição o da carga no lastro	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Componente não realiza corretamente a função	Possível desnivelament o da via	Pode ocorrer o descarrilamento devido ao desnível e devido a isso, desnivelamento da via ou instabilidade no movimento	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV3-B				Erro de manufatura ou montagem					Simulação do movimento. Testes operacionais. Inspeções de qualidade	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV3-C				Erro de manutenção					Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. Deve haver manual com informações claras.	I	
EV3-D			Não garante a bitola	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Componente não realiza corretamente a função	Possível desnivelament o da via	Pode ocorrer o descarrilamento devido ao desnível e devido a isso, desnivelamento da via ou instabilidade no movimento	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV3-E				Erro de manufatura ou montagem					Simulação do movimento. Testes operacionais. Inspeções de qualidade	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV3-F				Erro de manutenção					Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. Deve haver manual com informações claras.	I	

continuação

Sistema: Elementos de Via												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
EV4-A	Fixação	Garantir a fixação entre os trilhos e as bitolas	1 - Junção – Quebrada	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Componente não fixa o trilho pelo período determinado	Aumento da bitola ou quando em diversos itens rotação do trilho	Possível descarrilamento por aumento do tamanho da bitola ou por rotação do trilho e aumento da bitola	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Pedido de certificados, por exemplo, dos materiais utilizados.	I	
EV4-B			2 - Junção - Trincada	Erro de manufatura ou montagem					Simulação do movimento. Testes operacionais. Inspeções de qualidade	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV4-C				Erro de manutenção					Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. Deve haver manual com informações claras.	I	
EV4-D			Junção – desgastada	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Componente não fixa o trilho pelo período determinado	Aumento da bitola ou quando em diversos itens rotação do trilho	Possível descarrilamento por aumento do tamanho da bitola ou por rotação do trilho e aumento da bitola	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Pedido de certificados, por exemplo, dos materiais utilizados.	I	
EV4-E				Erro de manutenção					Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. Deve haver manual com informações claras.	I	
EV4-F			Junção – Vibração excessiva	Erro de montagem	Em movimento	Componente não fixa o trilho pelo período determinado	Aumento da bitola ou quando em diversos itens rotação do trilho	Possível descarrilamento por aumento do tamanho da bitola ou por rotação do trilho e aumento da bitola	Simulação do movimento. Testes operacionais. Inspeções de qualidade	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV4-G				Erro de manutenção					Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. Deve haver manual com informações claras.	I	

continuação

Sistema: Elementos de Via												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
EV5-A	Tala de junção	Montadas nas almas, unem os trilhos	1 - Junção – Quebrada	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Componente não une os trilhos pelo período determinado	Aumento da bitola ou quando em diversos itens rotação do trilho.	Pode ocorrer descarrilamento pela descontinuidade do trilho.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Pedido de certificados, por exemplo, dos materiais utilizados.	I	
EV5-B			2 - Junção - Trincada	Erro de manufatura ou montagem			Pode causar descontinuidade do trilho	Possível descarrilamento por aumento da bitola ou rotação do trilho.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Inspeções de qualidade	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV45C				Erro de manutenção				Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. Deve haver manual com informações claras.	I		
EV5-D			Junção – desgastada	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Componente não une os trilhos pelo período determinado	Aumento da bitola ou quando em diversos itens rotação do trilho.	Pode ocorrer descarrilamento pela descontinuidade do trilho.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Pedido de certificados, por exemplo, dos materiais utilizados.	I	
EV5-E				Erro de manutenção			Pode causar descontinuidade do trilho	descarrilamento por aumento da bitola ou rotação do trilho.	Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. Deve haver manual com informações claras.	I	
EV5-F			Junção – Vibração excessiva	Erro de montagem	Em movimento	Componente não une os trilhos pelo período determinado	Aumento da bitola ou quando em diversos itens rotação do trilho.	Pode ocorrer descarrilamento pela descontinuidade do trilho.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Inspeções de qualidade	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV5-G							Erro de manutenção	Pode causar descontinuidade do trilho	descarrilamento por aumento da bitola ou rotação do trilho.	Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em manutenção. Deve haver manual com informações claras.	I

continuação

Sistema: Elementos de Via												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
EV6-A	Lastro e Sublastro	Distribuir os esforços nos dormentes, permitir a manutenção do nivelamento da via e drenagem. Impedir que ocorra a difusão de lama na direção vertical com sentido para cima.	Ruptura geral	Uso de material de qualidade ruim	Em movimento	Pode ocorrer deslocamento do material para o lado da via ou para a região entre os dormentes	Desnível na via	Pode ocorrer o descarrilamento devido ao desnível e descontinuidade da via causando instabilidade no movimento	Controle de qualidade dos itens. Inspeção em manutenção	Exigência de certificados de qualidade e correto definição de processos e parâmetros.	I	
EV6-B				Erro de especificação de projeto					Simulação do movimento. Testes operacionais.	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV6-C				Erro de construção ou manutenção					Testes operacionais. Inspeções em manutenção	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade e manutenção Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV6-D			ruptura do lastro.	Uso de material de má qualidade	Em movimento	Acúmulo de partículas finas produzidas pelo desgaste do lastro ou de algum outro depósito, impedindo a drenagem podendo causar a formação de lubrificante.	Desnível na via	Pode ocorrer o descarrilamento devido ao desnível e descontinuidade da via causando instabilidade no movimento	Controle de qualidade dos itens. Inspeção em manutenção	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade e manutenção	I	
EV6-E				Erro de especificação de projeto					Simulação do movimento. Testes operacionais. Inspeções em manutenção	Neste caso, o dimensionamento das camadas para se evitar esta falha pode ser realizado através do uso de fatores de segurança ou através da confiabilidade estrutural. Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade e manutenção Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV6-F				Erro de construção ou manutenção					Simulação do movimento. Testes operacionais. Inspeções em manutenção	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade e manutenção Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	

conclusão

Sistema: Elementos de Via												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
EV7-A	Geometria	Determinar as características geométricas	Raio da curva menor que o mínimo	Erro de especificação de projeto	Em movimento	-	Não limita o escorregament o entre o trilho e rodas. Pode permitir a inscrição da base rígido dos truques do carro.	Possível descarrilamento por sobreposição do flange	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	Apesar da geometria não se tratar de um elemento de via, por poder apresentar falhas que causam o descarrilament o, é abordado no FMEA também
EV7-B				Erro de montagem	Em movimento				Controle de qualidade dos itens. Testes operacionais.	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
EV7-C			Sobre-elevação elevada	Erro de especificação de projeto	Em movimento	-	Maior momento instabilizador	Maior probabilidade de descarrilamento devido ao tombamento do trem	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	Apesar da geometria não se tratar de um elemento de via, por poder apresentar falhas que causam o descarrilament o, é abordado no FMEA também
EV7-D				Erro de montagem	Em movimento				Controle de qualidade dos itens. Testes operacionais.	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	

Em suma, as ações de gerenciamento recomendadas na Tabela 6.2 são:

- projeto que respeita os critérios de descarrilamento (item 4.1) bem como os devidos fatores de segurança, que podem ser calculados pelo método probabilístico condicionado avançado (item 2.1.4.2);
- estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento (mais detalhes já apresentados em 5.1);
- correta determinação do processo de fabricação, por exemplo utilizando-se massalotes para evitar o fenômeno de vazio ou uso de material adequado para evitar a segregação ou ainda utilizar a ferramenta intitulada FMECA de processo conforme discussão em 7.2.1;
- inspeção durante a manufatura, podendo ser realizadas pelo controle de qualidade dos componentes fabricados bem como a exigência de certificados disponibilizados pelos fornecedores quanto à qualidade de produto fabricado (mais detalhes em 7.2.2);
- correta manutenção dos sistemas e componentes, fornecendo treinamento às equipes de manutenção e documentação coerente e clara para esta atividade, sendo que para tal pode-se seguir a manutenção centrada em confiabilidade conforme item 7.4.1;
- inserção de sinalização e intertravamento quanto à posição dos aparelhos de via.

6.2.2 - COMPONENTES DO TRUQUE

A árvore de falhas referente ao sistema truque está apresentada na Figura 6.3. Nesta figura são representadas as combinações de falhas referentes ao truque que podem gerar um descarrilamento.

Figura 6.3 - FTA - Falha do Truque

Elaborada a árvore de falha, deve ser implementada a análise do tipo FMEA. Para esta implementação foram considerados diversos modos de falha, sendo que a referência mais utilizada para os mesmos foi a FMD-97 (1997). No APÊNDICE E são apresentados os trechos deste banco de dados referentes a componentes descritos nesta tabela. Além disso, alguns modos de falha apresentados na referência foram agrupados de acordo com o julgamento realizado e explicado no referido anexo. Uma parte das referências dos modos de falha foi proveniente de hipóteses e outras da Reliability Toolkit (1995). Já o modo de falha da suspensão primária e secundária foi simplificada para os modos de falha de uma mola.

A Tabela 6.3 apresenta os modos de falha para cada item/componente, contemplando também uma descrição de cada modo de falha e da fonte de referência que foi obtido o respectivo modo de falha.

Tabela 6.3 - Sistema Truque - Modos de falha considerados e referências

Item	Função	Modo de Falha	Descrição	FONTE
Rodeiro	Movimentar o trem através da sua rotação em torno do eixo axial	Quebra da roda	Ruptura estrutural da roda devido à quebra do componente ou trincas que podem comprometer o componente.	FMD-97 (1997)
		Roda – alteração da geometria	Alteração da geometria da roda	FMD-97 (1997)
		eixo – marcado / arranhado	Eixo marcado (podendo ser marcas de grande profundidade) ou arranhado de modo a poder causar ruptura ou travamento do eixo	FMD-97 (1997)
		eixo - distorcido	Alteração da geometria	FMD-97 (1997)
		eixo – dano mecânico	Eixo com danos	FMD-97 (1997)
		rolamento – travado	Rolamento não permite ou dificulta a rotação	Reliability Toolkit (1995)
		rolamento – folga excessiva	Rolamento com jogo ou folga excessiva	Reliability Toolkit (1995)
		Rolamento - contaminado	Lubrificação do rolamento contaminado, podendo causar aquecimento e travamento	Reliability Toolkit (1995)
Suspensão Primária e Secundária	Filtrar as primeiras vibrações	Mola - quebra	Quebra ou dano severo a mola	FMD-97 (1997)
		mola – inoperante por enfraquecimento	Mola inoperante devido a travamento da mesma, jogo excessivo.	FMD-97 (1997)
	Isolar as vibrações de baixa frequência provenientes da armação do truque	mola - marcada	Mola marcada em sua superfície	FMD-97 (1997)
		mola – uso além da vida útil	Mola desgastada por uso além da vida útil ou em condições mais severas.	FMD-97 (1997)
		mola – corroída	Mola corroída devido ao indevido ambiente exposto	FMD-97 (1997)
Estrutura	Fixar todos os outros elementos do truque	Ruptura Estrutural	Ruptura estrutural devido à quebra do componente por sobrecarga ou propagação de trincas que podem comprometer o componente.	Hipótese
		Mudança de geometria	Alteração da geometria da estrutura	Hipótese

A Tabela 6.4 refere-se a análise do tipo FMEA para os sistema Truque.

Tabela 6.4: FMEA Sistema Truque

continua

Sistema: Truque												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
TR1-A	Rodeiro	Movimentar o trem através da sua rotação em torno do eixo axial	Quebra da roda	Falha de projeto	Em movimento	Rodeiro sem 1 roda	Truque comprometido	Pode ocorrer descarrilamento devido a queda de componente na via ou causar a rotação indevida da caixa com conseqüente desbalanceamento e descarrilamento	Detectável por medições dos parâmetros de projeto e por verificação dos certificados e cálculos de projeto.	O projeto deve dimensionar a correta força de prensagem das rodas (dimensionando a interferência). Durante montagem deve haver respeito aos parâmetros definidos em projeto.	I	
TR1-B				Falha de manufatura					Detectável por inspeção periódica ou durante inspeção de qualidade de fabricação se houverem trincas superficiais ou por ultra-som.	Inspeção de qualidade de fabricação do elemento e inspeções periódicas da manufatura.	I	
TR1-C				Falha na manutenção					Detectável por inspeção periódica se houverem trincas superficiais ou por ultra-som.	Deve ser verificado em inspeções periódicas. O manual de manutenção deve contemplar a correta manutenção do truque.	I	
TR2-A			Roda – alteração da geometria	Falha de projeto	Em movimento	Alteração das características geométricas da roda (exemplo: deformação)	Movimentação irregular do truque, vibração e alteração das características dinâmicas	Pode ocorrer sobreposição do flange e/ou instabilidade lateral do veículo e possível descarrilamento	Detectável por medições dos parâmetros de projeto e por verificação dos certificados e cálculos de projeto.	O projeto deve seguir as normas aplicáveis para perfil de roda . Durante fabricação deve haver respeito aos parâmetros definidos em projeto.	I	
TR2-B				Falha de manufatura					Detectável por inspeção periódica ou durante inspeção de qualidade de fabricação.	Inspeção de qualidade de fabricação do elemento e inspeções periódicas da manufatura.	I	
TR2-C				Falha na manutenção					Ruído em operação. Calo na roda. Detectável também em inspeções periódicas.	Deve ser verificado em inspeções periódicas. O manual de manutenção deve contemplar a correta manutenção do truque.	I	

continuação

Sistema: Truque												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
TR3-A	Rodeiro	Movimentar o trem através da sua rotação em torno do eixo axial		Falha de projeto					Detectável por verificação dos certificados e cálculos de projeto	O projeto deve considerar as corretas solicitações que o trem escolhendo corretamente o material, processo de fabricação e dimensões.	I	
TR3-B			eixo – marcado / arranhado (que possa levar a ruptura/ dano mecânico severo)	Falha de manufatura	Em movimento	Caso seja apenas marcas leves não há efeito. Em caso de marcas mais profundas ou dano mecânico severo, ocorre ruptura do eixo.	Truque comprometido	Pode ocorrer descarrilamento devido à queda de componente na via ou causar a rotação indevida da caixa com conseqüente desbalanceamento e descarrilamento	Detectável por inspeção periódica ou durante inspeção de qualidade de fabricação se houverem trincas superficiais ou por ultra-som	Inspeção de qualidade de fabricação do elemento e inspeções periódicas da manufatura	I	
TR3-C			eixo – dano mecânico	Falha causada por uso indevido					Detectável por inspeção periódica se houverem trincas superficiais ou por ultra-som	Deve ser verificado em inspeções periódicas. O manual de manutenção deve contemplar a correta manutenção do truque	I	
TR4-A				Falha de projeto					Detectável por medições dos parâmetros de projeto e por verificação dos certificados e cálculos de projeto	O projeto deve dimensionar corretamente considerando os parâmetros de operação. Durante fabricação deve haver respeito aos parâmetros definidos em projeto.	I	
TR4-B			eixo - distorcido	Falha de manufatura	Em movimento	Alteração das características geométricas (exemplo: deformação)	Movimentação irregular do truque, vibração e alteração das características dinâmicas	Pode ocorrer sobreposição do flange e/ou instabilidade lateral do veículo e possível descarrilamento	Detectável por inspeção periódica ou durante inspeção de qualidade de fabricação	Inspeção de qualidade de fabricação do elemento e inspeções periódicas da manufatura	I	
TR4-C				Falha causada por uso indevido					Detectável em inspeções periódicas	Deve ser verificado em inspeções periódicas. O manual de manutenção deve contemplar a correta manutenção do truque	I	

continuação

Sistema: Truque												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
TR5-A	Rodeiro	Movimentar o trem através da sua rotação em torno do eixo axial	rolamento – travado	Falta de lubrificação	Em movimento	Bloqueio do rolamento	Rodeiro não se movimenta	Em princípio maior atrito no eixo com possível descarrilamento por possível sobreposição do flange ou instabilidade lateral	Ruído em operação. Calo na roda. Lubrificante com alterações das características.	Correta Lubrificação dos rolamentos Definição dos intervalos de manutenção	I	
TR5-B				Desgaste indevido / falha de manutenção					Ruído em operação. Calo na roda. Lubrificante com alterações das características.	Definir e inspecionar em corretos períodos de manutenção	I	
TR5-C				Mudança de Geometria por solicitações adversas					Ruído em operação. Calo na roda. Lubrificante com alterações das características.	Correto cálculo das solicitações sofridas pelo rolamento	I	
TR6-A			rolamento – folga excessiva	Desgaste indevido / falha de manutenção	Em movimento	Rolamento com jogo ou folga excessiva	Rolamento permite maior vibração e movimento indevido do eixo	Pode ocorrer sobreposição do flange e/ou instabilidade lateral do veículo e possível descarrilamento	Alteração das características operacionais. Verificável também em inspeções periódicas.	Definir e inspecionar em corretos períodos de manutenção	I	
TR7-A			Rolamento - contaminado	Lubrificação indevida	Em movimento	Bloqueio do rolamento	Rodeiro não se movimenta	Em princípio maior atrito no eixo com possível descarrilamento por possível sobreposição do flange ou instabilidade lateral	Ruído em operação. Calo na roda. Lubrificante com alterações das características.	Correta Lubrificação dos rolamentos Definição dos intervalos de manutenção	I	
TR7-B				Ambiente adverso quando comparado ao projeto					Ruído em operação Calo na roda Lubrificante com alterações das características	Correta determinação do ambiente de operação do trem	I	

