

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais

PPGEM

ANÁLISE DA VIDA REMANESCENTE DE TRILHOS COM DEFEITOS
TRANSVERSAIS DESGASTADOS EM SERVIÇO

Eduardo Luis Schneider

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre
2005

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGEM

ANÁLISE DA VIDA REMANESCENTE DE TRILHOS COM DEFEITOS
TRANSVERSAIS DESGASTADOS EM SERVIÇO

EDUARDO LUIS SCHNEIDER

Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre
2005

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Inácio da Fontoura Limberger - DEM - UFSM

Prof. Dr. Inácio Benvegnu Morch – PPGEC - UFRGS

Prof. Dr. Paulo Rogério Tavares da Silva - CIENTEC

Antônio Cezar Faria Vilela
Coordenador do PPGEM

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que sempre esteve comigo.

Aos meus pais Reinaldo e Madalena pelo amor e educação. Também agradeço a minha mãe pela ajuda na correção do português.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Afonso Reguly, pela amizade, atenção e ajuda na realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, por ter esclarecido questões de mecânica da fratura e fadiga que sugiram durante o mestrado.

Ao Prof. Dr. Inácio Benvegnu Morch pelo material e esclarecimento de dúvidas sobre mecânica.

Ao colega MSc. Marcio Levi de Macedo (Surfi) pelos esclarecimentos, dicas e materiais para leitura. E a todo o pessoal que já trabalhou com pesquisas em trilhos no laboratório.

Aos colegas Genaro e Tiago Kasparly pela ajuda com a realização dos ensaios de determinação de tenacidade à fratura e taxa de propagação de trincas.

Aos meus colegas de sala Carlos (Shaq), Toni (Xirú), (Tia) Rosy, Julio (R2), Márcia, Rubão, Gilnei e Giovane (3PO), que me esclareceram várias dúvidas e principalmente pela amizade e companheirismo. Agradeço também ao pessoal do “aquário” em especial aos colegas Elisabete, Fernanda, João Vitor e Anderson pela colaboração.

À querida Sofia, que sempre me chama para avisar quando o café está pronto.

À Nação Lamefiana pelo ambiente agradável e amistoso.

A todos meus parentes e amigos, que sempre torcem por mim.

A CAPES pelo apoio financeiro.

A CVRD e aos técnicos José Ribamar e Raimundo Baldez pela colaboração.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	XIII
RESUMO	XVI
ABSTRACT	XVII
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Ferrovias:.....	5
2.1.1 Histórico:	5
2.1.2 Trilhos e Outros Elementos da Via:	6
2.1.3 Características Mecânicas e Metalúrgicas dos Trilhos:.....	8
2.1.4 Esforços Atuantes nos Trilhos:.....	12
Considerações sobre Tensões Residuais em Trilhos:.....	12
Desenvolvimento de Tensões Residuais devido ao Carregamento em Serviço:.....	13
2.1.5 Linhas Continuamente Soldadas:	15
2.1.6 Circuitos Fechados:	16
2.2 Defeitos em Trilhos:	17
2.2.1 Defeitos Longitudinais:	18
2.2.2 Defeitos Superficiais:	19
Fissurações no Canto da Bitola (<i>Head Checkings</i>):	19
Escamação no Boleto (<i>Flaking</i>):	20
Estilhamento do Canto da Bitola (<i>Spalling</i>):.....	21
Despedaçamento do Canto da Bitola (<i>Shelling</i>):.....	21
Depressão (<i>Squats</i> ou <i>dark spot</i>):	22
Patinagem (<i>wheel burn</i>):	23
2.2.3 Defeitos Transversais:	24
2.2.4 Desgaste (<i>wear</i>):.....	26
Corrugações:.....	27
2.3 Gerenciamento do Risco de Falha:.....	28
2.3.1 Inspeção:.....	28
2.3.2 Esmerilhamento:.....	29

2.3.3	Inversão de Sentido do Trilho:	30
2.3.4	Contato Roda-Trilho:.....	30
2.3.5	Contato em Regime de Desgaste:.....	30
2.3.6	Contato em Regime de Fadiga:	32
2.4	Fadiga:	34
2.4.1	Fatores Intervenientes na Fadiga:	35
	Influência da Velocidade da Passagem dos Trens:.....	35
	Influência da Composição Química:	35
	Influência da Qualidade Metalúrgica:	36
	Influência das Propriedades Mecânicas:.....	37
	Influência da Lubrificação:.....	38
2.5	Mecânica da Fratura Aplicada à Fadiga:	39
2.5.1	Taxa de Propagação da Trinca:	40
2.6	Mecanismos de Propagação de Trincas:.....	41
2.7	Modelo para Crescimento de Defeitos Transversais:.....	42
2.7.1	Efeitos da Seqüência de Carregamento:	44
2.8	Análise da Vida Remanescente:	45
2.8.1	Análise das Tensões para Trilhos com Defeitos Transversais:	45
	Tensões de Flexão:	45
	Tensão Residual:	48
	Tensões Térmicas:	48
2.8.2	Análises para Trilho Desgastado:	49
2.8.3	Fator de Intensidade de Tensões para Defeitos Transversais:.....	51
2.8.4	Determinação do Tamanho Crítico do Defeito:	52
2.8.5	Crescimento dos Defeitos Transversais:	52
	Efeito da Curvatura da Linha:	54
	Efeito do Fator Dinâmico de Carregamento:.....	54
	Efeito da Rigidez da Base Elástica:.....	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS	56
3.1	Características Geométricas:	56
3.2	Caracterização Mecânico-Metalúrgica:.....	58
3.2.1	Análise Química:	58
3.2.2	Análise Macroestrutural:	58
3.2.3	Análise Microestrutural:.....	58
3.2.4	Ensaio para a Determinação da Dureza:.....	59
3.2.5	Ensaio para Determinação da Tenacidade à Fratura (K_{IC}):.....	59
3.2.6	Ensaio para a Determinação das Curvas da/dN x ΔK :	62