continuação

Sistema: Truque													
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas	
						Item	Sistema	Trem					
TR8-A	Suspensão Primária e Secundária	Filtrar as primeiras vibrações de baixa frequência provenientes da armação do truque Isolar as vibrações de baixa frequência provenientes da armação do truque	Mola – quebra Mola – marcada (podendo ocasionar quebra pela concentração de tensão) Mola corroída podendo ocorrer ruptura	Falha de projeto	Em movimento	Ruptura estrutural	Pode ocorrer a diminuição da distância entre o eixo e estrutura do truque	Pode ocorrer descarrilamento por rotação indevida da caixa, causando desbalanceamento severo e sobreposição do flange por distribuição irregular das massas	Detectável por medições dos parâmetros de projeto e por verificação dos certificados e cálculos de projeto	Correto dimensionamento com relação às condições climáticas de operação Respeito à vida útil dos elementos	I		
TR8-B			Falha de manufatura	Detectável por inspeção periódica ou durante inspeção de qualidade de fabricação					Inspeção de qualidade e inspeções periódicas da manufatura	I			
TR8-C			Condições ambientais adversas ou manutenção deficiente	Detectável por inspeção periódica					Respeito à vida útil dos elementos e verificação em inspeções periódicas. O manual deve contemplar este item.	I			
TR8-A				Falha de projeto	Em movimento	Suspensão apresenta rigidez alterada	Menor absorção de vibração do trem	Pode ocorrer descarrilamento por rotação indevida da caixa e desbalanceamento e sobreposição do flange por distribuição irregular das massas ou instabilidade lateral	Detectável por medições dos parâmetros de projeto e por verificação dos certificados e cálculos de projeto	Correto dimensionamento com relação às condições climáticas de operação, características de material etc.	I		
TR9-B			mola – inoperante por enfraquecimento mola - corroída	Falha de manufatura					Pode-se considerar não detectável caso a alteração não seja visual (apenas propriedades mecânicas) Caso seja visual (como a distância entre espiras), pode-se detectar em manutenção	Inspeção de qualidade e inspeções periódicas. Exigência de certificados dos materiais e em caso de dúvida, realização de ensaios.	I		
TR9-C				Condições ambientais adversas ou manutenção deficiente					Detectável por inspeção periódica	Respeito à vida útil dos elementos e verificação em inspeções periódicas. O manual deve contemplar este item.	I		
TR10-A				mola – uso além da vida útil	Falha de manutenção ou manual	Em movimento	Suspensão apresenta rigidez alterada ou pode romper	Pode ocorrer a diminuição da distância entre o eixo e estrutura do truque ou menor absorção de vibração do trem	Pode ocorrer descarrilamento devido a enfraquecimento ou quebra da suspensão	Detectável por inspeção periódica	O manual deve apresentar a correta vida útil do componente e este manual deve ser seguido.	I	

conclusão

Sistema: Truque												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
TR11-A	Estrutura	Fixar todos os outros elementos do truque	Ruptura Estrutural	Falha de projeto	Em movimento	Perda dos parâmetros geométricos	Truque comprometido	Pode ocorrer descarrilamento por queda de componente na via ou causar a rotação indevida da caixa, desbalanceamento e descarrilamento	Detectável por medições dos parâmetros de projeto e por verificação dos certificados e cálculos de projeto	O projeto deve dimensionar corretamente o truque	I	
TR11-B				Falha de manufatura					Detectável por inspeção periódica ou durante inspeção de qualidade de fabricação	Inspeção de qualidade e inspeções periódicas na manufatura	I	
TR11-C				Falha de manutenção					Detectável por inspeção periódica se houverem trincas superficiais ou por ultra-som	Deve ser verificado em inspeções periódicas. O manual de manutenção deve contemplar a correta manutenção do truque	I	
TR12-A			Mudança de geometria	Falha de projeto	Em movimento	Alteração das características geométricas (exemplo: deformação)	Movimentação irregular do truque, vibração e alteração das características dinâmicas	Pode ocorrer sobreposição do flange e/ou instabilidade lateral do veículo e possível descarrilamento	Detectável por medições dos parâmetros de projeto e por verificação dos certificados e cálculos de projeto	O projeto deve dimensionar corretamente considerando os parâmetros de operação. Durante fabricação deve haver respeito aos parâmetros definidos em projeto.	I	
TR12-B				Falha de manufatura					Detectável por inspeção periódica ou durante inspeção de qualidade de fabricação	Inspeção de qualidade de fabricação do elemento e inspeções periódicas da manufatura	I	
TR12-C				Falha de manutenção					Detectável em inspeções periódicas	Deve ser verificado em inspeções periódicas. O manual de manutenção deve contemplar a correta manutenção do truque	I	

Em suma, as ações de gerenciamento recomendadas na Tabela 6.4 são:

- correta manutenção dos sistemas e componentes, fornecendo treinamento às equipes de manutenção e documentação coerente e clara para esta atividade, sendo que para tal pode-se seguir a manutenção centrada em confiabilidade conforme item 7.4.1;
- o projeto deve dimensionar a correta força de prensagem das rodas (dimensionando a interferência). Durante montagem deve haver respeito aos parâmetros definidos em projeto.
- inspeção durante a manufatura, podendo ser realizadas pelo controle de qualidade dos componentes fabricados, bem como a exigência de certificados disponibilizados pelos fornecedores e ensaios quanto à qualidade de produto fabricado (mais detalhes em 7.2.2);
- o projeto deve considerar as corretas solicitações que o trem sofrerá, escolhendo corretamente o material, processo de fabricação e dimensões, dimensionamento, ambiente de operação e aplicando as normas cabíveis.
- durante operação, devem ser seguidas as restrições operacionais, de ambiente de operação, vidas úteis e de solicitações permitidas.

6.2.3- COMPONENTES DO ACOPLAMENTO

A árvore de falhas referente ao sistema acoplamento está apresentada na Figura 6.4. Nesta figura são representadas as combinações de falhas referentes ao acoplamento que podem gerar um descarrilamento.

Figura 6.4 - FTA – Falha no Acoplamento

A Tabela 6.5 apresenta os modos de falha para cada item/componente, apresentando também uma descrição de cada modo de falha e da fonte de referência que foi obtido o respectivo modo de falha. No caso do acoplamento, os modos de falha foram todos provenientes de hipóteses.

Tabela 6.5 - Sistema Acoplamento - Modos de falha considerados e referências

Item	Função	Modo de Falha	Descrição	FONTE
Cabeça do Acoplamento	Permitir o engate entre os carros ou trens	Desacoplamento indevido	Desacoplamento indevido entre carros ou trens	Hipótese
Cabeça do Acoplamento	Permitir o engate entre os carros ou trens	Queda na via	Queda do elemento na via acarretando em obstáculo na mesma e possibilidade de descarrilamento	Hipótese
Corpo do Acoplamento	Fornecer a distância necessária entre os carros ou trens para evitar colisões	Desacoplamento indevido	Desacoplamento indevido entre carros ou trens	Hipótese
Corpo do Acoplamento	Fornecer a distância necessária entre os carros ou trens para evitar colisões	Queda na via	Queda do elemento na via acarretando em obstáculo na mesma e possibilidade de descarrilamento	Hipótese
Ligação da Caixa-acoplamento	Fixar o acoplamento à caixa,	Desacoplamento indevido	Desacoplamento indevido entre carros ou trens	Hipótese
Ligação da Caixa-acoplamento	Fixar o acoplamento à caixa,	Queda na via	Queda do elemento na via acarretando em obstáculo na mesma e possibilidade de descarrilamento	Hipótese

A Tabela 6.6 apresenta a análise do tipo FMEA para o sistema de acoplamento.

Tabela 6.6 - FMEA Sistema de Acoplamento

continua

Sistema: Acoplamento												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
AC1-A	Cabeça do Acoplamento	Permitir o engate entre os carros ou trens	1 - Desacoplamento indevido 2- Queda na via	Falha no projeto	Em Movimento	1 – Desacoplamento de um engate com o outro 2 - Cabeça do acoplamento perde sua fixação com o restante do acoplamento	Acoplamento perde a sua função	Pode ocorrer descarrilamento por queda de componente na via ou excesso de velocidade causando sobreposição do flange e possível descarrilamento	Inspeção visual ou testes de desempenho	Correto dimensionamento do engate. Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.	I	
AC1-B				Falha de manufatura					Inspeção visual ou testes de desempenho	Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.	I	
AC1-C				Falha de montagem					Inspeção visual ou testes de desempenho	Correto dimensionamento do engate. Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.	I	
									Inspeção por parte do controle de qualidade.			
AC1-D				Falha de manutenção					Detectável em inspeções periódicas	Manual deve conter informações corretas e precisas bem como treinamento aos funcionários da manutenção.	I	

Sistema: Acoplamento												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
AC2-A	Corpo do Acoplamento	Fornecer a distância necessária entre os carros ou trens para evitar colisões	1 - Desacoplamento indevido 2- Queda na via	Falha no projeto	Em Movimento	1 – Desacoplamento de um engate com o outro 2 - Corpo do acoplamento perde sua fixação com o restante do acoplamento	Acoplamento perde a sua função	Pode ocorrer descarrilamento por queda de componente na via ou excesso de velocidade causando sobreposição do flange e possível descarrilamento	Inspeção visual ou testes de desempenho	Correto dimensionamento do engate. Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.	I	
AC2-B				Falha de manufatura					Inspeção visual ou testes de desempenho	Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.	I	
AC2-C				Falha de montagem					Inspeção visual ou testes de desempenho	Correto dimensionamento do engate. Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.	I	
										Inspeção por parte do controle de qualidade.		
AC2-D				Falha de manutenção					Detectável em inspeções periódicas	Manual deve conter informações corretas e precisas bem como treinamento aos funcionários da manutenção.	I	

conclusão

Sistema: Acoplamento

ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
AC3-A				Falha no projeto					Inspeção visual ou testes de desempenho	Correto dimensionamento do engate. Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.	I	
AC3-B				Falha de manufatura		1 – Desacoplamento de uma caixa com outra			Inspeção visual ou testes de desempenho	Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.	I	
AC3-C	Ligação da Caixa-acoplamento	Fixar o acoplamento à caixa,	1 - Desacoplamento indevido 2- Queda na via	Falha de montagem	Em Movimento	2 – Ligação da caixa com acoplamento perde sua fixação com o restante do acoplamento e caixa	Acoplamento perde a sua função	Pode ocorrer descarrilamento por queda de componente na via ou excesso de velocidade causando sobreposição do flange e possível descarrilamento	Inspeção visual ou testes de desempenho	Correto dimensionamento do engate. Teste de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem. Inspeção por parte do controle de qualidade.	I	
AC4-D				Falha de manutenção					Detectável em inspeções periódicas	Manual deve conter informações corretas e precisas bem como treinamento aos funcionários da manutenção.	I	

Em suma, as ações de gerenciamento recomendadas na Tabela 6.6 são:

- correto dimensionamento do engate;
- teste do funcionamento dos sistemas, por exemplo, de acoplamento antes da entrada em operação de cada trem.
- inspeção durante a manufatura, podendo ser realizada pelo controle de qualidade dos componentes fabricados bem como a exigência de certificados disponibilizados pelos fornecedores quanto à qualidade de produto fabricado (mais detalhes em 7.2.2);
- correta manutenção dos sistemas e componentes, fornecendo treinamento aos manutentores e documentação coerente e clara para esta atividade, sendo que para tal pode-se seguir a manutenção centrada em confiabilidade conforme item 7.4.1.

6.2.4 - COMPONENTES DO SISTEMA DE TRAÇÃO E FRENAGEM

A árvore de falhas referente ao sistema de tração e frenagem está apresentada na Figura 6.5. Nesta figura são representadas as combinações de falhas referentes ao sistema de tração e frenagem que podem gerar um descarrilamento.

Figura 6.5 - FTA – Falha do Sistema de Tração e Frenagem

A Tabela 6.7 apresenta os modos de falha para cada item/componente, uma descrição de cada modo de falha e a origem da referência de que foi obtido o respectivo modo de falha. A referência mais utilizada para os modos de falha foi a norma FMD-97 (1997). No APÊNDICE E são descritos os trechos deste banco de dados referentes a componentes contemplados nesta tabela. Além disso, alguns modos de falha apresentados foram agrupados de acordo com o julgamento realizado e explicado no referido anexo. Já uma parte das referências os modos de falha foram provenientes de hipóteses e outras da referência Reliability Toolkit (1995).

Tabela 6.7 - Sistema de Tração e Frenagem - Modos de falha considerados e referências

continua				
Item	Função	Modo de Falha	Descrição	FONTE
Sistema de controle de velocidade	Monitorar e controlar a velocidade do material rodante	Aquisição errada de velocidade	Aquisição errada de velocidade pelos sensores ou devido a transmissão errada da informação para o circuito de processamento da velocidade.	Hipótese
		Processamento errado da velocidade	Processamento errado da informação de velocidade, enviando informações erradas para o sistema de tração para o ajuste da velocidade.	Hipótese
Sistema de comando de tração	Comandar a propulsão	Comando errôneo de propulsão	Transmissão errada dos parâmetros para os motores de tração.	Hipótese
Sistema de atuação - motor	Converter energia elétrica em energia mecânica	Falha de ventilação	Falha na ventilação do motor acarretando elevação de temperatura	<i>Reliability Toolkit</i> (1995)
			Rolamento não permite ou dificulta a rotação.	
		Falha no rolamento	Rolamento com jogo ou folga excessiva. Lubrificação do rolamento contaminado, podendo causar aquecimento e travamento.	<i>Reliability Toolkit</i> (1995)
		Falha na operação depois da partida	Após a partida do motor, pode ocorrer o travamento do motor ou alteração da velocidade de rotação.	<i>Reliability Toolkit</i> (1995)
		Falha de partida	O motor não inicia o movimento.	<i>Reliability Toolkit</i> (1995)

continuação

Item	Função	Modo de Falha	Descrição	FONTE
Sistema de atuação - redutor	Reduzir o número de rotações na saída e aumentar o torque	Perda de lubrificação	Falta de óleo no redutor.	FMD-97 (1997)
		Falha de vedação	Falha na vedação do redutor, podendo causar falta de óleo ou acúmulo de impurezas.	FMD-97 (1997)
		Desgaste	Desgaste do redutor.	FMD-97 (1997)
Sistema de controle de frenagem	Monitorar e controlar a frenagem do material rodante	Aquisição errada do esforço de frenagem	Aquisição errada dos esforços de frenagem pelos sensores ou devido à transmissão errada da informação para o circuito de controle da frenagem.	Hipótese
		Controle errado do esforço de frenagem	Transmissão errada dos parâmetros para a aplicação de frenagem.	Hipótese
Sapatas de freio do freio mecânico	Em conjunto com o disco de freio, garantir a frenagem do trem	Fissura	Surgimento de fissuras na sapata de freio.	FMD-97 (1997)
		Deteriorado	Deterioração das propriedades do material podendo ser causado, por exemplo, pelo uso em um ambiente mais severo.	FMD-97 (1997)
		Prendendo	Sapata se aderindo indevidamente ao disco.	FMD-97 (1997)
		Marcada	Sapata com trincas ou marcas causadas pela qualidade da sapata ou algum agente externo.	FMD-97 (1997)
		Acúmulo de metais	Acúmulo de metais na sapata proveniente do ambiente ou do contato com o disco de freio.	FMD-97 (1997)
		Fora de ajuste	Desalinhamento da pastilha, pastilha fora da sua correta posição de instalação.	FMD-97 (1997)
		Ultrapassando valores nominais ou menor valor nominal	Valores nominais errados do coeficiente de atrito das pastilhas.	FMD-97 (1997)

conclusão

Item	Função	Modo de Falha	Descrição	FONTE
Cilindro de freio e mecanismo do freio – freio mecânico	Atuar na compressão das pastilhas contra o disco	Vazamento	Vazamento do cilindro de freio ou de algum outro elemento do mecanismo.	FMD-97 (1997)
		Falha no rolamento	Rolamento não permite ou dificulta a rotação; rolamento com jogo ou folga excessiva; lubrificação do rolamento contaminado, podendo causar aquecimento e travamento.	FMD-97 (1997)
			Desta forma o mecanismo não atua corretamente na frenagem.	
		Cilindro de freio travando	Cilindro de freio travando causando falha de aplicação ou de alívio de freio.	FMD-97 (1997)
		Válvula em falha	Válvula de acionamento do cilindro travando causando falha de aplicação ou de alívio de freio.	FMD-97 (1997)
		Falha na mangueira	Falha na mangueira por ruptura, bloqueio ou vazamento.	FMD-97 (1997)
		Componentes internos deteriorados	Componentes internos deteriorados.	FMD-97 (1997)
		Falha na vedação	Vedação não cumpre a sua função, permitindo, por exemplo, vazamentos.	FMD-97 (1997)
		Falha na mola	Em mecanismos de aplicação ou desaplicação por mola, pode não ocorrer a correta aplicação ou desaplicação.	FMD-97 (1997)
Disco de freio – freio mecânico	Em conjunto com as pinças e sapatas, garantir a frenagem do trem	Coeficiente de atrito fora dos parâmetros	Coeficiente de atrito fora dos parâmetros definidos, podendo causar menor ou maior taxa de frenagem.	Hipótese
		Ruptura ou trinca	Ruptura estrutural devido à quebra do componente ou trincas que podem comprometer o componente.	Hipótese

A Tabela 6.8 apresenta a análise do tipo FMEA para o sistema de tração e frenagem.

Tabela 6.8 - FMEA Sistema de Tração/Frenagem

continua

Sistema: Tração e Frenagem												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
PR1-A	Sistema de controle de velocidade	Monitorar e controlar a velocidade do material rodante	Aquisição errada de velocidade	Sensores em falha	Em movimento	Falha na aquisição de velocidade	Sistema não recebe a velocidade correta	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange e descarrilamento. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Projeto pode prever a sinalização deste tipo de falha. Pode-se realizar a detecção da falha na manutenção.	Uso de redundâncias na aquisição de velocidade do trem associadas a um sistema votador. Manutenções periódicas dos elementos de informação de velocidade. Para operação manual, fornecer correto treinamento aos operadores.	I	
PR1-B				Falha no projeto	Em movimento	Falha no Monitoramento e/ou controle da velocidade do material rodante	Sistema não realiza a sua função	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange e descarrilamento. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Elaboração de FMECA e FTA detalhados dos sistemas para identificação de falhas dos componentes.	I	
PR1-C				Conversão de velocidade em falha	Em movimento	Falha na conversão de velocidade	Sistema não converte a velocidade correta	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange e descarrilamento. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Projeto pode prever a sinalização deste tipo de falha. Pode-se realizar a detecção da falha na manutenção.	Uso de redundâncias na aquisição de velocidade do trem associadas a um sistema votador. Manutenções periódicas dos elementos de informação de velocidade. Para operação manual, fornecer correto treinamento aos operadores.	I	
PR1-D			Processamento errado da velocidade	Processamento e/ou Transmissão de informação em falha	Em movimento	Falha na transmissão da informação de velocidade	Sistema não realiza devidamente a sua função	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange e descarrilamento. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Projeto pode prever a sinalização deste tipo de falha. Pode-se realizar a detecção da falha na manutenção.	Uso de redundâncias na aquisição de velocidade do trem associadas a um sistema votador. Manutenções periódicas dos elementos de informação de velocidade. Para operação manual, fornecer correto treinamento aos operadores.	I	

continuação

Sistema: Tração e Frenagem												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
PR2-A	Sistema de comando de tração	Comandar a propulsão	Comando errôneo de propulsão	Erro de projeto	Em movimento	Falha no comando da velocidade de operação	Sistema não realiza devidamente a sua função	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange e descarrilamento. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Elaboração de FMECA e FTA detalhados dos sistemas para identificação de falhas dos componentes.	I	
PR2-B				Falha do sistema					Projeto pode prever a sinalização deste tipo de falha. Pode-se realizar a detecção da falha na manutenção.	Uso de redundâncias na aquisição de velocidade do trem associadas a um sistema votador. Manutenções periódicas dos elementos de informação de velocidade. Para operação manual, fornecer correto treinamento aos operadores.	I	
PR3-A	Sistema de atuação - motor	Converter energia elétrica em energia mecânica	1 - Falha de ventilação (que acarrete no travamento do motor) 2 - Falha no rolamento	Manutenção deficiente	Em movimento	Motor não se movimenta	Travamento do eixo	Em princípio maior atrito no eixo com possível descarrilamento por possível sobreposição do flange ou instabilidade lateral.	Detectável em manutenções periódicas.	Fornecimento de correto treinamento e determinação dos corretos intervalos de manutenção. Pode-se inserir um monitoramento da temperatura do motor.	I	
PR3-B				Queima do motor	Em movimento	-	-	-	-	-	-	Sem impacto para o descarrilamento
PR3-C				1 - Falha na operação depois da partida	Em movimento	Motor não se movimenta	Travamento do eixo	Em princípio maior atrito no eixo com possível descarrilamento por possível sobreposição do flange ou instabilidade lateral.	Detectável em manutenções periódicas.	Fornecimento de correto treinamento e determinação dos corretos intervalos de manutenção. Pode-se inserir um monitoramento da temperatura do motor.	I	
PR3-D				2 - Falha de partida	-	-	-	-	-	-	-	-

continuação

Sistema: Tração e Frenagem												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
PR4-A	Sistema de atuação - redutor número de rotações na saída e aumentar o	Perda de lubrificação Falha de vedação Desgaste		Manutenção deficiente	Em movimento	Travamento do redutor	Travamento do eixo	Em princípio maior atrito no eixo com possível descarrilamento por possível sobreposição do flange ou instabilidade lateral.	Detectável em manutenções periódicas.	Fornecimento de correto treinamento e determinação dos corretos intervalos de manutenção .	I	
PR4-B				Erro de manufatura					Detectável em teste operacional ou manutenção periódica.	Determinação dos corretos intervalos de manutenção e controle de qualidade.	I	
FR1-A	Sistema de controle de frenagem	Monitorar e controlar a frenagem do material rodante	Aquisição errada do esforço de frenagem	Sensores em falha	Em movimento	Falha na aquisição do esforço de frenagem	Sistema não recebe a informação de esforço correta	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange. Pode ocorrer ainda travamento do eixo. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Projeto pode prever a sinalização deste tipo de falha. Pode-se realizar a detecção da falha na manutenção.	Uso de redundâncias na aquisição de velocidade do trem associadas a um sistema votador. Manutenções periódicas dos elementos de informação de velocidade. Para operação manual, fornecer correto treinamento aos operadores.	I	
FR1-B				Falha no projeto					Simulação dinâmica do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Elaboração de FMECA e FTA detalhados dos sistemas para identificação de falhas dos componentes.	I	
FR1-C				Conversão do esforço em falha					Projeto pode prever a sinalização deste tipo de falha. Pode-se realizar a detecção da falha na manutenção.	Uso de redundâncias na aquisição de velocidade do trem associadas a um sistema votador. Manutenções periódicas dos elementos de informação de velocidade. Para operação manual, fornecer correto treinamento aos operadores.	I	
FR1-D				Processamento ou transmissão errada da informação					Projeto pode prever a sinalização deste tipo de falha. Pode-se realizar a detecção da falha na manutenção.	Uso de redundâncias na aquisição de velocidade do trem associadas a um sistema votador. Manutenções periódicas dos elementos de informação de velocidade. Para operação manual, fornecer correto treinamento aos operadores.	I	

continuação

Sistema: Tração e Frenagem													
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas	
						Item	Sistema	Trem					
FR2-A	Sapatas	Em conjunto com o disco de freio, garantir a frenagem do trem	1 – Fissura	Erro de manufatura ou projeto	Em movimento	Componente não atua corretamente	Perda da capacidade de frenagem	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange.	Simulação dinâmica do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Correta averiguação das condições e ambiente de uso.	I		
			2 – Deteriorado										
FR2-B			3 - Marcada	Desgaste excessivo ou manutenção incorreta				Sinais de desgaste detectável em manutenção.	Manutenção periódica deste item e fornecimento de treinamento para manutenção.	I			
FR2-C			Prendendo	Erro de manufatura ou projeto	Em movimento	Componente não atua corretamente	Excesso de frenagem caso não haja o correto alívio de freio ou desgaste prematuro da pastilha	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange em caso de desgaste prematuro. Pode ocorrer ainda travamento do eixo. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais. Inspeções periódicas.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Deve-se efetuar a inspeção periódica do item. Elaboração de FMECA e FTA detalhados dos sistemas para identificação de falhas dos componentes.	I		
FR2-D				Acúmulo de Metais	Falha de manutenção	Em movimento	Componente não atua corretamente	Perda da capacidade de frenagem	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange.	Detectável pela inspeção visual das pastilhas.	O manual deve contemplar a inspeção e os funcionários de manutenção devem receber correto treinamento	I	

Em conjunto com o disco de freio, garantir a frenagem do trem

continuação

Sistema: Tração e Frenagem												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
FR2-E	Sapatas	Em conjunto com o disco de freio, garantir a frenagem do trem	Fora do ajuste	Falha de montagem	Em movimento	Componente não atua corretamente	Perda da capacidade de frenagem ou excesso de frenagem	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange.	Detectável pela inspeção visual das pastilhas.	Durante a montagem, deve haver um controle de qualidade no processo, inspecionando esta montagem.	I	
FR2-F				Falha de manutenção				Pode ocorrer ainda travamento do eixo. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.				
FR2-G			Ultrapassando valores nominais ou menores valores nominais	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Componente não atua corretamente	Perda da capacidade de frenagem ou excesso de frenagem	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
FR2-H				Condições climáticas não previstas em projeto				Pode ocorrer sobreposição do flange. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Sinais de desgaste detectável em manutenção.	Manutenção periódica deste item Checagem das condições climáticas antes de projeto.	I	
FR2-I				Erro de manufatura				Pode ocorrer ainda travamento do eixo.	Controle de qualidade dos itens. Simulação do movimento. Testes operacionais.	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	

continuação

Sistema: Tração e Frenagem												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
FR3-A	Cilindro de freio e mecanismo do freio – freio mecânico	Atuar na compressão das pinças contra o disco	1 - Vazamento	Desgaste excessivo	Em movimento	Não atua de modo correto	Perda da capacidade de frenagem ou excesso de frenagem (dependendo da lógica de aplicação do freio)	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange. Pode ocorrer ainda travamento do eixo.	Ruído de vazamento.	Manutenção periódica deste item por pessoas treinadas para a atividade.	I	
FR3-B			2 - Falha na vedação	Manutenção incorreta					Ruído de vazamento.	Manutenção periódica deste item por pessoas treinadas para a atividade.	I	
FR3-C			1 - Falha no rolamento 2 - Cilindro de freio travando 3 - Válvula em falha	Manutenção incorreta	Em movimento	Não atua de modo correto	Perda da capacidade de frenagem ou excesso de frenagem (dependendo da lógica de aplicação do freio)	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange. Pode ocorrer ainda travamento do eixo. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Detectável em manutenções periódicas.	Manutenção periódica deste item por pessoas treinadas para a atividade.	I	
FR3-D			Falha na mangueira	Vazamento	Em movimento	Não atua de modo correto	Perda da capacidade de frenagem ou excesso de frenagem (dependendo da lógica de aplicação do freio)	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange. Pode ocorrer ainda travamento do eixo.	Ruído de vazamento.	Manutenção periódica deste item por pessoas treinadas para a atividade.	I	
FR3-E				Ruptura					Detecção visual.	Manutenção periódica deste item por pessoas treinadas para a atividade.	I	
FR3-F			Componentes internos deteriorados	Erro de manufatura	Em movimento	Não atua de modo correto	Perda da capacidade de frenagem ou excesso de frenagem (dependendo da lógica de aplicação do freio)	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange. Pode ocorrer ainda travamento do eixo. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Em princípio não detectável.	Escolha de fornecedores certificados e experientes. Exigência de certificados e teste em laboratórios.	I	
FR3-G				Erro de manutenção					Em princípio não detectável.	Respeito à vida útil dos componentes.	I	
FR3-H			Falha na mola	Erro de manufatura	Em movimento	Não atua de modo correto	Perda da capacidade de frenagem ou excesso de frenagem (dependendo da lógica de aplicação do freio)	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange. Pode ocorrer ainda travamento do eixo. Pode ainda haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Em princípio não detectável.	Escolha de fornecedores. Exigência de certificados e teste em laboratórios.	I	
FR3-I				Erro de manutenção					Em princípio não detectável.	Respeito à vida útil dos componentes.	I	

conclusão

Sistema: Tração e Frenagem												
ID	Item	Função	Modo de Falha	Causas prováveis	Modo Operacional	Efeito das Falhas			Modo de Detecção	Ação de Gerenciamento	Sev	Notas
						Item	Sistema	Trem				
FR4-A	Disco de freio	Em conjunto com as pinças e sapatas, garantir a frenagem do trem	Coeficiente de atrito fora dos parâmetros	Erro de especificação de projeto	Em movimento	Componente não atua corretamente	Perda da capacidade de frenagem ou excesso de frenagem	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange. Pode ocorrer ainda travamento do eixo ou haver instabilidade devido a baixa velocidade em curva e descarrilamento.	Simulação do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Elaboração de FMECA e FTA detalhados dos sistemas para identificação de falhas dos componentes.	I	
FR4-B				Condições climáticas não previstas em projeto					Sinais de desgaste detectável em manutenção.	Manutenção periódica deste item. Checagem das condições climáticas antes de projeto.	I	
FR4-C				Erro de manufatura					Controle de qualidade dos itens. Simulação do movimento. Testes operacionais.	Este item deve ser inspecionado em controle de qualidade. Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento.	I	
FR4-D			Ruptura ou trinca	Erro de manufatura ou projeto	Em movimento	Componente não atua corretamente	Perda da capacidade de frenagem	Possível sobrevelocidade no trem e, por exemplo, em caso de curva pode ocorrer sobreposição do flange.	Simulação dinâmica do movimento. Testes operacionais. Simulações computacionais.	Estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento. Correta averiguação das condições e ambiente de uso. Verificação do processo de fabricação.	I	
FR4-E				Desgaste excessivo ou manutenção incorreta					Sinais de desgaste detectável em manutenção.	Manutenção periódica deste item por pessoas treinadas para a atividade.	I	

Em suma, as ações de gerenciamento recomendadas na Tabela 6.8 são:

- correta manutenção dos sistemas e componentes, fornecendo treinamento aos manutentores e documentação coerente e clara para esta atividade, sendo que para tal pode-se seguir a manutenção centrada em confiabilidade conforme item 7.4.1;
- estudos e testes para a averiguação da dinâmica do movimento (mais detalhes já apresentados em 5.1);
- elaboração de FMECA e FTA detalhadas dos sistemas para identificação de falhas dos componentes;
- inspeção durante a manufatura/montagem, podendo ser realizadas pelo controle de qualidade dos componentes fabricados bem como a exigência de certificados disponibilizados pelos fornecedores quanto à qualidade de produto fabricado e quanto à experiência de fornecimento (mais detalhes em 7.2.2);
- uso de sistemas com maior confiabilidade na aquisição, transmissão, conversão e comando da tração e esforço de frenagem do trem;
- é recomendável inserir um monitoramento da temperatura do motor;
- em operação manual, correto treinamento dos operadores/condutores para o respeito das velocidades e outros parâmetros de operação;
- durante projeto, respeito às condições climáticas e de operação e certificação do respeito destas condições durante esta operação;
- respeito à vida útil dos componentes;
- correta determinação do processo de fabricação, por exemplo utilizando-se a ferramenta intitulada FMECA de processo conforme discussão em 7.2.1.