3.3	Metodologia para Previsão da Vida Remanescente:	64
4	RESULTADOS	68
4.1	Caracterização Mecânico-Metalúrgica:	68
4.1.1	Análise Química:	68
4.1.2	Análise Macrográfica:	68
4.1.3	Análise Micrográfica:	70
4.1.4	Ensaio de Dureza:	71
4.2	Ensaio de Tenacidade à Fratura (K_{IC}):	72
4.3	Ensaio de Determinação da Taxa de Propagação de Trinca de Fadiga:	72
4.4	Análise da Vida Remanescente:	73
	Cálculo das Tensões Mínimas e Máximas:	74
	Crescimento dos Defeitos Transversais:	75
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	78
6	CONCLUSÕES	84
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	APÊNDICE A: Integração da Equação de Crescimento de Defeito.....	91
	APÊNDICE B: Equações para as Propriedades da Seção de Trilho Desgastado.....	93
	APÊNDICE C: Fator de Amplificação do Gradiente de Tensões.....	95
	APÊNDICE D: Memorial de cálculo.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carro detector de defeitos que utiliza a técnica de ultra-som [1].....	2
Figura 2: Fotografia de um trilho que fraturou devido a uma trinca transversal em A. Em B, uma fotografia mostrando o acidente provocado pelo descarrilamento.....	3
Figura 3: Desenho esquemático de um perfil de trilho ferroviário com as partes que o compõem.	7
Figura 4: Desenho esquemático de uma roda de trem mostrando a localização do friso.....	8
Figura 5: Comportamento em tensão x deformação em carregamento monotônico de compressão para diferentes materiais de trilhos [16].	11
Figura 6: Tensões do contato roda-trilho. Em trajetos retilíneos (esquerda) e em curva (direita) [29].	14
Figura 7: Com a passagem das rodas, surge uma camada com tensões residuais compressiva. Já o metal abaixo dela tem comportamento elástico e tende a puxar a região deformada para a sua forma inicial, gerando tensões residuais trativas no mesmo [29].....	14
Figura 8: Fotografia mostrando o fenômeno da flambagem lateral. Para evitá-la , na temperatura de instalação, adiciona-se 5 C à temperatura média.....	16
Figura 9: Aspecto visual do defeito superficial tipo Fissurações no Canto da Bitola (<i>Head Checkings</i>). Em A, um desenho esquemático do defeito (início e evolução). Em B, uma fotografia de trilho com o defeito mostrando as “sombras”. As setas indicam o sentido do tráfego [1], [14].....	20
Figura 10: Aspecto visual do defeito superficial tipo <i>Flaking</i> (perda leve de material). Em A um desenho esquemático e em B uma fotografia de trilho com o defeito [28], [14]. A seta indica o sentido do tráfego.....	20
Figura 11: Aspecto visual do defeito superficial tipo <i>Spalling</i> (perda severa de material). Em A um desenho esquemático e em B uma foto do defeito [28], [14]. A seta indica o sentido do tráfego.	21
Figura 12: Aspecto visual do defeito superficial tipo <i>Shelling</i> . Em A um desenho esquemático do defeito no canto da bitola e na superfície e em B uma fotografia do defeito [28], [14].....	22

Figura 13: Aspecto visual do defeito superficial tipo squat. Em A uma fotografia com a “mancha” do defeito e em B uma fotografia mostrando a aparência da fratura [16].	22
Figura 14: Aspecto visual do defeito superficial tipo patinação. Em A uma fotografia com a “marca” do defeito e em B uma fotografia mostrando a camada de martensita formada no boleto [29].	23
Figura 15: Aspecto visual do defeito superficial tipo deformação plástica do boleto. Em A uma fotografia característica do defeito e em B uma fotografia mostrando os <i>tongue lipings</i> [14], [29].	24
Figura 16: Aspecto visual do defeito transversal nucleado de uma inclusão. Na fotografia estão indicados: o ponto de início (inclusão) e os estágios de crescimento [29].	25
Figura 17: Aspecto visual de defeitos transversais originados a partir de <i>shellings</i> . Em A, as setas indicam a zona de iniciação e em B, indicam os defeitos envolvidos na fratura [14], [7].	25
Figura 18: Desenho esquemático de um <i>reverse detail fracture</i> [].	26
Figura 19: Desgaste (esquemático) em A, vertical da superfície, e em B no canto da bitola. Em C, desgaste (real) de trilho em curva fechada [6], [14].	27
Figura 20: Corrugações em trilhos [14].	28
Figura 21: Estágios de profundidade de penetração da trinca em função do comprimento visível da mesma. As trincas podem estar em qualquer lugar da área sombreada [29].	29
Figura 22: Política da <i>Canadian Pacific Railroad</i> para gerenciamento em termos de níveis de desgaste para o perfil TR-68 [4], [34].	32
Figura 23: Desgaste côncavo no contato [28].	32
Figura 24: Desenho esquemático mostrando como se instalam os defeitos de fadiga no contato [28].	33
Figura 25: Região de origem das trincas [43].	37
Figura 26: Triângulo da mecânica da fratura mostrando como estão correlacionados o carregamento aplicado, o tamanho crítico e a propriedade do material.	39
Figura 27: Comportamento típico da taxa de crescimento da trinca de fadiga. A curva é essencialmente linear na região II, o que está de acordo com a lei de Paris, com a qual é possível estimar a vida em fadiga para peças e componentes.	41

Figura 28: Desenho esquemático do mecanismo de “balão esmagado”. Com a aproximação da roda, a boca da trinca se abre, permitindo a entrada de fluido. Após sua passagem, a boca se fecha guardando fluido dentro [29].	42
Figura 29: Desenho esquemático mostrando que, com a inversão do sentido trafego, a roda força o fluido para fora da trinca minimizando seu crescimento [29].	42
Figura 30: Modo I de abertura de superfície de trinca [1].	43
Figura 31: Viga sobre base elástica com carregamento qualquer. Adaptado de [60].	44
Figura 32: Distribuição do momento fletor para o carregamento simples de uma roda [6].	44
Figura 33: Desenho esquemático do defeito transversal tipo <i>detail fracture</i> [6].	47
Figura 34: Desenho esquemático mostrando as seções transversais real e idealizada de um trilho [30].	49
Figura 35: Desenhos esquemáticos dos modelos idealizados de desgaste no boleto. Em A perda de altura do boleto e em B perda de largura [6].	49
Figura 36: Efeito dos dois modelos de desgaste no crescimento dos defeitos. O gráfico mostra a % em área desgastada do boleto por milhões de toneladas transportadas [30].	50
Figura 37: Desenho esquemático dos ciclos de tensão de Flexão produzido por dois vagões adjacentes. Adaptado de <i>Orringer</i> [3].	53
Figura 38: Perfil 136 RE com suas principais medidas cotadas em centímetros [25].	57
Figura 39: Localização de retirada dos corpos de prova para análise micrográfica.	59
Figura 40: Posição das indentações de dureza de acordo com a Norma prEN 13674-1.	59
Figura 41: A orientação dos corpos de prova utilizada nos ensaios de determinação da Tenacidade à Fratura (K_{IC}) e de determinação da taxa de propagação de trincas foi do tipo L-S.	60
Figura 42: Localização e seção dos corpos de prova para tenacidade à fratura [1].	60
Figura 43: Representação do corpo de prova para o ensaio de tenacidade à fratura (K_{IC}) [64].	61
Figura 44: Fotografia de um corpo de prova em um recipiente com álcool e gelo seco sendo monitorado com um termopar até que se atinja a temperatura de -20 C° .	61
Figura 45: Fotografia de um corpo de prova posicionado na máquina de ensaios, pronto para ensaiar em A. Em B, a disposição do ensaio.	62
Figura 46: Localização e seção dos corpos de prova para crescimento de trinca de fadiga [64].	63