6.2.5 - FATORES DIVERSOS

Existem diversas outras falhas que podem causar o descarrilamento do material rodante. Segundo os dados da Tabela 4.3, outras causas podem ser: fatores humanos, sinalização e uma miscelânea de outras causas. Estas demais causas são apresentadas na Tabela 4.3 e não serão aprofundadas nesta dissertação.

CAPÍTULO 7 - AÇÕES DE REDUÇÃO DO RISCO

Por se tratar de um problema que pode causar cenários catastróficos, ações de redução de risco podem e devem ser aplicadas para diminuir a severidade ou a probabilidade de ocorrência deste tipo de evento. Estas ações que serão apresentadas neste capítulo, além das já discutidas no item 6.2, podem apresentar maior ou menor efetividade e são baseadas nestes estudos, retornos de experiência, recomendações de fabricantes de componentes ferroviários e no trabalho de Iwnicky (2006).

A implementação de ações de redução de risco se faz necessária pelas vidas envolvidas e devem ser garantidas pelos fabricantes, mantenedores e empresas adquirentes do sistema. Assim, algumas ações são discutidas nesta seção e serão divididas em ações de projeto e fabricação, ações de operação e ações de manutenção.

É importante observar que a maior parte das ações indicadas neste capítulo não são novas tecnologias ou novos procedimentos, porém parte da frota de trens do Brasil não apresentam estas medidas implementadas, pois o país apresenta, em muitos casos, frotas projetadas durante uma época em que estas ações não existiam ou ainda frotas que, devido a limitações de investimentos, também não apresentam estas soluções.

Deve-se ressaltar que nem todas as alternativas discutidas na sequência deste capítulo podem ser aplicadas de maneira simples em sistemas ferroviários já em operação, pois podem representar custos elevados quando comparados a projetos que estão em fases iniciais do ciclo de vida (por exemplo, em fase de concepção).

Além disso, estas ações podem ser consideradas como alternativas a serem propostas aos adquirentes de sistemas para garantir maior segurança em operação

e muitas delas são de conhecimento dos projetistas, fabricantes e construtoras (no caso específico da via permanente).

Como observação, os custos relativos à correção de uma falha aumentam com a evolução do projeto, por exemplo, os custos para a correção de uma falha de concepção do trem durante o projeto é menor que o custo da correção desta mesma falha após a entrega de todos os trens manufaturados.

7.1 - AÇÕES PREVENTIVAS E PALIATIVAS DE PROJETO

As ações de redução de risco a serem implantadas no projeto estão relacionadas com ações que são tomadas antes do início de operação do sistema, ou seja, que surgem durante a concepção do mesmo ou durante a implantação de um novo sistema, estas ações de atenuação são divididas em ações preventivas (que têm por objetivo evitar o descarrilamento) e paliativas (que têm por objetivo atenuar as consequências do evento).

7.1.1- AÇÕES PREVENTIVAS

7.1.1.1 – Lubrificador de flange

O lubrificador de flange de roda é um dispositivo que pode ser utilizado para minimizar o desgaste e o ruído da região do flange da roda e também do trilho conforme indicado na Figura 7.1 pois altera o coeficiente de atrito entre a roda e o trilho. Desta forma pode, por exemplo, diminuir a probabilidade de ocorrência de um descarrilamento em curvas.

Figura 7.1 - Princípio do Lubrificador de Flange de Roda (REBS, 2009)

O princípio de funcionamento do sistema de lubrificador de flange de roda pode variar entre os diferentes fabricantes. O sistema patenteado da REBS, que teve o seu início de desenvolvimento na década de 80, funciona da seguinte forma (REBS, 2009): o lubrificante é acondicionado em um reservatório e é forçado contra uma unidade pneumática que mistura o lubrificante com ar; esta mistura percorre tubulações que direcionam a mistura para a roda e, na extremidade desta tubulação, encontram-se bicos que aumentam a aceleração da mistura para que a mesma seja depositada na região do flange.

A Figura 7.2 apresenta a tubulação, o bico ejetor, o reservatório e o sistema de controle do sistema de lubrificação de flange.

Figura 7.2 - Princípio de Funcionamento do Sistema de Lubrificação de Flange (REBS, 2009)

Por precaução para que a capacidade de frenagem não seja diminuída, devido a um excesso de lubrificação, algumas ações podem ser realizadas:

- uma lubrificação cíclica da roda deve ser feita ao invés de uma contínua lubrificação da roda. Este tipo de controle pode ser realizado, por exemplo, através de informações de velocidade do trem ou através de períodos pré-determinados;
- a lubrificação é direcionada para o flange e em pequenas quantidades, não atrapalhando as outras regiões de contato roda-trilho.

7.1.1.2 – Determinação da vida útil dos componentes

Determinando a vida útil dos componentes, é possível selecionar os itens mais adequados e também estipular as políticas de manutenção dos mesmos. Isso, além de contribuir com o cálculo do custo de vida do sistema, ajudar a definir com maior precisão as necessidades e períodos de manutenção.

Uma ferramenta para a determinação da vida útil pode ser o uso de métodos de confiabilidade como, por exemplo, ensaios acelerados que visam diminuir o tempo para a realização de um ensaio de vida de um componente, uso de retorno de experiência, ensaios censuras de confiabilidade etc.

7.1.1.3 – Detector de obstáculo

O detector de obstáculo é um dispositivo que detecta a presença de obstáculos na via. Estes obstáculos podem causar instabilidade no movimento, sobreposição do flange e conseqüentemente descarrilamento.

Este sistema pode sinalizar a presença do obstáculo ou aplicar o freio de emergência de maneira a evitar o descarrilamento, podendo, por exemplo, funcionar através de sensores de impacto que sinalizam o objeto indesejado.

7.1.1.4 – Deflector de obstáculo – limpa-trilhos

O deflector de obstáculo, conhecido como limpa-trilhos, age na causa, diferentemente do detector de obstáculo que é uma barreira preventiva ou até mesmo paliativa do descarrilamento.

Este dispositivo, cujo exemplo é apresentado na Figura 7.3, é responsável por evitar que objetos de tamanhos maiores que os pré-determinados atinjam as rodas do truque e desta forma venham a causar um descarrilamento. Além disso, pode ter a função de evitar que objetos colidam com componentes importantes do trem.

Figura 7.3 – Limpa-trilhos (CPTM, 2010)

7.1.1.5 – Projeto que respeita os critérios de descarrilamento

O projeto respeitando os critérios de descarrilamento se faz importante para prevenir a ocorrência deste evento. Estes critérios estabelecem parâmetros limites para as interações de forças de modo a evitar que este problema ocorra.

7.1.1.6 – Instalação de contratrilhos em curvas acentuadas

Os contratrilhos podem ser aplicados para diminuir a probabilidade de ocorrência da sobreposição do flange sobre o trilho ou para reduzir e evitar o aumento da bitola e rotação do trilho. De acordo com Iwnick (2006), este tipo de trilho é normalmente instalado no lado interno do trilho externo à curva. Este tipo de instalação é aplicado em curvas de raio bastante crítico, as quais apresentam maior probabilidade de causar o descarrilamento.

A Figura 7.4 apresenta este tipo de instalação.

Figura 7.4 - Contratrilho (IWNICK, 2006)

7.1.1.7 – Otimização da suspensão do truque e resistência do movimento de yaw do truque

A suspensão do truque apresenta papel fundamental na dinâmica do movimento do material rodante. Suspensões primárias que apresentam menor rigidez permitem uma melhor inscrição em curva que conseqüentemente causam menores forças laterais e menor probabilidade de descarrilamento. Porém desta forma, ocorre uma maior instabilidade em velocidades altas. Assim, a determinação da rigidez da suspensão primária deve ser otimizada de modo a melhor atender à via em que o trem operará.

A suspensão secundária, que pode apresentar papel de nivelamento do trem, além de suportar as vibrações de baixa frequência provenientes da armação do truque garantindo estabilidade de movimento e conforto aos passageiros, pode influenciar, por exemplo, nos momentos estabilizadores e instabilizadores definidos no item 3.1.9.2, o que pode aumentar ou diminuir a probabilidade de ocorrência do descarrilamento. Desta forma, este tipo de suspensão também deve ser otimizado de modo à melhor atender a via em que o trem operará.

As características de cada suspensão devem ser escolhidas de acordo com as características da via em que o material rodante operará, desta forma é necessário um estudo da solução a ser implementada que variará conforme as diferentes aplicações.

7.1.1.8 – Inserção de monitoramento do sistema

O uso de monitoramento de falhas do sistema pode ser realizado para facilitar a detecção de falhas para os operadores, agilizando a tomada de decisão e evitando, por exemplo, que a operação seja continuada com algum tipo de falha que possa causar uma operação insegura (descarrilamento etc).

Um sistema que está relacionado com o monitoramento de falha é o TCMS, sistema este que pode controlar algumas funções do trem (quando estas são implementadas) ou monitorar falhas pré-estabelecidas, como, a falha de um sistema de detecção de descarrilamento.

Além disso, o monitoramento de falhas do sistema pode facilitar as equipes de manutenção, aumentando assim a disponibilidade e a manutenibilidade do sistema.

7.1.1.9 – Inserção de sistemas de proteção (ATP)

Conforme apresentado na Tabela 4.4 e na Figura 4.3, os erros humanos são responsáveis por 29% das ocorrências do descarrilamento. Uma das razões da existência do sistema de ATP é justamente minimizar a taxa de ocorrência de falhas humanas durante a operação do material rodante. O sistema de ATP, de uma maneira sucinta, é responsável pela proteção automática do trem através de circuitos de via, sinalização e intertravamentos. Este sistema limita as velocidades máximas de operação nos diferentes trechos; desta forma, a influência humana sobre a magnitude da velocidade é restrita, impedindo assim a sobrevelocidade que poderia vir a causar um descarrilamento.

7.1.2- AÇÕES PALIATIVAS

7.1.2.1 – Detector de Descarrilamento

Uma ação que pode ser utilizada para diminuir as conseqüências do evento em estudo é o uso de detectores de descarrilamento. Este tipo de dispositivo opera como uma barreira paliativa, ou seja, não atua na causa tampouco na prevenção da ocorrência e tem o intuito de diminuir a severidade do descarrilamento.

Segundo fabricantes, como por exemplo, a Knorr Bremse (2009) ou DM (2010), o detector de descarrilamento pode funcionar com a avaliação das acelerações e de acordo com sua magnitude, pode indicar que o descarrilamento está ocorrendo. Desta forma, dependendo da concepção do sistema, um sinal de alerta é enviado ou até mesmo pode ocorrer a aplicação do freio de emergência.

7.2 - AÇÕES PREVENTIVAS DE MANUFATURA

As ações de redução de risco a serem implantadas na manufatura estão relacionadas com a prevenção de ocorrência que podem ser causadas no processo de fabricação e que podem gerar um descarrilamento.

7.2.1 - FMEA DE PROCESSO

A FMEA de processo pode ser uma ferramenta para detectar as causas no processo de fabricação do material rodante que podem gerar um possível descarrilamento. O FMEA de processo, similar ao item 2.1.2, é um método que analisa individualmente as falhas simples de um processo e os efeitos e impactos que podem causar no mesmo incluindo a perda de conformidade nos itens produzidos. Determina assim como cada modo de falha afeta o funcionamento do objeto de estudo.

7.2.2 - INSPEÇÕES DE QUALIDADE

As inspeções de qualidade são responsáveis por identificar possíveis problemas e controlar os aspectos e características do produto que será entregue ao cliente. Estas inspeções também podem ser responsáveis por verificar a qualidade dos itens fornecidos pelos parceiros ou fornecedores e devem ter papel fundamental na decisão de escolha de fornecedores. Além disso, as inspeções de qualidade podem detectar pontos críticos no processo ou sistema e promover planos de ações para melhora dos mesmos.

Normas como as pertencentes ao grupo ISO 9000 podem ser utilizadas na gestão da qualidade e melhoria e muitas vezes são exigidas no fornecimento de sistemas ferroviários quanto à garantia da qualidade do produto. Estas normas estabelecem um modelo de gestão de qualidade e é aplicado em diversos seguimentos industriais. Uma norma que foi baseada na ISO 9001, porém voltada para o transporte ferroviário é a norma IRIS (*International Railway Industry Standard*), que, segundo *IRIS Certification* (2010), apresenta a estrutura da ISO 9001, adicionando requisitos específicos para o meio ferroviário quanto ao gerenciamento quanto ao projeto, arquitetura, confiabilidade, disponibilidade, manutenibilidade, segurança, ciclo de vida do produto etc.

7.2.3 - CONTROLE DA VARIÁVEL HUMANA

O controle da variável humana durante a manufatura dos componentes, segundo O'Connor (1988), apresenta diversos métodos, por exemplos, métodos motivacionais, métodos estatísticos de controle de qualidade etc. Um dos métodos consiste na inspeção, porém apresenta como defeitos o fato da inspeção não ser perfeita em todos os casos, pode causar desmotivação por parte da pessoa corrigida e em um primeiro momento aparenta que não agrega valor.

Outro método é a inspeção própria (*self inspection*), em que cada operador é responsável pelo componente que fabrica; desta forma, os operadores necessitam receber treinamentos para que esta inspeção seja bem feita.

Há ainda o método de defeito zero, em que metas são definidas e indicadores são criados de forma a incentivar a ausência de defeitos, porém a motivação para se manter este baixo nível de defeitos é difícil de ser mantido por um longo tempo.

O método de círculos da qualidade divide a organização em pequenos grupos de forma a permitir que os operadores possam transmitir as suas experiências para uma melhora contínua.

Desta forma, apesar de alguns defeitos, com o uso de métodos de controle da variável humana na manufatura, é possível que seja obtido um menor número de falhas no sistema causada pela variável humana.

7.3 - AÇÕES DE PREVENTIVAS E PALIATIVAS DE OPERAÇÃO

Conforme Figura 4.3, as falhas humanas são uma das maiores causas para o descarrilamento. Desta forma, ações de operação, ou seja, ações que devem ser tomadas pelo próprio condutor do trem ou pelas equipes responsáveis pelo controle das vias e da operação, devem ser consideradas como fatores que podem influenciar no descarrilamento.

Um dos fatores que tem influencia no evento estudado é a velocidade de operação, ou seja, dependendo da velocidade que o material rodante se encontra, esta pode ser determinante para a ocorrência do descarrilamento, desta forma, caso não haja limitação automática de velocidade (sistema ATP), o condutor deve respeitar os limites de velocidade e os controladores da via devem exigir a instalação de placas de velocidade limites.

Além disso, a condição física dos empregados pode influenciar também neste evento, por exemplo, dependendo do estado de atenção do condutor ou controlador da via, o tempo de reação a uma adversidade pode ser alterado e possivelmente a probabilidade de um descarrilamento também.

Existem ferramentas que podem ser utilizadas para a análise desta variável humana, como as ferramentas de confiabilidade humana bem como a análise de perigos de operação (OHA). Esta última tem como objetivo identificar e analisar os perigos relacionados com pessoas e procedimentos durante manufatura, testes, comissionamento, operação normal e em emergência e manutenções, desta forma é possível prever medidas para reduzir os riscos relacionados com os mesmos (FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION, 2000).

7.4 - AÇÕES PREVENTIVAS DE MANUTENÇÃO

As ações de redução de risco a serem implantadas na manutenção estão relacionadas com a prevenção de ocorrência que podem ser causadas devido a operação do material rodante e que podem gerar um descarrilamento.

7.4.1 - MANUTENÇÃO CENTRADA EM CONFIABILIDADE

A manutenção centrada em confiabilidade visa determinar através dos índices de confiabilidade os períodos de manutenção mais adequados. Este tipo de manutenção, deve aliar aspectos de confiabilidade, aspectos econômicos e de segurança quanto à passageiros, meio-ambiente, operadores e funcionários.

O *Reliability Centered Maintenance Guide* (1999) define a manutenção centrada em confiabilidade como sendo “uma abordagem de manutenção que combina praticas de manutenção reativa, preventiva, preditiva e pró-ativa e estratégias para maximizar a vida da função requerida de uma peça ou equipamento”.

Como observação, a teoria de RCM não têm como objetivo minimizar os custos em oposição à segurança.