Figura 47: Fluxograma com o procedimento de cálculo para determinação do tamanho crítico do defeito.....	65
Figura 48: Fluxograma com o procedimento de cálculo para determinação da vida remanescente.	66
Figura 49: Impressão de Baumann de segmento do trilho Fabricante A. Ataque: H ₂ SO ₄ 5%.	69
Figura 50: Impressão de Baumann do trilho Fabricante B. Ataque: H ₂ SO ₄ 5%.	69
Figura 51: Microestrutura perlítica do Fabricante A. Em A, sentido transversal e em B, sentido longitudinal. Ataque: Nital 2%.	70
Figura 52: Micrografia apresentando os contornos de grão austeníticos prévios do Fabricante A. Ataque: Ácido pícrico supersaturado.	70
Figura 53: Microestrutura perlítica do Fabricante B. Em A, sentido transversal e em B, sentido longitudinal. Ataque: Nital 2%.	71
Figura 54: Micrografia apresentando os contornos de grão austeníticos prévios. Ataque: Ácido pícrico supersaturado.	71
Figura 55: Gráfico de $da/dN \times \Delta K$ para o material dos trilhos do Fabricante A.	73
Figura 56: Gráfico de $da/dN \times \Delta K$ para o material dos trilhos do Fabricante B.	73
Figura 57: Ciclos de tensão fletora amplificada pelos fatores Mg de 1,087 e DLF de 1,42. O carregamento foi de 33 toneladas por eixo, Kv de 20,7 MPa, tamanho do defeito de 20% de HA , X de 20%. Em A, só a tensão fletora modificada. Em B, o efeito da superposição de σ_t ($T=15C$ e $TN=28C$) e σ_r na mesma.	74
Figura 58: Influência da % de desgaste na vida remanescente do trilho Fabricante A para diferentes tamanhos de defeitos iniciais.	76
Figura 59: Influência da % de desgaste na vida remanescente do trilho Fabricante B para diferentes tamanhos de defeitos iniciais.	76
Figura 60: Efeito do tamanho do defeito na tensão residual incidente no mesmo. Essa relação foi determinada pelas Equações 11 e 12.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limite de desgaste do boleto para o trilho TR-68 [32], [33].	31
Tabela 2: Relação entre o nível de desgaste X (em % HA) e a redução de espessura na superfície (em mm).	50
Tabela 3: Descrição do carregamento com a variação da curvatura da linha [30].	54
Tabela 4: Representação do módulo de rigidez vertical da base elástica [30].	55
Tabela 5: Composição química do aço para trilho da classe 260 segundo a norma prEN 13674-1.	56
Tabela 6: Valores geométricos usados na avaliação das tensões de ensaio para trilhos RE [25].	57
Tabela 7: Composição química (% em peso) dos trilhos dos fabricantes A e B.	68
Tabela 8: Resultados dos ensaios de dureza (em HB).	71
Tabela 9: Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura em -20 C .	72
Tabela 10: Resultados dos ensaios de $da/dN \times \Delta K$ (em m/Gc).	72
Tabela 11: Coeficientes C e P obtidos através de regressão das curvas $da/dN \times \Delta K$.	72
Tabela 12: Listagem do tempo de crescimento seguro (em dias), para trilhos com defeitos de 10% de HA , nível de desgaste de 10% de HA e tamanhos críticos correspondentes a diferentes temperaturas de trabalho (em C).	76
Tabela 13: Listagem do tempo de crescimento seguro (em dias), para trilhos com defeitos de 4% de HA e diferentes níveis de desgaste.	77
Tabela 14: Listagem do tempo de crescimento seguro (em dias), para trilhos do Fabricante A com defeitos de 3 e 2% de HA para um nível de desgaste de 10% de HA .	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A	Tamanho do defeito em termos de área;
a	Semi-eixo maior da trinca transversal;
AAR	American Association Railroads;
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ABIFER	Associação Brasileira da Indústria Ferroviária;
Af	Tamanho do defeito final (crítico) em porcentagem de área do boleto;
AREA	American Railway Engineering Association;
ASTM	American Society for Testing Materials;
Ah	Área de um boleto não desgastado;
Ai	Tamanho do defeito inicial em porcentagem de área do boleto;
B	Espessura do corpo de prova;
b	Semi-eixo menor da trinca transversal;
β_L	Constante das vigas sobre base elástica que relaciona a rigidez lateral da viga com a base elástica;
β_v	Constante das vigas sobre base elástica que relaciona a rigidez vertical da viga com a base elástica;
C	Constante do material para a equação de Paris;
Ceq	Carbono equivalente;
CP	Carregamento resultante da Passagem de quarto eixos
CN	Canadian National;
CPR	Canadian Pacific Railroad;
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce;
CWR	Continuous Welded Rail;
da/dN	Velocidade de crescimento da trinca;
DLF	<i>Dynamic load factor</i> ;
DHH	Boleto endurecido profundamente (deep head hardened);
E	Módulo de elasticidade;
EFC	Estrada de Ferro Carajás;
FHT	Completamente tratado (fully heat treated);
FAST	Facility for Accelerated Service Testing;
HA	<i>Head Area</i> (em porcentagem);
HH	Boleto endurecido (head hardened);
Htot	Altura do trilho em função do nível de desgaste,