Os princípios de RCM são:

- a – a preocupação do RCM é de manter a funcionalidade do sistema;
- b – a RCM é baseada em confiabilidade, ou seja, se preocupa com a probabilidade de ocorrência das falhas do sistema no período determinado e nas condições determinadas;
- c – RCM reconhece as limitações de projeto, já que por mais que uma manutenção pode ser boa, não sobrepõe um projeto ruim, desta forma o projeto e a manutenção devem ser aliadas para o desenvolvimento do produto.
- d – RCM se preocupa com a segurança primeiro e não com aspectos econômicos, sendo que a segurança deve ser mantida em detrimento dos aspectos econômicos;
- e – a definição de falha em RCM é a de uma condição insatisfatória, a falha não é uma opção. Também é definida como a perda da aceitabilidade da qualidade de um produto ou serviço, ou a perda da sua função;
- f – as tarefas de RCM devem produzir um resultado tangível, ou seja, os resultados devem ser mensurados pela redução da quantidade de falhas, ou pelo menos do dano causado pela falha;
- g – a manutenção centrada em confiabilidade reconhece 4 tipos de manutenção, garantindo consistência na determinação da manutenção nos equipamentos: manutenção corretiva, manutenção preventiva, monitoramento das condições e manutenção pró-ativa.
- h – RCM é um processo contínuo, sendo constantemente revisado para propiciar a adequação correta quando à mudança no processo, sucessos e fracassos alcançados. Este retorno na experiência é importante para a melhora contínua.

7.4.1.1 – Manutenção corretiva

A manutenção corretiva, em RCM, é uma decisão consciente de que o sistema perderá sua função momentaneamente. Esta decisão deve ser tomada, considerando a segurança da falha e aspectos econômicos quanto ao ciclo de vida.

Assumindo uma política de manutenção corretiva, é possível que ocorra canibalização de sistemas semelhantes a fim de permitir que o sistema em falha entre em operação, em caso de falta de um determinado componente.

7.4.1.2 – Manutenção preventiva

A manutenção preventiva, ou baseada em calendário é comumente usada. Este tipo de manutenção é baseado no tempo transcorrido desde a última manutenção. Itens que apresentam como política a manutenção preventiva, deveriam apresentar uma forte ligação do aumento da taxa de falha com o tempo de operação.

Para a determinação dos corretos períodos de manutenção, podem ser utilizados tanto retorno de experiência, quanto dados estatísticos ou até mesmo uma determinação conservativa do período.

7.4.1.3 – Monitoramento das condições

O monitoramento das condições é um tipo de manutenção baseada em inspeções e predições de falha. Nesta manutenção, dados são retirados e analisados para a determinação da necessidade da manutenção, por exemplo, dados de temperatura, pressão e análise de lubrificantes.

7.4.1.4 – Manutenção pró-ativa

A manutenção pró-ativa considera as lições aprendidas em manutenções passadas. Desta forma, inclui ações como melhoria das especificações, análise dos componentes em falha, análise da causa raiz etc.

Este tipo de manutenção é caracterizada pelo retorno e conversas constantes entre responsáveis pelo projeto e responsáveis pela manutenção, revisão dos processos de manutenção com preocupação no ciclo de vida do produto e constante reavaliação para melhoria constante.

7.4.1.5 – Políticas de manutenção recomendadas

Dentre os diferentes tipos de manutenção apresentados na manutenção centrada em confiabilidade, a manutenção corretiva é a menos aplicável quando se tem como objetivo diminuir a probabilidade de ocorrência de um descarrilamento, já que a mesma admite que o sistema falhará para que ocorra a intervenção.

Os outros tipos de manutenção (preventiva, monitoramento das condições e pró-ativa) podem ser utilizadas para diminuir a taxa de ocorrência do descarrilamento, sendo que suas eficácias serão variáveis com o sistema, ambiente de uso etc.

7.4.2 - MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DE VIA

Os parâmetros de via devem ser inspecionados, pois conforme a Tabela 4.4, são um dos principais causadores do descarrilamento. Desta forma, parâmetros como características do trilho, bitola, sobre-elevação, raio mínimo, desgaste, funcionamento de máquinas de chave, jacarés etc devem ser monitorados a fim de garantir maior segurança na operação do veículo ferroviário.

7.4.3 - SISTEMA DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS

Os parâmetros que influenciam o descarrilamento poderiam ser monitorados para permitir uma rápida identificação e manutenção das características de operação a fim de evitar que este evento indesejado ocorra. Para tal, pode-se definir um sistema, podendo ser baseado, por exemplo, no TCMS (*Train Control and Monitoring System*). Neste sistema de diagnósticos de falhas quanto ao descarrilamento, deve-se considerar os seguintes aspectos:

- elencar os elementos que influenciam no descarrilamento;
- elencar os possíveis monitoramentos considerando os custos e benefícios de cada monitoramento;
- considerar um SIL (nível de integridade de segurança) para o sistema de monitoramento condizente com a aplicação. Este nível de SIL pode ser determinado em normas como a EN 50129 (2002).

Caso uma função demande um THR menor que 10^{-9} (por hora e por função), deve ser considerada uma das seguintes alternativas:

- se for possível, dividir a função em diferentes sub-funções de maneira que o THR destas e conseqüentemente o SIL seja alterado;
- se a função não puder ser dividida, as ações e medidas requeridas para um SIL 4 devem ser seguidas e a função deve ser usada em combinação com uma outra ação operacional ou técnica de maneira a alcançar o THR necessário.

Baseado nos resultados constantes nesta dissertação, recomenda-se que o fluxograma apresentado na Figura 7.5 seja seguido para o início da elaboração deste software de monitoramento.

Figura 7.5 - Fluxograma de Monitoramento

Neste fluxograma, são apresentados alguns parâmetros que poderiam ser monitorados para a determinação de uma provável ocorrência de descarrilamento. Nesta mesma figura, são apresentados alguns dispositivos de monitoramento que auxiliam na determinação dos parâmetros a serem vigiados (como pressostatos e sensores de velocidade).

7.5 - ANÁLISE DO BENEFÍCIO

O ideal para a determinação do benefício de cada solução em termos de melhora da confiabilidade seriam testes comparativos em operação para a verificação da real eficácia, porém, conforme apresentado na análise de risco (item 2.2), a estimativa do benefício pode tornar-se difícil pelo tempo acumulado necessário para o ensaio, pois quanto menor a quantidade de ocorrência de falhas, menor seria a confiança quanto a estes valores no cálculo da taxa de falha.

Outra alternativa seria se a autoridade ferroviária determinasse o tempo para a comparação entre uma solução e outra, porém, considerando-se por exemplo o tempo de garantia fornecido pelos fabricantes, pode-se não ser possível dentro deste intervalo de tempo determinar com exatidão as taxas de falha e realizar uma comparação quanto à eficácia de cada solução.

Assim, para este trabalho, será proposto estudar a eficácia de uma solução através do método probabilístico condicionado avançado conforme apresentado no item 2.1.4.2 e conforme código computacional desenvolvido em 2.1.4.4.

A solução que será avaliada é a manutenção preventiva para diferentes intervalos de acordo com o item 7.4.1.2 supondo que a mesma restabelece por completo as condições originais de operação.

O benefício que será analisado é a alteração da confiabilidade e dos custos envolvidos.

Conforme apresentado em 2.1.4.2, o algoritmo deve seguir os seguintes passos:

- a) Adotar um valor para o índice de confiabilidade β ;
- b) Adotar para todas as variáveis relevantes no sistema que $x_i^* = m_i$, onde m_i é o valor esperado da variável básica x_i ;
- c) Calcular $g_i'(X^*)$ Para as n variáveis básicas;
- d) Calcular o valor da constante de proporcionalidade α_i para as n variáveis básicas;
- e) Calcular um novo ponto de linearização X^* ;
- f) Repetir os passos “c” a “e”, até que o ponto de linearização se mantenha constante;
- g) Calcular o valor da função do estado limite $Z = g(X^*)$ Utilizando-se o ponto de linearização obtido no passo f;
- h) Utilizar valores de β e repetir os passos “c” a “h” até obter-se um valor nulo para a função de estado limite, ou seja, $Z=0$ e
- i) determinar a probabilidade de colapso.

Desta forma, escolhendo como ação de redução de risco a manutenção preventiva apresentada nos conceitos de manutenção centrada em confiabilidade (item 7.4.1.1), pode-se calcular o benefício tanto em termos de confiabilidade através do método probabilístico condicionado avançado quanto em termos de custos.

Pelo critério de Nadal apresentado na equação (4.4) e descrito abaixo,

$$\frac{L}{V} = \frac{\tan \delta - \mu}{1 + \mu \tan \delta}$$

nota-se que o mesmo pode ser escrito como a diferença entre a solicitação e a resistência, em que a relação L/V torna-se a solicitação e $(\tan \delta - \mu) / (1 + \mu \tan \delta)$ torna-se a resistência. Desta forma a função de desempenho Z ou função do estado limite que pode ser expressa pela diferença entre a resistência e a solicitação é representada por:

$$Z = \frac{\tan \delta - \mu}{1 + \mu \tan \delta} - \frac{L}{V} \quad (7.1)$$

Obtida a expressão da variável Z, tem-se o colapso quando Z é menor ou igual à zero, caso contrário, não ocorre o colapso, neste caso, o descarrilamento.

Este mesmo algoritmo para a determinação da probabilidade de falha poderia ser aplicado para outras ações de redução de risco apresentadas nesta dissertação, podendo ser citada a ação de otimização da suspensão, porém para cada ação seria necessária a determinação da função do estado limite que descreve o problema.

7.5.1- CASO EXEMPLO

O caso exemplo que será apresentado é resumido na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Valores das variáveis no caso exemplo

continua

Parâmetro	Descrição
Perfil de roda considerado	Os dados utilizados para a determinação dos resultados foram obtidos da norma UIC 510 – 2 OR (2004) em seu anexo B que apresenta um exemplo de perfil de roda UIC-ERRI para rodas com diâmetro entre 1000 mm e 760 mm e altura de flange igual a 28 mm. Neste perfil, os valores $\tan \delta$, Y_r (valor em milímetros na direção horizontal), Z_r (valor em milímetros na direção vertical) variam conforme 0.
Coeficiente de atrito μ	Segundo Barbosa (1999), em seus ensaios, foram apresentados valores de coeficiente de atrito que variam de 0,13 a 0,50 dependendo da condição da pista (seca ou com óleo). Desta forma, para o caso exemplo será adotado um valor médio e constante igual a 0,315.

Parâmetro	Descrição
L / V	<p>Pode-se estimar os valores das forças através de equações analíticas. Por exemplo, TAKAI et al (2002) apresentam uma equação analítica para estimar a força lateral.</p> <p>Porém será considerado hipoteticamente que o valor varia seguindo uma distribuição normal com valor médio calculado pela equação (4.4) considerando o valor máximo da tangente δ (o que corresponde à região de $-39,5 \text{ mm} \leq Y_r \leq -38,5 \text{ mm}$ ou ângulo δ igual a 70°) do perfil de roda UIC-ERRI considerado, o valor do coeficiente de atrito igual a 0,315 e admitindo que a magnitude média final será igual a 50% do valor obtido.</p> <p>Além disso, será considerado que o desvio padrão é de 0,1304.</p> $f_{L/V}(L/V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{L/V - \text{média}}{\sigma}\right)^2\right] \quad \begin{aligned} \text{média} &= \frac{1,3040}{2} \\ \sigma &= 0,1304 \end{aligned}$ <p>É necessário realçar que os valores e distribuições adotados são hipóteses e que para a determinação da probabilidade de falha de um caso real, é preciso o estudo prévio e determinação do comportamento da relação L/V.</p>
	<p>A taxa de desgaste para as rodas irá variar, entre outros fatores, com as características de operação, a massa por eixo, as condições de conservação da vida e os equipamentos instalados na via e no material rodante (equipamentos de lubrificação).</p> <p>Por esta razão, como simplificação e para permitir a exemplificação do método, será considerado que a taxa de desgaste será de $D^*(1\%/10.000\text{km})$.</p> <p>Desta forma, manipulando a equação (7.1) e assumindo as considerações apresentadas nesta tabela:</p> $Z = \frac{\tan\left(70^\circ - D\left(\frac{1^\circ}{10.000}\right)\right) - 0,315}{1 + 0,315 \cdot \tan\left(70^\circ - D\left(\frac{1^\circ}{10.000}\right)\right)} - L/V$

Os valores obtidos de probabilidade de falha para diferentes quilometragens são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Valor das probabilidade de falhas de acordo com diferentes quilometragens

Quilometragem	β	Probabilidade de colapso na quilometragem considerada
0	4,87	$5,58 \times 10^{-7}$
10.000	4,62	$1,92 \times 10^{-6}$
20.000	4,31	$8,16 \times 10^{-6}$
30.000	3,99	$3,30 \times 10^{-5}$
40.000	3,68	$1,17 \times 10^{-4}$
50.000	3,38	$3,62 \times 10^{-4}$
60.000	3,09	$1,00 \times 10^{-3}$

Neste caso, percebe-se que as probabilidades apresentam uma variação considerável para diferentes valores de quilometragens percorridas e neste caso a quilometragem pode guiar os períodos de manutenção das rodas. Ou seja, quanto antes ocorrer a atuação correta, menor a probabilidade de falha.

Os valores de probabilidade de colapso não alcançam o valor zero, pois são obtidos dos índices de confiabilidade (β) calculados através da função distribuição acumulada da distribuição normal reduzida e este índice de confiabilidade deveria apresentar determinados valores negativos que não podem ser alcançados com base nas distribuições consideradas para as variáveis básicas no cálculo da probabilidade de colapso. Ou seja, com as variáveis básicas assumidas não é possível alcançar uma probabilidade de colapso igual a zero.

Além da análise em termos de melhora na confiabilidade conforme Tabela 7.2, pode-se estimar os custos envolvidos para cada intervalo de manutenção. Para tal, os seguintes critérios devem ser avaliados: custo do descarrilamento referente à perda de material, custo do descarrilamento referente à perda de vidas, custo da manutenção referente a material e custo de manutenção referente à mão de obra.

O custo de perda de material considerado será de R\$ 50.000.000,00 e será chamado de (C_m).

O custo de perdas de vidas é difícil de ser quantificados em valores monetários pois deve considerar por exemplo o custo de danos morais, porém, considerando apenas o custo devido a indenizações por danos materiais (C_{in}), o mesmo será estimado baseando-se no Art. 948 do Código Civil - Lei 10406/02, que estabelece:

“No caso de homicídio, a indenização consiste, sem excluir outras reparações:

I - no pagamento das despesas com o tratamento da vítima, seu funeral e o luto da família;

II - na prestação de alimentos às pessoas a quem o morto os devia, levando-se em conta a duração provável da vida da vítima.” (JUSBASIL, 2011)

Desta forma, o C_{in} considerará o valor do salário mínimo de R\$ 540,00 (janeiro de 2011) e o número médio de 3,3 pessoas por domicílio na região urbana no Brasil (IBGE, 2011), a expectativa de vida à idade de 0 anos de 72,9 anos (IBGE, 2010), 1,9 milhão em média de passageiros transportados em dia útil (CPTM, 2011), 2.265 viagens (CPTM, 2011) e o custo estimado com funeral e luto da família de R\$20.000,00. Apenas para efeitos de cálculos, a média etária da população que utiliza o transporte ferroviário considerada será de 30 anos e o valor pago de dano material será considerado até a idade média do falecimento destes familiares (expectativa de vida).

$$C_{in} = \frac{1.900.000}{2265} \cdot [20.000 + 12 \cdot (3,3 - 1) \cdot (72,9 - 30) \cdot 540,00] = R\$553.123.638,00 \quad (7.2)$$

O custo da manutenção referente à mão de obra (C_{mo}) será calculado considerando a remuneração bruta paga pela CPTM em 2009 (R\$ 335.681.000,00) e a quantidade de empregados de 6.720 no final do exercício de 2009 (CPTM, 2011). Será considerada que a manutenção de 1 trem exigirá 24 homem x horas e que a mesma não ocorre em horários comerciais.

$$C_{mo} = 24 \cdot \frac{335.681.000}{6.720 \cdot 365 \cdot 8} = R\$410,57 \quad (7.3)$$

Já o custo da manutenção referente a material (C_{mm}) será hipoteticamente estimado como igual a R\$ 3.000,00 por manutenção.

Desta forma, a seguinte expressão será utilizada para determinar o custo anual do risco, considerando a quilometragem anual de 120.000 km:

$$C_a = \frac{120.000}{Q} \cdot [P_F \cdot (C_m + C_i) + (C_{mo} + C_{mm})] \quad (7.4)$$

Assim, os valores de C_a são definidos na Tabela 7.3.