I_z	Momento de Inércia;
I_{yyd}	Momento de inércia de área em relação ao eixo horizontal que passa através do centróide do trilho em função do nível de desgaste do boleto;
I_{zzd}	Momento de inércia de área em relação ao eixo vertical que passa através do centróide do trilho em função do nível de desgaste do boleto;
IHHA	International Heavy Haul Association;
K	Fator de intensidade de tensões;
K_v	reação vertical da base elástica por unidade de comprimento devido ao deslocamento da viga;
K_L	Reação lateral da base elástica por unidade de comprimento devido ao deslocamento da viga;
K_{IC}	tenacidade à fratura do material;
ΔK	Amplitude do fator de intensidade de tensões;
L	Carregamento lateral da roda;
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física;
L/V	Relação de carregamento lateral/vertical da localização do contato roda-trilho;
LS	Orientação: <i>length-longitudinal</i> (L) – <i>short transverse</i> (S);
Ma	Fator de amplificação que conta para os contornos finitos (relaciona a área do defeito e a área do boleto);
MIT	Instituto de Tecnologia de Massachusetts;
M_l	Momento fletor lateral em função da posição longitudinal ao longo do trilho;
M_s	Fator de amplificação da tensão que conta para a forma elíptica da falha (relaciona a área do defeito e a distância do centro do defeito aos eixos de simetria da seção do trilho);
Mg	Fator que conta para o gradiente de tensão local;
MGT	<i>Milion Gross Ton</i> , o mesmo que MTB (milhões de toneladas brutas);
MTA	Milhões de toneladas anuais;
MTS	<i>Materials Test System</i> ;
M_{vx}	Momento fletor vertical em função da posição longitudinal ao longo do trilho;
M_θ	Fator que considera o local da medida do comprimento da trinca;
N	Número de ciclos para a ruptura do corpo de prova;
P	Expoente da equação de Paris;
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais;
R	Relação entre tensão mínima e máxima;
S	Distância entre apoios;
T	Temperatura de trabalho;
TD	Tonelagem bruta diária;
TN	Temperatura neutra (livre de tensões residuais);
TLS	Trilho longo soldado;
TTC	Transportation Test Center;
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

V	Carregamento vertical da roda;
W	Altura do corpo de prova;
X	Medida de desgaste em função da porcentagem da área do boleto (%HA);
Y	Fator de forma;
y	Meio plano vertical do trilho;
Z_{mod}	Distância entre o centro do defeito e o centróide do trilho;
Z_{nx}	Altura do centróide do trilho também em função do nível de desgaste;
Z^*	Distância entre o centro do defeito e a superfície de rodagem
a	Comprimento da pré-trinca;
da/dN	Velocidade de crescimento da trinca;
$\Delta\sigma$	Diferença entre a tensões máximas e mínimas atuantes no ciclo;
σ	Tensão nominal;
σ_b	Tensão fletora;
σ_v	Tensão fletora vertical;
σ_l	Tensão fletora lateral;
σ_r	Tensão residual;
σ_t	Tensão térmica;
σ_e	Tensão de escoamento;
σ_{max}	Tensão máxima;
σ_{min}	Tensão mínima;
α	Coefficiente de expansão térmica linear.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento de trilhos ferroviários, avaliando parâmetros como o desempenho frente à propagação de trincas e a tenacidade à fratura que são fundamentais para sua utilização mais segura. Neste trabalho foram realizados ensaios de qualificação (caracterização mecânica e metalúrgica) de dois trilhos utilizados em ferrovias brasileiras que consistiram em análises química, macro e microestrutural, ensaios de dureza, determinação de tenacidade à fratura (K_{IC}) e determinação de curvas $da/dN \times \Delta K$. Uma vez determinadas as características mecânico-metalúrgicas dos trilhos, foram analisados o crescimento de defeitos transversais internos através de fórmulas da mecânica da fratura aplicada à fadiga, desenvolvidas por Orringer e outros, que permitem determinar: o tamanho do defeito no qual a falha no trilho pode ser esperada (quando o trem viaja sobre o mesmo) e o tempo para que o defeito cresça de um certo tamanho até um tamanho crítico (vida remanescente) no qual a falha é esperada. Também foi levada em conta a influência do nível de desgaste no boleto. Dentre os fatores que apresentaram maior influência, destacam-se a temperatura de trabalho, o tamanho inicial do defeito e a tensão residual. Além disso, os resultados obtidos podem ser aplicados para desenvolver intervalos estratégicos de inspeção de tolerância ao dano.

ABSTRACT

The objective of this work was to study the behavior of railroad rails using fracture mechanics parameters to increase operational safety. In this study mechanical-metallurgical characterization had been carried out for two railroad rails that have been used in Brazil. In order to achieve that goal, chemical, macro and microstructural analyses, hardness test and fracture mechanics tests to obtain both K_{IC} and $da/dN \times \Delta K$ were done. Fracture mechanics models developed by Orringer and others were used to evaluate the critical flaw size and the time that a defect will grow from a certain size up to the critical size. The influence of wear in the rail head was also taken into account. Among the most influential factors are work temperature, initial defect size and the residual stresses. The results obtained can be applied in the development of damage-tolerant strategies to assess rail inspection intervals.

1 INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário é um dos meios mais práticos, eficazes e econômicos para realizar o deslocamento de grandes volumes de carga. O Brasil como grande produtor de minérios, possui três das maiores ferrovias do mundo e cerca de 28 mil quilômetros de ferrovias que interligam as várias regiões do país [1]. Só para fins de comparação, os custos referentes ao frete do transporte ferroviário são cerca de 50% mais baixos do que os correspondentes ao transporte rodoviário.

Os trilhos estão sujeitos a defeitos de fabricação que vão desde defeitos metalúrgicos, formados durante a solidificação do lingote (como segregações, inclusões e trincas de solidificação) ou no processo de laminação (dobras) até os originados partir da ação repetida do carregamento exercido pelas rodas no trilho pela passagem do trem, que além de poder formar defeitos é responsável pela propagação de trincas. Esses defeitos afetam a integridade dos trilhos ferroviários, já que aumentam os riscos de falhas que podem ocasionar acidentes e trazer, como consequência, perdas humanas além de perdas econômicas e prejuízos ambientais.

Entre as correntes tendências da indústria ferroviária, há mais trens viajando a cada ano e com cargas cada vez maiores (o que aumenta o carregamento médio da roda que é suportado pelo trilho). Algumas das consequências são a maior ocorrência de defeitos internos e o aumento de suas taxas de crescimento. Essas consequências criam um desafio para as operações nas ferrovias, já que com o tráfego de um maior número de trens, menos tempo resta para a realização das inspeções e reparos de defeitos.

Para minimizar esse problema, uma ação imediata precisa ser tomada, cada vez que um defeito no trilho é descoberto. A ação pode ser uma redução na velocidade do trem, um reparo temporário, ou a substituição do trilho que contenha o defeito. Essa substituição, que é feita sem levar em conta o tamanho deste em relação à seção transversal do trilho, é também uma operação bastante complexa, pois, como geralmente é grande o fluxo de trens, pouco tempo resta para as equipes de manutenção fazerem o serviço, sem falar da pouca infra-estrutura que os locais têm. Para facilitar reparos e substituições nos trilhos, os técnicos seguem o carro detector, a medida que esse vai inspecionando a ferrovia.

Entretanto, a distância que o carro detector pode inspecionar nas ferrovias é restringida pelo número de reparos que conseguem ser feitos em um dia. A mostra uma fotografia de um carro detector que utiliza a técnica de ultra-som.



Figura 1: Carro detector de defeitos que utiliza a técnica de ultra-som [2].