Tabela 7.3 - Valor do custo anual referente ao risco de descarrilamento

Q (km)	P_F	C_a (R\$)
0	$5,58 \times 10^{-7}$	-
10.000	$1,92 \times 10^{-6}$	48.918,79
20.000	$8,16 \times 10^{-6}$	49.992,35
30.000	$3,30 \times 10^{-5}$	93.254,60
40.000	$1,17 \times 10^{-4}$	221.928,10
50.000	$3,62 \times 10^{-4}$	532.179,18
60.000	$1,00 \times 10^{-3}$	1.213.068,41

É possível inferir pela Tabela 7.3 que entre os valores, o de 10.000 km é o melhor valor para a manutenção quando comparado aos outros no caso exemplo pois apresenta menor custo anual referente ao risco de descarrilamento, porém, a estimativa do custo não apresenta grande diferença entre os valores de 10.000 e 20.000 km e a manutenção a cada 60.000 km apresenta maior custo anual referente ao risco de descarrilamento.

Os valores apresentados na Tabela 7.1 são, em sua maioria, adotados para possibilitar a aplicação do caso exemplo. Para alguma destas variáveis, é realizada uma análise de benefício com os valores apresentados na Tabela 7.4.

Tabela 7.4 - Valores das variáveis na análise de sensibilidade

Parâmetro	Valor adotado no caso exemplo	Valor mínimo utilizado na análise de sensibilidade	Valor máximo utilizado na análise de sensibilidade
Coeficiente de atrito μ	0,315.	0,13	0,50
$f_{L/V}(L/V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{L/V - média}{\sigma}\right)^2\right]$			
L / V	$média = \frac{1,3040}{2}$ $\sigma = 0,1304$	$média = \frac{1,3040}{2} - 0,05 \frac{1,3040}{2}$ $\sigma = 0,1304$	$média = \frac{1,3040}{2} + 0,05 \frac{1,3040}{2}$ $\sigma = 0,1304$
Taxa de desgaste	D*(1%/10.000km)	D*(0,8%/10.000km)	D*(1,2%/10.000km)

Desta forma, tem-se para o cálculo da probabilidade de falha e do custo:

- Considerando apenas valores diferentes de coeficiente de atrito para o cálculo da probabilidade de falha e custo, tem-se os resultados apresentados na Tabela 7.5.

Tabela 7.5 - Custo anual referente ao risco de descarrilamento para diferentes valores de coeficiente de atrito

Q (km)	$\mu = 0,13$		$\mu = 0,50$	
	P_F	C_a (R\$)	P_F	C_a (R\$)
0	$2,87 \times 10^{-7}$	-	$1,16 \times 10^{-2}$	-
10.000	$2,87 \times 10^{-7}$	37.097,45	$2,17 \times 10^{-2}$	157.088.418,15
20.000	$2,87 \times 10^{-7}$	18.548,72	$3,84 \times 10^{-2}$	138.977.197,60
30.000	$2,87 \times 10^{-7}$	12.365,82	$6,18 \times 10^{-2}$	149.103.837,58
40.000	$2,87 \times 10^{-7}$	9.274,36	$9,51 \times 10^{-2}$	172.079.929,62
50.000	$2,87 \times 10^{-7}$	7.419,49	$1,38 \times 10^{-1}$	199.616.803,79
60.000	$2,87 \times 10^{-7}$	6.182,91	$1,89 \times 10^{-1}$	228.469.071,20

Nesta análise de sensibilidade, percebe-se que para pequenos valores de coeficiente de atrito (0,13), a probabilidade de falha não se altera com a mudança dos intervalos de manutenção, uma das explicações poderia ser que dependendo das magnitudes das variáveis, ações de manutenções podem não ser eficientes para alterar a probabilidade de um descarrilamento.

- Considerando apenas valores diferentes de média da razão L / V para o cálculo da probabilidade de falha e custo, tem-se os resultados apresentados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6 - Custo anual referente ao risco de descarrilamento para diferentes valores de média da razão L / V

Q (km)	L / V: $média = \frac{1,3040}{2} - 0,05 \frac{1,3040}{2}$ $\sigma = 0,1304$		L / V: $média = \frac{1,3040}{2} + 0,05 \frac{1,3040}{2}$ $\sigma = 0,1304$	
	P_F	C_a (R\$)	P_F	C_a (R\$)
0	$1,07 \times 10^{-6}$	-	$1,07 \times 10^{-6}$	-
10.000	$1,43 \times 10^{-6}$	45.404,27	$5,41 \times 10^{-6}$	74.195,71
20.000	$3,56 \times 10^{-6}$	30.398,48	$2,45 \times 10^{-5}$	106.300,86
30.000	$1,22 \times 10^{-5}$	41.142,90	$9,20 \times 10^{-5}$	233.647,90
40.000	$4,43 \times 10^{-5}$	88.863,79	$3,02 \times 10^{-4}$	554.805,75
50.000	$1,42 \times 10^{-4}$	212.129,33	$8,74 \times 10^{-4}$	1.272.160,13
60.000	$4,19 \times 10^{-4}$	511.122,06	$2,3 \times 10^{-3}$	2.780.205,87

- Considerando apenas valores diferentes de taxa de desgaste para o cálculo da probabilidade de falha e custo , tem-se os resultados apresentados na Tabela 7.7.

Tabela 7.7 - Custo anual referente ao risco de descarrilamento para diferentes valores de taxa de desgaste

Q (km)	Taxa de desgaste: D*(0,8%/10.000km)		Taxa de desgaste: D*(1,2%/10.000km)	
	P _F	C _a (R\$)	P _F	C _a (R\$)
0	$5,58 \times 10^{-7}$	-	$5,58 \times 10^{-7}$	-
10.000	$1,43 \times 10^{-6}$	45.404,27	$2,56 \times 10^{-6}$	53.534,14
20.000	$4,71 \times 10^{-6}$	34.561,84	$1,46 \times 10^{-5}$	70.254,57
30.000	$1,46 \times 10^{-5}$	46.836,38	$7,23 \times 10^{-5}$	186.213,43
40.000	$4,43 \times 10^{-5}$	88.863,79	$2,91 \times 10^{-4}$	535.029,33
50.000	$1,17 \times 10^{-4}$	175.811,63	$1,00 \times 10^{-3}$	1.454.501,30
60.000	$2,91 \times 10^{-4}$	356.686,22	$2,90 \times 10^{-3}$	3.503.954,24

Nestas análises de sensibilidades, percebe-se que para pequenas variações da razão L / V ou da taxa de desgaste, o custo anual referente ao risco de descarrilamento altera-se consideravelmente, porém em termos de probabilidade de falha, a alteração do cenário de menor valor para o de maior valor apresentou menor variação quando comparado ao cenário de variação do coeficiente de atrito.

Além disso, durante a operação, as variáveis L / V e coeficiente de atrito são mais difíceis de serem determinadas quando comparadas a taxa de desgaste, pois o perfil da roda e conseqüentemente o desgaste pode ser monitorado por equipamentos específicos enquanto que o coeficiente de atrito varia com as condições climáticas (por exemplo dias chuvosos ou secos) e a razão L / V varia por exemplo com a massa do veículo e número de passageiros.

CAPÍTULO 8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

8.1- CONCLUSÕES

Conforme discutido em 2.2, como no Brasil não existe a figura da autoridade ferroviária, é comum transferir as responsabilidades de aceitação para as empresas que estão adquirindo o material rodante. Ademais, cada empresa que adquire o material rodante ou é responsável pela operação dos mesmos pode definir seus próprios critérios de aceitação quando da ausência desta figura ferroviária.

Para tal, normas como EN 50126 (2000), MIL-STD-882C (1993) e IEC 62278 (2002) que se baseou na norma EN 50126, apresentam formas de gerenciamento e condução de estudos de segurança que podem ser considerados, cabendo à autoridade ferroviária estipular se as mesmas serão aceitas.

Neste trabalho foi proposto um método de análise de risco aplicada ao descarrilamento que complementa as simulações computacionais e simulações dinâmicas de forma a tornar mais seguro o transporte ferroviário, que não apresenta diminuição da taxa de acidentes conforme demonstrado na Figura 4.1. Esta metodologia foi apresentada na seção 5.2. E conforme apresentado na seção 2.2, a análise de risco deve ser pautada pela:

- descrição da metodologia;
- hipóteses, limitações e justificativas quanto ao uso da metodologia;
- identificação dos resultados estudo do perigo;
- estimativa do risco e nível de confiança;
- resultados de estudos;
- discussão sobre fonte de dados e
- referências.

A descrição da metodologia proposta aplicada ao descarrilamento considerou as seguintes etapas: entendimento do problema e identificação dos elementos sob

análise, análise de causa e consequência, elaboração de FTA, elaboração de FMEA e proposta de cálculo da probabilidade de ocorrência do evento. O fluxograma que descreve este método foi apresentado na Figura 5.1.

Pela introdução dos conceitos das ferramentas utilizadas, foi possível a sua aplicação no caso exemplo considerando como limitações para o uso da metodologia a dificuldade da determinação quantitativa dos parâmetros que influenciam o descarrilamento, diferentemente da abordagem pelos critérios de descarrilamento que permitem maior facilidade na quantificação, entretanto o método proposto complementa as simulações computacionais e dinâmicas para tornar mais seguro o transporte ferroviário, por exemplo, através da identificação de elementos críticos quanto ao descarrilamento e priorização de ações de redução de risco.

A análise de causa e consequência elaborada permitiu a identificação da consequência dos eventos iniciais, ou seja, o descarrilamento, bem como a combinação de falhas que podem gerar um descarrilamento, isto é, a falha de um sistema aliada a falha na detecção deste evento.

Já a análise por árvore de falhas permite uma rápida identificação visual dos eventos que causam o evento topo analisado, identificando os eventos básicos que foram submetidos a análises do tipo FMEA. Esta, por sua vez, permitiu a identificação de deficiências no projeto e priorização das ações de gerenciamento para diminuição do risco.

Percebe-se ainda que as análises do tipo FTA apresentaram o seu evento topo formado por elementos “não desenvolvidos” combinados por portas lógicas do tipo “ou”. Isto ocorre pois não há um detalhamento quanto a um projeto específico e desta forma não é possível, neste trabalho, o aprofundamento dos eventos “não desenvolvidos”. Já em um estudo aplicado a um projeto específico, seria possível o detalhamento deste eventos e haveria a presença de portas lógicas do tipo “e”.

Para a estimativa da melhora de confiabilidade e do custo, foi proposto uma metodologia baseada no método probabilístico condicionado avançado, que é um

ponto de equilíbrio entre o método semi probabilístico (que utiliza fatores de segurança parciais para as variáveis empregadas no modelo) e o método probabilístico puro (que considera todas as possíveis configurações de colapso). A eficácia deste método depende da coleta de informações quanto ao comportamento das variáveis básicas.

Ressalta-se que os dados utilizados para estimativa da contribuição de cada causa do descarrilamento foi baseada na *Railway Safety Statistics* (2005), que é um banco de dados americano, pois a mesma possui um maior detalhamento quanto aos acidentes quando comparado ao banco de dados brasileiro consultado (ANTT, 2007). Esta opção pode causar uma distorção quanto às informações apresentadas, pois o banco de dados utilizado pode não refletir o cenário brasileiro das causas dos acidentes e das causas dos descarrilamentos.

Assim, a metodologia proposta tem o intuito de auxiliar na identificação de problemas relacionados ao descarrilamento e facilitar o gerenciamento quanto aos problemas de segurança de modo a agregar maior nível de confiança à operação ferroviária e diminuição do número de acidentes. Esta metodologia não tem a ambição de substituir os estudos desenvolvidos mas tem o objetivo de auxiliar no estudo deste evento, que conforme a Figura 4.1, não tem apresentado diminuição em sua taxa de ocorrência.

8.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através das conclusões anteriores e com o intuito de melhorar a determinação das causas e prevenções do descarrilamento bem como promover o desenvolvimento da análise de risco, algumas recomendações para trabalhos futuros podem ser apresentadas:

- Aplicação da mesma metodologia para o estudo de eventos críticos relacionadas ao material rodante e à operação ferroviária.
- Determinação da vida útil de componentes como, por exemplo, a vida útil do eixo do rodeiro através de ferramentas de confiabilidade e métodos probabilísticos, podendo ainda utilizar dados de retorno em garantia bem como histórico de

intervenções e trocas. Desta forma, há a possibilidade de determinação do correto período de troca dos componentes em função dos diferentes parâmetros encontrados para cada aplicação, evitando custos desnecessários associados à troca desnecessária de componentes e estoque de material.

- Simulação das recomendações apresentadas neste trabalho, quantificando a eficácia de cada recomendação através do uso do método probabilístico condicionado avançado.
- Segundo *Railway Safety Statistics* (2005), pelo menos 29% das falhas que geram o descarrilamento estão relacionadas a fatores humanos, desta forma, uma recomendação para trabalho futuro seria o estudo da influência da variável humana no estudo do descarrilamento que não foi analisada neste trabalho devido a uma opção de metodologia. Esta pesquisa sobre a variável humana no descarrilamento poderia, por exemplo, utilizar a metodologia de confiabilidade humana.
- Detalhamento da análise de benefício realizada no item 7.5.1, pois conforme apresentado, alguns parâmetros ou comportamentos foram assumidos como o comportamento da razão L/V , o custo de manutenção referente a material, o valor do coeficiente de atrito etc. Desta forma, o caso exemplo poderia sofrer uma análise mais profunda.

Como ressalva, muita das recomendações para pesquisas enfrentam deficiências quando a qualidade e quantidade de dados de acidentes e de ações de manutenções executadas pelas operadoras atuantes no transporte ferroviário brasileiro, ou seja, as informações consultadas que estão em domínio público não apresentam a riqueza de detalhes necessária para o aprofundamento do estudo elaborado. Desta forma os trabalhos futuros também podem ser prejudicados por esta carência de informações.

CAPÍTULO 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Fabio Cardoso. **Análise das Forças de Contato e Comportamento Dinâmico de Rodeiro Ferroviário**. 2006. 132p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. São Paulo, 2006.

ANTT. Apresenta a evolução recente do transporte ferroviário. Disponível em <<http://www.antt.gov.br/concessaofer/EvolucaoFerroviaria20080707.pdf>>. Acesso em 6 de julho de 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9321: Cálculo de Estimativas por Ponto e Limites de Confiança Resultante de Ensaios de Determinação da Confiabilidade de Equipamentos**. 1986. 34 p.

BARBOSA, Roberto Spinola. **Aplicação de Sistemas Multicorpos na Dinâmica de Veículos Guiados**. 1999. 273p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. São Carlos, 1999.

BARBOSA, Roberto Spinola. **A 3D Contact Force Safety Criterion for Flange Climb Derailment of a Railway Wheel**. Vehicle System Dynamics – Taylor & Francis Group, 12.p., 2004, v.42, no 5, pp 289 – 300.

BARBOSA, Roberto Spinola. **Safety criterion for railway vehicle derailment**. 8th International Heavy Haul Conference – Safety, Environment and Productivity, Rio de Janeiro, Brasil, 8.p., 2005, pp 477 - 484.

BRINA, Helvécio Lapertosa. **Estradas de Ferro**. 2^a ed. Minas Gerais: Editora UFMG, 1988. v.1.

BUL.GARIN, Miguel Rodríguez; DÍAZ-DE-VILLEGAS, José-Manuel García. **Desvíos Ferroviários**. Editora Ingenieria cántabra, 1995.

CENELEC. **EN 50126: Applications ferroviaires – Spécification et demonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la securité (FDMS) – Part 1: Exigences de base et procédés génériques.** 2000. 76 p.

CENELEC. **EN 50126: Railway applications – The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) – Part 2: Guide to the application of EN 50126-1 for safety.** 2007. 131 p.

CENELEC. **EN 50126: Railway applications – The specification and demonstration of reliability, availability, maintainability and safety (RAMS) – Part 3: Guide to the application of EN 50126-1 for rolling stock RAMS.** 2006. 62 p.

CENELEC. **EN 50129: Railway applications – Communication, signaling and processing systems – Safety related electronic systems for signaling.** 2002. 44 p.

CPTM. Apresenta fotos de trens. Disponível em <http://www.cptm.sp.gov.br/e_frota/frota/default.asp>. Acesso em 27 de dezembro de 2010.

CPTM. Apresenta balanço patrimonial. Disponível em <[http://www.cptm.sp.gov.br/e_contabeis/Balanco Patrimonial 2009.PDF](http://www.cptm.sp.gov.br/e_contabeis/Balanco_Patrimonial_2009.PDF)>. Acesso em 03 de janeiro de 2011.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns.** 2^a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1959. 412p.