Uma alternativa estratégica para lidar com defeitos detectados é permitir que defeitos com tamanho específico permaneçam em serviço por um certo período de tempo antes que ocorra uma intervenção. Em princípio, o benefício dessa proposta estratégica seria um aumento no número médio de trilhos inspecionados por dia pelo carro detector, que poderá inspecionar mais defeitos, já que muitos desses seriam considerados como eminentes causadores de falhas no trilho [3].

As ferrovias que operam com altas densidades de tráfego e cargas por eixo são denominadas *heavy haul*. Considera-se que uma ferrovia seja desse tipo quando: i) a carga por eixo for igual ou superior a 25 toneladas por eixo; e ii) a demanda transportada ultrapasse 20 milhões de toneladas brutas anuais (MTB) ou a lotação dos trens, supere 5.000 toneladas brutas [4]. Em sua maioria, são transportadoras de granéis sólidos, como o minério de ferro e carvão mineral [5]. Elas apresentam a maior incidência de problemas na área de manutenção, específicos do rigor de suas condições operacionais, especialmente a rápida degradação dos componentes do sistema roda-trilho.

No Brasil (e em vários outros países) o perfil de trilho utilizado por essas ferrovias que transportam quantidades muito elevadas de carga é denominado TR - 68. As principais são: a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM), a MRS Logística SA (antiga Rede Ferroviária Federal SA - RFFSA) e a Estrada de Ferro Carajás (EFC). Dentre elas, a EFC se destaca por transportar a maior quantidade de carga por ano (mais de 65 MTB) com uma carga por eixo de 30 toneladas. Além disso, na serra dos Carajás há uma jazida de minério de ferro de alto teor (média de 66%) calculada em 18 bilhões de toneladas. Essa quantidade é suficiente para, mantido os níveis atuais, garantir a produção por mais 400 anos.

O desgaste nos trilhos é uma consequência natural do seu uso em serviço e está associado com a tonelagem bruta trafegada, frequência, velocidade dos trens, sendo ainda dependente das condições ambientais, das condições técnicas do traçado da ferrovia, além do estado de conservação e da qualidade metalúrgica do trilho. Sendo assim, é evidente que um trilho desgastado tem sua integridade afetada, ou seja, não tem o mesmo desempenho frente a uma trinca de fadiga do que um trilho que não tenha sofrido uma perda de sua seção original pelo desgaste.

A perda vertical de altura do boleto (parte superior de um trilho ferroviário, sobre o qual se apóiam e deslocam as rodas dos trilhos) ocorre virtualmente em todas as linhas férreas, e é o modo predominante de desgaste em curvas tangentes e rasas. O desgaste na face da bitola do trilho é causada pelo contato de carregamentos aplicados no lado do boleto pela borda da roda e é mais pronunciado em curvas maiores que 3 ou 4 graus [6].

Entre os estudos sobre defeitos em trilhos, particular foco tem sido dado a um defeito transversal interno chamado de trinca transversal de fadiga (*detail fracture*) porque este é o defeito de fadiga mais comum encontrado em linhas continuamente soldadas, além de ser muito perigoso, já que provoca a fratura com a passagem do trem, podendo assim ocasionar o descarrilamento do mesmo [7]. A Figura 2 mostra um desenho esquemático de um trilho com uma trinca transversal em A, uma fotografia de um trilho que fraturou devido a uma trinca transversal em B e em C outra fotografia com o acidente provocado pelo descarrilamento.



Figura 2: Fotografia de um trilho que fraturou devido a uma trinca transversal em A. Em B, uma fotografia mostrando o acidente provocado pelo descarrilamento.

As implicações da presença (ou da tolerância) de um defeito transversal do tipo *detail fracture* propagando-se sem a necessidade de uma imediata intervenção e a influência do nível de desgaste do boleto são examinadas nesse trabalho através da caracterização das propriedades dos materiais de dois trilhos usados no Brasil (produzidos por diferentes fabricantes) e de análises feitas através da abordagem da mecânica da fratura aplicada à fadiga. Essas análises são aplicadas especificamente para determinar: i) o

tamanho em que se espera que o defeito interno possa levar à falha (tamanho crítico), ii) o tempo que levará para o defeito crescer de um tamanho inicial detectado até o crítico (vida remanescente) e iii) a influência do nível de desgaste do boleto. Assim, o tempo de crescimento seguro deve ser considerado como a margem de segurança antes de ser feita uma intervenção necessária.

Os defeitos transversais internos são abordados nesse trabalho pois, além das características mencionadas acima, são o tipo de defeito onde baseia-se o conceito de retardo da intervenção corretiva [3]. Os cálculos de vida remanescente apresentados são baseados na metodologia desenvolvida por Orringer e outros [8].

Inicialmente é feita uma abordagem do problema por meio de uma revisão da literatura no capítulo 2, onde são destacados os tópicos mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho. No capítulo 3 é feita a apresentação do material estudado, os ensaios utilizados para a obtenção de parâmetros que possibilitem uma comparação dos comportamentos destes materiais e a metodologia de cálculos que será utilizada para isso. Os resultados dos ensaios e cálculos são mostrados no capítulo 4. No capítulo 5 encontram-se as discussões a respeito dos resultados, no capítulo 6 as conclusões desse trabalho e, finalmente, no capítulo 7 as sugestões para futuros trabalhos. Por fim, os anexos trazem deduções de algumas equações utilizadas e o memorial com um exemplo de aplicação do procedimento de cálculos utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de servir de fundamentação teórica para a realização deste trabalho, realiza-se nessa seção uma revisão dos tópicos mais importantes abordados neste.

2.1 Ferrovias:

Nesta seção, será apresentado um pouco sobre: O histórico, as características das ferrovias (trilhos e outros elementos da via), os principais avanços em tecnologia e performance dos trilhos, e os tipos de soldas empregados nas junções dos trilhos.

2.1.1 Histórico:

Com a revolução industrial, no início da década de 40 do século XIX, na Inglaterra, houve uma explosiva expansão na construção ferroviária, fundamental para o crescimento tecnológico que consolidou esse país como potência econômica mundial. Já nessa época, há registros (anais do instituto de engenharia civil desse país) sobre preocupações em aumentar a vida útil dos trilhos [9].

No início do transporte sobre trilhos, os vagões eram tracionados por cavalos, e os trilhos eram feitos de madeira, após evoluíram para trilhos fundidos, posteriormente para trilhos forjados, em seguida para trilhos laminados a partir de lingotes, chegando, atualmente, a trilhos laminados a partir de tarugos obtidos por lingotamento contínuo.

As ferrovias justificavam tal nome, pois, ao utilizarem trilhos de ferro fundido, eram mesmo estradas de ferro. Os trilhos apresentavam o inconveniente do desgaste, o que encarecia a conservação das vias permanentes. A contribuição de *Henry Bessemer* em 1856 constituiu-se na fabricação dos trilhos de aço que, praticamente, não se desgastavam (em relação aos de ferro fundido) [10]. Já Andrew Carnegie deu uma importante contribuição na fabricação de trilhos na América.

Entre as duas grandes guerras mundiais, ocorreu o desenvolvimento da tração a diesel, renunciando-se a substituição da locomotiva a vapor.

No final do século passado, ocorreram muitas tentativas para aplicação da energia elétrica na tração dos trens. Dentre elas, pode-se destacar a de *Von Siemens*, na Alemanha. Alguns dos motivos que levaram a essas tentativas foram o incômodo que a fumaça das linhas que atravessavam as cidades causava para a população e a redução dos gastos operacionais que tornavam os serviços mais atraentes.

Surgida no tempo de Dom Pedro II, a ferrovia brasileira atingiu o auge de crescimento durante o ciclo do café, quando quase toda a rede era estatal. A partir de 1960 entrou em decadência, e agora, privatizada, tem voltado com força renovada. Segundo a Associação Brasileira da Indústria Ferroviária (ABIFER), entre 1996 e 2000 a indústria brasileira de equipamentos ferroviários ainda vivia maus momentos (reflexo da crise de 60 que ainda persistia). A partir de 2000, a situação se alterou para melhor, o pessimismo deu lugar à euforia, alimentado pelo programa do Governo Federal de revitalização das vias férreas e pelo agronegócio que se expandia rapidamente. Estima-se que até 2008 os setores de mineração e siderurgia deverão apresentar crescimento de 40% e os de grãos e fertilizantes 22%.

2.1.2 Trilhos e Outros Elementos da Via:

Os trilhos são elementos da via permanente sobre o qual trafegam e são guiadas as rodas do equipamento de tração (locomotiva) e do material rebocado (carros e vagões). Funcionam como viga contínua e transferem as solicitações das rodas para os dormentes 11. O trilho deriva de laminação sucessiva de tarugos cortados de lingotes. Como via de rolamento, tem sido estudado desde o início da implantação das estradas de ferro. Deve possuir as seguintes características [12]:

- Altos limites de escoamento e de resistência aliados a uma boa tenacidade;
- Resistência ao desgaste, alta dureza e resistência à fadiga;
- Alta tenacidade à fratura e resistência a propagação de trincas pré-existentes;
- Soldabilidade adequada e baixa susceptibilidade a fragilização pelo hidrogênio.

A sua forma atual é denominada como sendo do tipo *Vignole*, nome dado ao engenheiro que o idealizou. Esse perfil favorece a resistência à flexão, pois devido a sua geometria, que concentra a maior parte da massa do trilho nos pontos onde as tensões normais são maiores, otimiza o uso do material. Ele é composto pelo boleto, alma e patim. A Figura 3 mostra um desenho esquemático de um trilho ferroviário e as partes que o compõem.

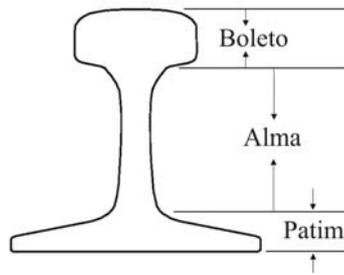


Figura 3: Desenho esquemático de um perfil de trilho ferroviário com as partes que o compõem.

O boletto localiza-se na parte superior do trilho e é caracterizado por sua largura, altura e inclinação da face e do abaulamento da superfície de rolamento que, possui grande importância, não só no contato roda-trilho, mas também na estabilidade do rolamento. Ele também deve ser “massudo”, para minimizar o efeito do desgaste no momento de inércia da seção. Nele se encontra a “bitola” que é o lado interno, onde há o contato com o friso da roda.

A alma é a parte mais fina e encontra-se no centro do trilho. Quanto maior a alma, maior a distância do boletto e do patim com relação à linha neutra da seção, conseqüentemente, maior será o momento de inércia.

O patim é a parte inferior do trilho e é assentado sobre os dormentes, que recebem e transmitem os esforços produzidos pelas cargas ao lastro, que é constituído basicamente de pedra britada e cascalho. Ele não pode ser muito fino, para garantir que a alma continue perpendicular ao dormente durante as solicitações transversais, como por exemplo, em curvas, onde essas são mais pronunciadas. Caso a espessura não seja adequada ao nível de solicitação transversal, pode ocorrer o acúmulo de deformações permanentes ao longo da vida útil e provocar acidentes.

Sabemos que quanto mais a massa do trilho estiver concentrada no boletto e no patim, mais resistente esse trilho será à flexão. Entretanto deve-se conservar uma espessura mínima na alma capaz de garantir adequada resistência e rigidez transversal. Tal espessura deve levar ainda em consideração o desgaste provocado pela corrosão atmosférica.

As placas de apoio são utilizadas para aumentar a área de apoio e fixar o trilho. Isso é feito através de furos onde são colocados parafusos apropriados que denominam-se tirefões.

A distância entre os trilhos é uma característica da via e é denominada bitola. Padronizou-se no mundo bitolas de 1,0 m, 1,435 m e 1,6 m. A tolerância no tamanho da bitola varia em função do país, da organização ferroviária e da velocidade da via.

As rodas possuem frisos que mantêm o trem sobre os trilhos, evitando um deslocamento lateral que provoque descarrilamento. Um desenho esquemático de uma roda com a localização do friso é mostrado na Figura 4. Elas possuem, ainda, uma configuração cônica que tem duas funções: a de centralizar o veículo nos trilhos (já que quando o mesmo se deslocar para um lado, essa geometria o faz escorregar pela ação da gravidade de volta para o centro) e a de diminuir o efeito do escorregamento das rodas nas curvas, já que numa curva o trem se apóia no trilho externo e a configuração das rodas faz com que a parte externa tenha uma circunferência de contato com o trilho maior que a interna.

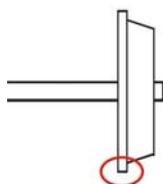


Figura 4: Desenho esquemático de uma roda de trem mostrando a localização do friso.

Para diminuir o desconforto gerado pela mudança de direção, e diminuir o desgaste no contato metal-metal e o risco de tombamento devido à força centrífuga que aparece nas curvas, utiliza-se uma técnica denominada superelevação. Essa consiste em elevar o nível do trilho externo de uma curva.