CONSOLI, Luciano Ribeiro Pinto. **Análise do Comportamento Dinâmico Lateral de um Veículo Ferroviário.** 2007. 158p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. São Paulo, 2007.

DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-882C: System Safety Program Requirements.** DOD, 1993.

DEPARTMENT OF DEFENSE. **MIL-STD-1629A: Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis.** DOD, 1984.

DM Sistemas de Medição. Apresenta a empresa e características dos produtos. Disponível em <<http://dmsistemas.ind.br>>. Acesso em 07 de agosto de 2010.

FACINI DOS SANTOS, Alexandre. **Gerenciamento da Confiabilidade em Projetos de Material Rodante Ferroviário.** 2007. 256p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. São Paulo, 2007.

FEDERAL RAILROAD ADMINISTRATION. **Fracture and Fatigue Damage Tolerance of Bainitic and Pearlitic Rail Steels.** U.S. Department Of Transportation, 4p., 2006.

FEDERAL TRANSIT ADMINISTRATION. **Hazard Analysis Guidelines for Transit projects.** Cambridge, FTA, 2000, 35p.

IBGE. Apresenta informações a pirâmide etária brasileira. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/tabuadevida/2008/default.shtm>>. Acesso em 30 de dezembro de 2010.

IBGE. Apresenta informações a pirâmide etária brasileira. Disponível em <http://www.ibge.gov.br/censo2010/piramide_etaria/index.php>. Acesso em 3 de janeiro de 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-61124: Reliability testing – Compliance tests for constant failure rate and constant failure intensity.** Geneva, IEC, 2006. 249 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-62278: Railway Applications – Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).** Geneva, IEC, 2002. 159 p.

IRIS Certification. Apresenta informações sobre a norma *International Railway Industry Standard*. Disponível em <<http://www.iris-rail.org>>. Acesso em 9 de outubro de 2010.

ISOGRAPH. **FaultTree+**. Version 7.0.1, 1996.

IWNICKI, Simon. **Handbook of Railway Vehicle Dynamics**. 1st ed. New York: Taylor & Francis, 2006. 535p.

JUSBRASIL. Apresenta o código civil brasileiro. Disponível em <<http://www.jusbrasil.com.br/legislacao/103257/codigo-civil-lei-10406-02#art948>> Acesso em 03 de janeiro de 2011.

Knorr-Bremse Brasil. Apresenta a empresa e características dos produtos. Disponível em <<http://www.knorr-bremse.com.br>>. Acesso em 15 de dezembro de 2009.

LAUERMAN, Elvis Diógenes. **Ferrovias – Via Permanente**. 2008. 68p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. Rio Grande do Sul, 2008.

M.I.M.F. Apresenta produtos de materiais ferroviários. Disponível em <<http://www.mimf.com.br>>. Acesso em 28 de dezembro de 2009.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and Analysis of Experiments**. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, 1997. 704p.

O'CONNOR, Patric D. T. **Practical Reliability Engineering**. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. 398p.

PIRES, Cassiano Lobo. **Simulação do Sistema de Tração Elétrica Metro-Ferroviária**. 2006. 424 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PORTO, Telmo Giolito. **A Infra-estrutura da Via Férrea**. 1984. 122 p + apêndice. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

QUANTERION SOLUTION INCORPORATED. Apresenta as datas de publicação de documentos e guias referentes a Confiabilidade. Disponível em: <<http://www.quanterion.com/Publications/Toolkit/index.asp>>. Acesso em: 16 de julho de 2010.

Railroad Safety Statistics 2005 Annual Report. Apresenta relatório anual de estatísticas dos trens em operação nos EUA. Disponível em: <<http://safetydata.fra.dot.gov/publicobjects/bull2005-book.pdf>>. Acesso em: 06 de julho de 2009.

REBS Wheel Flange Lubrication for Rail Vehicles. Apresenta características do lubrificador de flange. Disponível em <<http://www.rebs.de/english/products/spurkranzschmierung.php>>. Acesso em 25 de dezembro de 2009.

RELIABILITY ANALYSIS CENTER. **FMD-97: Failure Mode / Mechanism Distribution 1997. New York**. RAC, 1997. 440p.

RELIABILITY ANALYSIS CENTER. **NPRD-95: Nonelectronic parts reliability data. New York**. RAC, 1995. 1020p.

RELIABILITY ANALYSIS CENTER. **Reliability Toolkit: Commercial Practices Edition. A Practical Guide for Commercial Products and Military Systems Under Acquisition Reform**. RAC, 1995¹. 508p

SILVA, Ricardo Martins. **PTR 2501 - Ferrovias**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004. 80p. Apostila para a disciplina PTR 2501 – Ferrovias.

¹ Dado proveniente de QUANTERION SOLUTIONS INCORPORATED (2010)

SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CONFIABILIDADE, 2008, Florianópolis.
Confiabilidade Humana: nova metodologia de análise qualitativa e quantitativa.

SOUZA, Gilberto Francisco Martha. **Análise de Confiabilidade Estrutural a Fadiga de Risers Rígidos.** 1994. 295 p + apêndice. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

SOUZA, Gilberto Francisco Martha. **Desenvolvimento de Metodologia para a Análise Probabilística do Processo de Fadiga de Estruturas Soldadas.** 2001. 216 p. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

SUNDARARAJAN, C. Guide to Reliability Engineering – Data, Analysis, Applications, Implementation, and Management. 1st ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991. 414p.

STEFANI, Celia Regina Baider. **O Sistema Ferroviário Paulista: Um Estudo Sobre a Evolução do Transporte de Passageiros Sobre Trilhos.** 2007. 304p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências da Universidade de São Paulo. São Paulo. São Paulo, 2007.

STOPATTO, Sérgio. **Via Permanente Ferroviária.** São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1987. v.3.

TAKAI, Hideyuki; UCHIDA, Masao; MURAMATSU, Hironari; ISHIDA, Hiroaki. **Derailment Safety Evaluation by Analytic Equations.** QR of RTRI, Vol.43, No.3, Sep. 2002, pp 119 – 124.

THE MATHWORKS. **Matlab – The Language of Technical Computing.** Version 7.9.0.529 (R2009b), 2009.

TRENSURB. Apresenta a característica da via permanente. Disponível em <<http://www.trensurb.gov.br/php/metro/trem.php#via>> Acesso em 27 de dezembro de 2010.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 510-2 OR: Trailing Stock: wheels and wheelsets. Conditions concerning the use of wheels of various diameters.** UIC, 2004. 71 p.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 518 OR: Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour – Safety – Track fatigue – Ride quality.** UIC, 2005. 518 p.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 541-1 OR: Brakes – regulations concerning the design of brake components.** UIC, 2003. 48 p.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 541-3 OR: Brakes – Disc brakes and their application – General conditions for the approval of brake pads.** UIC, 2004. 63 p.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 541-4 OR: Brakes – Regulations concerning the manufacture of brake components – Self-adjusting load-proportional braking system and automatic “empty-loaded” control device.** UIC, 2004. 21 p.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 541-5 OR: Brakes – Electropneumatic brake (ep brake) Electropneumatic emergency brake override (EBO).** UIC, 2006. 57 p.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 544-1 O: Freins – performance de freinage.** UIC, 2004. 111 p.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 544-2 OR: Conditions To Be Observed by the Dynamic Brake of Locomotives and Motor Coaches so that the Extra Braking Effort Produced can be taken into Account for the Calculation of the Brake-weight.** UIC, 1983. 10 p.

UNION INTERNATIONALE DES CHEMIS DE FER. **UIC 813 O: Technical specification for the supply of wheelsets for tractive and trailing stock – Tolerances and assembly.** UIC, 2003. 35 p.

USA CONSTRUCTION ENGINEERING RESEARCH LABORATORIES. **Reliability Centered Maintenance (RCM) Guide.** Estados Unidos, USACERL, 1999, 97p.

VILLEMEUR, Alain. **Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment.** 1st ed. New York: John Willey & Sons, 1991. 363p + anexos. v.1.

WAGNER, Simon. **Derailment Risk Assessment.** 2004. 154p. Dissertação (Mestrado) – Central Queensland University. Austrália. Austrália, 2004.

WICKENS, A. H. **Fundamentals of Rail Vehicle Dynamics: Guidance and Stability.** 1st ed. Netherlands: Swets & Zeitlinger, 2003. 286p.

APÊNDICE A - EXEMPLO DE PARÂMETROS DIMENSIONAIS DA RODA

Fig. 1 - Wheel running profile

Table 1 : Descriptions concerning the wheel running profile

Reference figure	Description of wheel-profile zone	Reference letter	
1	Internal surface of rim-tyre	a	Flange height
	Internal surface of tyre		
2	Internal surface of flange	b	Flange thickness
3	Top of flange	c	Width of rim-tyre
			Width of tyre
4	External surface of flange	d	Diameter of running tread
5	Running profile fillet	r_1, r_2, r_3	Radii of rounded end of flange
6	Running surface	r_4	Radius of running profile fillet
7	Slope of external section of running surface	δ	Angle of external surface of flange
8	External bevel of running profile		
9	External surface of rim-tyre		
	External surface of tyre		

Figura (A-1) - Parâmetros do perfil da roda definidos em norma (UIC 510 – 2, 2004)

APÊNDICE B- TOLERÂNCIAS DAS DIMENSÕES EIXO-FURO

1	2			3	4					5					6	7	8	
Nominal and minimum bore diameters D_{Bnom} D_{Bmin} mm	Maximum bore diameter $D_{Bmax} = D_{Bnom} + \dots$ H6 H7 H8			Limit of seat diameter ^a					Tightening between bore ^a and seat ^a					Wheel seat diameter ^a				
				Lower		Upper			Min.					Max.	Min.	Max.		
				$ei = J_{min} + Hx^d$		$es = J_{max}^c$			$J_{min} = ei - Hx^d$					$J_{max} = es$	ds_{min}	ds_{max}		
	H6	H7	H8	u^b	v^b	u6	u7	u8	v6	v7	H6/ u^b	H7/ u^b	H6/ v^b	H7/ v^b	H8/ v^b			
> 100 to 120	0,022	0,035	0,054	0,144	0,172	0,166	0,179	0,198	0,194	0,207	0,122	0,109	0,150	0,137	0,188	$J_{max} = es$ (see column 4)	$ds_{min} = D_{Bnom} + ei$ (see columns 1 and 3)	$ds_{max} = D_{Bnom} + es$ (see columns 1 and 4)
> 120 to 140	0,025	0,040	0,063	0,170	0,202	0,195	0,210	0,233	0,227	0,242	0,145	0,130	0,177	0,162	0,139			
> 140 to 160	0,025	0,040	0,063	0,190	0,228	0,215	0,230	0,253	0,253	0,268	0,165	0,150	0,203	0,188	0,165			
> 160 to 180	0,025	0,040	0,063	0,210	0,252	0,235	0,250	0,273	0,277	0,292	0,185	0,170	0,227	0,212	0,189			
> 180 to 200	0,029	0,046	0,072	0,236	0,284	0,265	0,282	0,308	0,313	0,330	0,207	0,190	0,255	0,238	0,212			
> 200 to 225	0,029	0,046	0,072	0,258	0,310	0,287	0,304	0,330	0,339	0,356	0,229	0,212	0,281	0,264	0,238			
> 225 to 250	0,029	0,046	0,072	0,284	0,340	0,313	0,330	0,356	0,369	0,386	0,255	0,238	0,311	0,294	0,268			
> 250 to 280	0,032	0,052	0,081	0,315	0,385	0,347	0,367	0,396	0,417	0,437	0,283	0,263	0,353	0,333	0,304			
> 280 to 315	0,032	0,052	0,081	0,350	0,425	0,382	0,402	0,431	0,457	0,477	0,318	0,298	0,393	0,373	0,344			

- a. The terms "bore" and "seat" used in this technical specification apply respectively to the wheel, gear and brake-disc bores and the wheel, gear and brake-disc seats.
- b. For all tolerance ranges.
- c. $J_{max} = ei + IT_v$ (IT_v - international tolerances v , v being equal to 6, 7 or 8; see Fig. 3).
- d. v can be equal to 6, 7 or 8 (see Fig. 1, 2 and 3).

Figura (B-1) - Valores Limite das dimensões Eixo-furo (UIC 813 O, 2003)

APÊNDICE C - APROVAÇÃO DE UM VEÍCULO FERROVIÁRIO QUANTO AOS TESTES

Figura (C-1) - Fluxograma Geral de Aprovação de um Veículo ferroviário Quanto aos Testes (UIC 518 OR, 2005)

APÊNDICE D - HETEROGENEIDADES NO TRILHO E FIXAÇÃO

Figura (D-1) - Trilho com regiões descarbonetadas (COLPAERT, 1959)

Figura (D-2) - Trilho com segregação, bolhas e fissura interna (COLPAERT, 1959)

Figura (D-3) - Trilho com segregação e fissura (COLPAERT, 1959)

Figura (D-4) - Trilho fissurado devido a trincas de fadiga (COLPAERT, 1959)

Figura (D-5) - Trefão com segregação (COLPAERT, 1959)

Figura (D-6) - Trefão com segregação (COLPAERT, 1959)

APÊNDICE E - MODOS DE FALHA SEGUNDO FMD-97 (1997)

A referência FMD-97 (1997) apresenta as informações quanto ao modo de falha conforme Figura (E-1). Os campos principais para este trabalho são o campo de componentes e o de modo de falha.

Part Description	Norm	Fail
Failure Mode/Mechanism	Dist	Dist Data Details

Figura (E-1) - Campos da referência (FMD, 1997)

Na Figura (E-2) são apresentadas as falhas referentes à roda. Como nota, no presente trabalho, não são consideradas as falhas classificadas como desconhecidas pois não é possível a determinação dos efeitos no respectivo FMEA. Também não são consideradas as falhas classificadas como *Induced*, pois se julga que as mesmas são relacionadas com a causa do modo de falha e não ao modo de falha propriamente dito, além disso, é considerado que este modo de falha já está englobado nos outros modos de falha,.

Wheel			
Broken	66.7%	44.4%	Broken/Damaged Part Struck/Damaged, Broken/Damaged
Bent/Dented/Warped	33.3%	22.2%	Collapsed/Bent Warped/Bent, Collapsed/Bent
Induced	-----	22.2%	Improper Operation, Collapsed/Bent Part Struck/Damaged, Inop/Unserviceable
Unknown	-----	11.1%	Unknown

Figura (E-2) - Falhas referentes à roda (FMD-97, 1997)

Na Figura (E-3) são apresentadas as falhas referentes ao eixo. Como nota, no presente trabalho, não são consideradas as falhas classificadas como desconhecidas, pois não é possível a determinação dos efeitos no respectivo FMEA.

Axle			
Chaffed	77.8%	70.0%	Chaffed
Bent/Dented/Warped	11.1%	10.0%	Distorted
Mechanical Damage	11.1%	10.0%	Damaged
Unknown	-----	10.0%	Unknown

Figura (E-3) - Falhas referentes ao eixo (FMD-97, 1997)

Na Figura (E-4) são apresentadas as falhas referentes à mola. Foram desconsiderados os seguintes modos de falha:

- Falhas classificadas como desconhecidas não são consideradas, pois não é possível a determinação dos efeitos no respectivo FMEA.
- Falhas classificadas como *binding/sticking*, *excessive play* foram consideradas no modo de falha *weakened*. No presente trabalho foi chamado de “inoperante por enfraquecimento”, que apesar de não ser a tradução correta, permite um melhor entendimento.
- Falhas classificadas como *aged/deteriorated* foram consideradas no modo de falha *worn*. No presente trabalho foi chamado de “uso além da vida útil”, que apesar de não ser a tradução correta, permite um melhor entendimento.
- Não são consideradas as falhas classificadas como *Induced*, pois se julga que as mesmas são relacionadas com a causa do modo de falha e não ao modo de falha propriamente dito, além disso, é considerado que este modo de falha já está englobado nos outros modos de falha.

Spring				
Broken	48.6%	32.1%	Broken	
Weakened	20.0%	13.2%	Broken/Damaged	
			Spring Weak, Binding/Sticking	
			Spring Weak, Excessive Play	
			Spring Weak, Inop/Unserviceable	
			Spring Weak, Locked	
			Weak	
Scored	11.4%	7.5%	Scored	
Binding/Sticking	8.6%	5.7%	Binding/Sticking	
			Sticking, Loose	
Excessive Play	5.7%	3.8%	Excessive Play	
Worn	5.7%	3.8%	Worn Out	
Unknown	-----	20.8%	Unknown	
Induced	-----	9.4%	Improper Maintenance, Missing	
			Lack Of Lubrication, Broken/Damaged	
			Lack Of Lubrication, Seized	
Other	-----	3.7%		
Aged/Deteriorated			1.9% Deteriorated/Aged, Binding/Sticking	
Corroded			1.9% Corroded-Seized	

Figura (E-4) - Falhas referentes à mola (FMD-97, 1997)

Na Figura (E-5) são apresentadas as falhas referentes ao redutor.

Gear Box			
Loss Of Lubrication	50.0%	50.0%	No oil In Gear Box
Seal Failure	25.0%	25.0%	Seal Blown
Worn	25.0%	25.0%	Needs Overhaul

Figura (E-5) - Falhas referentes ao redutor (FMD-97, 1997)

Na Figura (E-6) e na Figura (E-7) são apresentadas as falhas referentes as sapatas de freio. No presente trabalho, foram desconsiderados os seguintes modos de falha:

- O modo de falha *hot spotting* foi considerado no modo de falha *scored*, que foi traduzido como marcado.
- Falhas classificadas como desconhecidas não são consideradas pois não é possível a determinação dos efeitos no respectivo FMEA.

- O modo de falha *fade* foi considerado no modo de falha *worn*, que foi traduzido como deteriorado.
- Não são consideradas as falhas classificadas como *Induced*, pois se julga que as mesmas são relacionadas com a causa do modo de falha e não ao modo de falha propriamente dito, além disso, é considerado que este modo de falha já está englobado nos outros modos de falha.

Brake, Friction, Material		
Crazing	N/R	N/R
Fade	N/R	N/R
Grabbing	N/R	N/R
Hot Spotting	N/R	N/R
Induced	N/R	N/R
Metal Pickup	N/R	N/R
Out Of Adjustment	N/R	N/R
Scored	N/R	N/R
Unknown	N/R	N/R

Figura (E-6) - Falhas referentes às sapatas de freio (FMD-97, 1997)

Brake, Shoe, Lining		
Worn	66.7%	40.0%
Out Of Adjustment	33.3%	20.0%
Unknown	—	40.0%

Figura (E-7) - Falhas referentes às sapatas de freio (FMD-97, 1997)

Na Figura (E-8) são apresentadas as falhas referentes ao cilindro de freio e ao mecanismo do freio. No presente trabalho, os dois modos de falha *leaking* foram agrupados em apenas um.

Brake, Master Cylinder			
Leaking	100.0%	100.0%	Leaking .
Brake, Mechanical			
Bearing Failure	N/R	N/R	Bearing Worn-Out-Lack Of Lubrication
Binding/Sticking	N/R	N/R	Piston Sticking-Contamination
Bleeder Valve Sticking	N/R	N/R	Bleeder Valve Sticking-Contamination
Housing Failure	N/R	N/R	Housing Cracked-Vibration Fatigue
Leaking	N/R	N/R	Cylinder Leaking-Contamination
Lining Deteriorated	N/R	N/R	Lining Deterioration-Aged/Heat
Seal/Gasket Failure	N/R	N/R	Seals Worn-Out-Aged
Spring Failure	N/R	N/R	Spring Broken/Weak-Fatigue Activation

Figura (E-8) - Falhas referentes ao cilindro de freio e ao mecanismo (FMD-97, 1997)

Na Figura (E-9) são apresentadas as falhas referentes ao trilho. Como nota, não são consideradas as falhas classificadas como *Induced*, pois se julga que as mesmas são relacionadas com a causa do modo de falha e não ao modo de falha propriamente dito, além disso, é considerado que este modo de falha já está englobado nos outros modos de falha.

Rail Assembly			
Broken	100.0%	75.0%	Broken/Damaged Part Struck/Damaged, Broken/Damaged
Induced	-----	25.0%	Improper Install, Broken Damaged

Figura (E-9) - Falhas referentes ao trilho (FMD-97, 1997)

Na Figura (E-10) são apresentadas as falhas referentes às talas de junção e fixação. Como nota, não são consideradas as falhas classificadas como *Induced*, pois se julga que as mesmas são relacionadas com a causa do modo de falha e não ao modo de falha propriamente dito, além disso, é considerado que este modo de falha já está englobado nos outros. Outro modo de falha que não é considerado é o de falha na manufatura, já que também se considera como a causa e não ao modo de falha propriamente dito.

Joint, Universal				
Broken	69.0%	41.4%	Broken/Damaged	
			Broken/Separated, Broken/Damaged	
Worn	23.8%	14.3%	Worn, Excessive Play	
			Worn, Inop/Unserviceable	
			Worn, Loose	
Cracked/Fractured	4.8%	2.9%	Cracked	
			Cracked/Split-Inop/Unserviceable	
Excessive Vibration	2.4%	1.4%	Vibration, Inop/Unserviceable	
Induced	-----	24.3%	Caused By Other Failure-Broken/Damaged	
			Fell Off Or Lost	
			Improper Installation, Broken/Damaged	
			Improper Maintenance, Broken/Damaged	
			Lack Of Maintenance, Binding/Sticking	
			Lack Of Maintenance, Corroded	
			Lack Of Maintenance, Fnd In TI/PMCS/INSF	
Workmanship	-----	15.7%	Fell Off Or Lost, Missing	
			Wrong Part, Broken/Damaged	

Figura (E-10) - Falhas referentes às talas de junção e fixações (FMD-97, 1997)

APÊNDICE F- EXEMPLO DE PERFIL DE RODA UIC-ERRI

Figura (F-1)- Perfil de Roda UIC-ERRI para roda com diâmetro entre 1000 mm e 760 mm e altura de flange igual a 28 mm (UIC 510 – 2 OR, 2004)

continua

NR	Yr (mm)	Zr (mm)	$\tan \delta$	NR	Yr (mm)	Zr (mm)	$\tan \delta$
1	-70,0	-9,519		131	-5,0	-0,211	0,0514
2	-69,5	-14,019	-4,4444	132	-4,5	-0,185	0,0494
3	-69,0	-15,844	-3,0832	133	-4,0	-0,161	0,0475
4	-68,5	-17,217	-2,4684	134	-3,5	-0,138	0,0456
5	-68,0	-18,351	-2,0947	135	-3,0	-0,116	0,0438
6	-67,5	-19,330	-1,8347	136	-2,5	-0,094	0,0419
7	-67,0	-20,196	-1,6390	137	-2,0	-0,074	0,0402
8	-66,5	-20,976	-1,4339	138	-1,5	-0,054	0,0385
9	-66,0	-21,685	-1,3563	139	-1,0	-0,035	0,0368
10	-65,5	-22,335	-1,2484	140	-0,5	-0,017	0,0352
11	-65,0	-22,936	-1,1553	141	0,0	0,000	0,0336
12	-64,5	-23,492	-1,0735	142	0,5	0,016	0,0320
13	-64,0	-24,011	-1,0006	143	1,0	0,032	0,0305
14	-63,5	-24,494	-0,9349	144	1,5	0,047	0,0291
15	-63,0	-24,947	-0,8751	145	2,0	0,061	0,0277
16	-62,5	-25,367	-0,8006	146	2,5	0,075	0,0263
17	-62,0	-25,747	-0,7182	147	3,0	0,087	0,0250
18	-61,5	-26,087	-0,6444	148	3,5	0,100	0,0237
19	-61,0	-26,392	-0,5774	149	4,0	0,111	0,0224
20	-60,5	-26,665	-0,5157	150	4,5	0,122	0,0212
21	-60,0	-26,909	-0,4583	151	5,0	0,132	0,0201
22	-59,5	-27,124	-0,4045	152	5,5	0,142	0,0139
23	-59,0	-27,314	-0,3536	153	6,0	0,151	0,0179
24	-58,5	-27,478	-0,3049	154	6,5	0,160	0,0169
25	-58,0	-27,619	-0,2582	155	7,0	0,168	0,0159
26	-57,5	-27,737	-0,2130	156	7,5	0,176	0,0150
27	-57,0	-27,832	-0,1690	157	8,0	0,183	0,0141
28	-56,5	-27,906	-0,1260	158	8,5	0,190	0,0133
29	-56,0	-27,958	-0,0836	159	9,0	0,196	0,0126
30	-55,5	-27,990	-0,0417	160	9,5	0,203	0,0119
31	-55,0	-28,000	0,0000	161	10,0	0,208	0,0113
32	-54,5	-27,990	0,0417	162	10,5	0,214	0,0107
33	-54,0	-27,958	0,0836	163	11,0	0,219	0,0102
34	-53,5	-27,906	0,1260	164	11,5	0,224	0,0098
35	-53,0	-27,832	0,1690	165	12,0	0,229	0,0094
36	-52,5	-27,737	0,2130	166	12,5	0,234	0,0091
37	-52,0	-27,619	0,2582	167	13,0	0,238	0,0089
38	-51,5	-27,478	0,3049	16B	13,5	0,242	0,0038

continuação

NR	Yr (mm)	Zr (mm)	tan δ	NR	Yr (mm)	Zr (mm)	Tan δ
39	-51,0	-27,314	0,3536	169	14,0	0,247	0,0037
40	-50,5	-27,124	0,4045	170	14,5	0,251	0,0038
41	-50,0	-26,909	0,4583	171	15,0	0,256	0,0039
42	-49,5	-26,666	0,5080	172	15,5	0,260	0,0091
43	-49,0	-26,403	0,5441	173	16,0	0,265	0,0094
44	-48,5	-26,122	0,5819	174	16,5	0,269	0,0097
45	-48,0	-25,821	0,6216	175	17,0	0,274	0,0102
46	-47,5	-25,500	0,6636	176	17,5	0,280	0,0108
47	-47,0	-25,157	0,7081	177	18,0	0,285	0,0115
48	-46,5	-24,791	0,7557	178	18,5	0,291	0,0123
49	-46,0	-24,401	0,8068	179	19,0	0,298	0,0132
50	-45,5	-23,984	1,8620	180	19,5	0,304	0,0142
51	-45,0	-23,538	1,9222	181	20,0	0,312	0,0153
52	-44,5	-23,060	1,9883	182	20,5	0,320	0,0165
53	-44,0	-22,548	1,0616	183	21,0	0,328	0,0178
54	-43,5	-21,997	1,1440	184	21,5	0,338	0,0192
55	-43,0	-21,402	1,2380	185	22,0	0,348	0,0208
56	-42,5	-20,757	1,3470	186	22,5	0,358	0,0224
57	-42,0	-20,052	1,4762	187	23,0	0,370	0,0241
58	-41,5	-19,276	1,6338	188	23,5	0,382	0,0260
59	-41,0	-18,411	1,8335	189	24,0	0,396	0,0279
60	-40,5	-17,431	2,1007	190	24,5	0,410	0,0300
61	-40,0	-16,291	2,4891	191	25,0	0,426	0,0321
62	-39,5	-14,949	2,7475	192	25,5	0,443	0,0343
63	-39,0	-13,575	2,7475	193	26,0	0,460	0,0366
64	-33,5	-12,201	2,7475	194	26,5	0,479	0,0390
65	-38,0	-10,968	2,1520	195	27,0	0,499	0,0414
66	-37,5	-10,000	1,7514	196	27,5	0,521	0,0439
67	-37,0	-9,194	1,4878	197	28,0	0,543	0,0464
68	-36,5	-8,501	1,2950	198	28,5	0,567	0,0490
69	-36,0	-7,892	1,1444	199	29,0	0,592	0,0515
70	-35,5	-7,352	1,0214	200	29,5	0,619	0,0541
71	-35,0	-6,867	0,9176	201	30,0	0,646	0,0566
72	-34,5	-6,432	0,8279	202	30,5	0,675	0,0591
73	-34,0	-6,038	0,7493	203	31,0	0,705	0,0615
74	-33,5	-5,681	0,6798	204	31,5	0,737	0,0638
75	-33,0	-5,357	0,6181	205	32,0	0,769	0,0660
76	-32,5	-5,062	0,5630	206	32,5	0,802	0,0667
77	-32,0	-4,793	0,5140	207	33,0	0,836	0,0667
78	-31,5	-4,547	0,4706	208	33,5	0,869	0,0667
79	-31,0	-4,321	0,4322	209	34,0	0,902	0,0667
80	-30,5	-4,114	0,3988	210	34,5	0,936	0,0667
81	-30,0	-3,922	0,3698	211	35,0	0,969	0,0667
82	-29,5	-3,743	0,3449	212	35,5	1,002	0,0667
83	-29,0	-3,576	0,3237	213	36,0	1,036	0,0667
84	-28,5	-3,419	0,3055	214	36,5	1,069	0,0667

conclusão

NR	Yr (mm)	Zr (mm)	tan δ	NR	Yr (mm)	Zr (mm)	Tan δ
85	-28,0	-3,270	0,2899	215	37,0	1,102	0,0667
86	-27,5	-3,129	0,2763	216	37,5	1,136	0,0667
87	-27,0	-2,994	0,2639	217	38,0	1,169	0,0667
88	-26,5	-2,365	0,2525	218	38,5	1,202	0,0667
89	-26,0	-2,741	0,2417	219	39,0	1,236	0,0667
90	-25,5	-2,623	0,2315	220	39,5	1,269	0,0667
91	-25,0	-2,509	0,2218	221	40,0	1,302	0,0667
92	-24,5	-2,401	0,2127	222	40,5	1,336	0,0667
93	-24,0	-2,297	0,2041	223	41,0	1,369	0,0667
94	-23,5	-2,197	0,1960	224	41,5	1,402	0,0667
95	-23,0	-2,101	0,1883	225	42,0	1,436	0,0667
96	-22,5	-2,008	0,1810	226	42,5	1,469	0,0667
97	-22,0	-1,920	0,1741	227	43,0	1,502	0,0667
98	-21,5	-1,834	0,1675	228	43,5	1,536	0,0667
99	-21,0	-1,752	0,1613	229	44,0	1,569	0,0667
100	-20,5	-1,673	0,1553	230	44,5	1,602	0,0667
101	-20,0	-1,597	0,1497	231	45,0	1,636	0,0667
102	-19,5	-1,523	0,1443	232	45,5	1,669	0,0667
103	-19,0	-1,452	0,1392	233	46,0	1,702	0,0667
104	-18,5	-1,384	0,1342	234	46,5	1,736	0,0667
105	-18,0	-1,318	0,1295	235	47,0	1,769	0,0667
106	-17,5	-1,254	0,1250	236	47,5	1,802	0,0667
107	-17,0	-1,193	0,1207	237	48,0	1,836	0,0667
108	-16,5	-1,134	0,1166	238	48,5	1,869	0,0667
109	-16,0	-1,076	0,1126	239	49,0	1,902	0,0667
110	-15,5	-1,021	0,1088	240	49,5	1,936	0,0667
111	-15,0	-0,967	0,1051	241	50,0	1,969	0,0667
112	-14,5	-0,916	0,1016	242	50,5	2,002	0,0667
113	-14,0	-0,866	0,0981	243	51,0	2,036	0,0667
114	-13,5	-0,818	0,0948	244	51,5	2,069	0,0667
115	-13,0	-0,771	0,0916	245	52,0	2,102	0,0667
116	-12,5	-0,726	0,0885	246	52,5	2,136	0,0667
117	-12,0	-0,682	0,0855	247	53,0	2,169	0,0667
118	-11,5	-0,640	0,0826	248	53,5	2,202	0,0667
119	-11,0	-0,600	0,0798	249	54,0	2,236	0,0667
120	-10,5	-0,561	0,0771	250	54,5	2,269	0,0667
121	-10,0	-0,523	0,0744	251	55,0	2,302	0,0667
122	-9,5	-0,486	0,0718	252	55,5	2,336	0,0667
123	-9,0	-0,451	0,0693	253	56,0	2,369	0,0667
124	-8,5	-0,417	0,0669	254	56,5	2,402	0,0667
125	-3,0	-0,384	0,0645	255	57,0	2,436	0,0667
126	-7,5	-0,352	0,0622	256	57,5	2,469	0,0667
127	-7,0	-0,322	0,0599	257	58,0	2,502	0,0667
128	-6,5	-0,292	0,0577	258	58,5	2,536	0,0667
129	-6,0	-0,264	0,0556	259	59,0	2,569	0,0667
130	-5,5	-0,237	0,0535	260	59,5	2,602	0,0667