A variação da inclinação do trilho modifica a região de contato do boleto com a roda. Para reduzir o desgaste da face do trilho e do friso da roda, o contato entre a face interna do trilho e o friso da roda deve ser evitado. Uma forma de minimizar esse problema é inclinar o trilho em 1:20 sobre a vertical, para acompanhar a inclinação do aro das rodas [13].

A inspeção, esmerilhamento e inversão de sentido do trilho são ações realizadas pelo chamado “gerenciamento do risco de falha das ferrovias” que é associado com a nucleação e propagação de defeitos do tipo *head checkings*. Esse assuntos serão abordados no item 2.3.

2.1.3 Características Mecânicas e Metalúrgicas dos Trilhos:

Os principais avanços metalúrgicos que têm tido grande influência na performance dos trilhos são: os progressos feitos na fabricação do aço e na produção dos trilhos, nos procedimentos químicos e nos tratamentos térmicos [14].

Os progressos feitos na fabricação do aço e na produção dos trilhos, como desgaseificação a vácuo e lingotamento contínuo, têm proporcionado a obtenção de lingotes praticamente isentos de defeitos, com composição e pureza mais adequadas.

Progressos na limpeza dos aços também têm sido alcançados pela introdução de procedimentos apropriados de inspeção por ultra-som, que tem conseguido assegurar (pelo menos na maioria das vezes) que os níveis aceitáveis de impurezas sejam garantidos.

Isso tem conduzido em parte a uma redução do potencial de iniciação de trincas de fadiga. Conseqüentemente, a iniciação de defeitos a partir de inclusões tem sido menos comum em trilhos mais novos. Entretanto, não se deve esquecer que uma grande proporção de trilhos antigos ainda está presente em várias ferrovias, e esses requerem um cuidado especial, principalmente nos casos em que condições de carregamento mais severas são utilizadas.

Os progressos nos procedimentos químicos e de tratamentos térmicos têm proporcionado consideráveis melhorias nas características de resistência, dureza e fadiga. A produção de trilhos com níveis relativamente altos de carbono e manganês conduz a uma microestrutura completamente perlítica, livre de ferrita primária ou pró-eutetóide, exibindo valores de resistência entre 900 a 1020 MPa e dureza na faixa de 260 a 290 HB. Isso ocorreu no início da década de 1950 e esse tipo de aço (carbono) ainda é utilizado em muitas aplicações.

Na metade dos anos 50 viu-se o começo de um considerável desenvolvimento de aços alto carbono contendo pequenas adições de uma ou mais ligas como cromo e/ou nióbio e/ou vanádio e/ou molibdênio [15]. Esses aços exibem valores de resistência entre 1100 a 1300 MPa e dureza na faixa de 330 a 400 HB, com uma leve redução na dutibilidade e aceitável soldabilidade. O progresso nas propriedades foi alcançado principalmente pela redução na temperatura de transformação do aço, que conduziu a uma microestrutura perlítica muito mais fina.

Mais para o final da década de 1950, houve o início do desenvolvimento e produção dos aços alto carbono com estrutura totalmente perlítica tratados termicamente. Os procedimentos especiais aplicados de resfriamento acelerado conduziram a resistências similares aos dos aços microligados, com uma dureza levemente menor (360 a 380 HB) e dutibilidade levemente maior, alcançada novamente devido ao refinamento da microestrutura.

Nos últimos 10 a 20 anos, os trilhos tratados termicamente têm sido muito utilizado, particularmente em operações de alta carga por eixo ou em traçados com grandes proporções de curvas fechadas. A popularidade desses trilhos frente ao custo dos trilhos ligados deve-se a vários motivos, como:

- Facilidade de produção;

- Redução de custos, mesmo com a necessidade de tratamentos térmicos;
- Melhoria nas características de soldabilidade.

Nos últimos 10 – 15 anos, três tipos de trilhos tratados termicamente têm se tornado disponíveis:

- Boleto endurecido (*head hardened* - HH);
- Boleto endurecido profundamente (*deep head hardened* - DHH);
- Completamente tratado (*fully heat treated* - FHT).

Como os nomes indicam, a principal diferença está na profundidade da seção tratada e endurecida. Os trilhos DHH e FHT exibem uma redução mais gradual de dureza na superfície do que os HH, embora todos apresentem valores de dureza similar entre 5 a 10 mm a partir da superfície de rodagem.

Entretanto, deve ser lembrado que a maioria dos modos de deterioração em trilhos (desgaste, defeitos de fadiga de contato e corrugações) são todos associados com as características do material próximo à superfície de contato. Além disso, o desenvolvimento de uma camada encruada estabelece uma zona endurecida remanescente essencialmente constante à medida que o desgaste ocorre, e é relativamente independente das propriedades originais do material. Conseqüentemente, em termos de resistência aos modos de deterioração de maior interesse, comportamentos similares são esperados nos vários tipos de trilhos tratados.

A principal diferença que pode ser encontrada entre os trilhos HH e FHT é em termos de distribuição da tensão residual presente na seção do trilho. Isto é devido principalmente ao fato de que o tratamento térmico do FHT produz uma distribuição de tensões mais uniforme na seção do trilho.

Posteriores melhorias no desempenho, particularmente em termos de comportamento nas regiões das soldas, foram obtidas com o desenvolvimento de trilhos microligados tratados termicamente, devido à sua maior capacidade de encruamento quando submetidos a carregamentos compressivos, como mostrado na Figura 5 [16]. Entretanto, esses materiais apresentam como desvantagem, algumas dificuldades de manufatura.

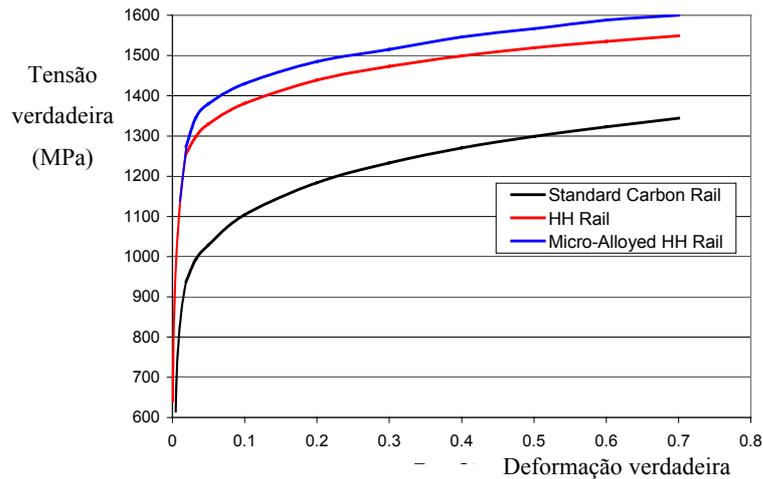


Figura 5: Comportamento em tensão x deformação em carregamento monotônico de compressão para diferentes materiais de trilhos [16].

Nos últimos 5 a 10 anos, dois tipos de aços para trilhos completamente diferentes têm sido desenvolvidos e produzidos:

-Aços hiper-eutetóides, onde o teor de carbono acima de 0,9% têm o objetivo de conseguir níveis de dureza maiores que 400 HB. Nesses aços, níveis aceitáveis de dutibilidade e microestrutura livre de cementita pró-eutetóide são alcançadas com laminação controlada e resfriamento acelerado. Experiências iniciais em campo têm indicado algumas melhorias, particularmente em termos de desgaste e deformação plástica.

-Aços baixo carbono, bainíticos e martensíticos. Os trilhos bainíticos exibem resistência, dureza e dutibilidade consideravelmente maiores do que os trilhos com tratamento térmico convencional do boleto. É indicado para aplicação em linhas que operem em condições severas de transporte ou velocidade. Esse material apresentou ótimo desempenho nas simulações de contato em laboratório, agregando resistência à ocorrência de defeitos como o *squat* e a escamação do boleto [17]. Já os aços baixo carbono martensíticos exibem melhores características de impacto e de encruamento, com características de iniciação e crescimento de trincas de fadiga equivalentes àquelas alcançadas pelos trilhos com boleto tratado termicamente.

As ferrovias participantes da *International Heavy Haul Association* (IHHA), adotaram a seguinte classificação:

-Trilhos *super premium*: São tratados termicamente e fabricados com ligas especiais, com dureza Brinell superior a 388 HB;

-Trilhos *premium*: São tratados termicamente e/ou fabricados com ligas especiais, com dureza Brinell entre 341 e 388 HB;

-Trilhos de aço-carbono apresentam dureza Brinell entre 300 e 340 HB.

Novos materiais não têm sido implementados em grandes quantidades na fabricação de trilhos. As principais razões poderiam ser: a natureza muito conservadora da indústria ferroviária e o desempenho aceitável dos aços perlíticos, particularmente em combinação com procedimentos de gerenciamento apropriados [14].

2.1.4 Esforços Atuantes nos Trilhos:

Os esforços atuantes nos trilhos podem ser classificados em verticais, longitudinais e transversais. Dentro dos esforços verticais estão incluídos: a carga devido ao peso sobre as rodas, forças centrífugas verticais (massas excêntricas rodantes), movimento de trepidação (devido à irregularidade da via) entre outros, como roda não circular e furo não centrado. Nos esforços longitudinais temos os devidos à restrição da dilatação térmica dos trilhos, esforços devidos à flexão dos trilhos, atrito entre a roda e o trilho, que gera uma força paralela ao trilho, e frenagem [18], [19]. Quanto aos esforços transversais, podemos destacar a força centrífuga que ocorre nas curvas (força de Coriolis).

As tensões oriundas desses esforços podem ser divididas em: Tensões devidas à carga de tráfego, induzidas por temperatura e residuais. Esses tópicos serão melhor descritos no item 2.8.1 que traz uma abordagem direcionada a defeitos transversais.

Considerações sobre Tensões Residuais em Trilhos:

Tensões residuais são aquelas que permanecem no trilho externamente descarregado. A natureza das tensões residuais no boleto é tal que uma região interna dele, compreendendo de um terço a um meio de sua seção transversal, está em estado triaxial de tensões, e assim, promove a formação e crescimento de defeitos nesta particular região. Uma discussão adicional sobre os efeitos da tensão residual no desempenho dos trilhos foi feita por *Orringer* pode ser encontrada em [20], [12].

As fontes de tensão residual são: i) origem metalúrgica: tratamento térmico durante a fabricação; ii) origem mecânica: laminação e carregamento em serviço; iii) origem térmica: resultantes de expansão ou contração térmica restringida ou de gradientes de temperatura. Outra fonte de tensão residual em trilhos pode ser a partir da soldagem [21], [7].

Em geral, tensões residuais compressivas diminuem a taxa de propagação de trincas, enquanto que tensões residuais trativas atuam de maneira inversa. No entanto, o efeito mais significativo está na nucleação de trincas por fadiga, onde as tensões residuais compressivas se opõem a isso.

A quantificação das tensões residuais tem sido um considerável desafio, pois é sabido que a distribuição das tensões residuais no boleto muda com o tempo de serviço. A redistribuição de tensões pode ocorrer durante o crescimento de uma trinca dentro do campo de tensões residuais. A deformação plástica gerada pela ponta da trinca pode gerar tensões residuais adicionais e levar a eliminação das tensões residuais pré-existentes [22]. A combinação entre a redistribuição de tensões e a plasticidade na ponta da trinca pode levar a uma variação considerável nas tensões residuais no boleto comparando-se as condições existentes entre antes da nucleação da trinca e após a sua propagação.

Dentre as técnicas mais recentes de medição de tensões estão os métodos de difração de nêutrons e a medição por ultra-som. O método de difração de nêutrons tem como princípios básicos aqueles da difração de raios X, porém tem sobre este uma vantagem: possibilita a medição das tensões em todo o volume da peça, sem que seja necessária fazer nenhuma remoção de material, corte ou furação. Desta maneira as tensões podem ser medidas na íntegra sem que sejam necessárias correções matemáticas para compensar a remoção de camadas. Este método, apesar de ter suas vantagens, esbarra na complexidade técnica e viabilidade econômica.

O método de medição de tensões por ultra-som também é não destrutivo e permite a medição de tensões em campo, na linha, bastando para isso fazer a calibração do sistema. O ponto interessante do desenvolvimento desta técnica é o fato de que ela é muito aplicada nas estradas de ferro e dominada pelas equipes de manutenção de linha, e também porque o ultra-som permite a obtenção não somente das tensões residuais como também as tensões longitudinais da linha, além da possibilidade de detectar defeitos e descontinuidades na mesma operação.

Desenvolvimento de Tensões Residuais devido ao Carregamento em Serviço:

À medida que a roda se aproxima do canto do boleto, seu raio fica progressivamente menor. Se o veículo está andando em trajeto retilíneo, isso faz com que a roda tenda a rodar sobre o centro do trilho, onde o raio do boleto é maior. Similarmente, a roda geralmente anda no centro de sua pista de rolamento, uma vez que as tensões de contato são geralmente baixas.

Se o veículo está fazendo uma curva, o contato externo do trilho tende mover-se para o canto do boleto e o friso da roda, aumentando as tensões de contato. Similarmente, se o veículo é oscilante, ele se move ciclicamente de um canto da bitola para o outro. A

Figura 6 mostra como estão distribuídas as tensões correspondentes ao contato roda-trilho em trajeto retilíneo e em curva.

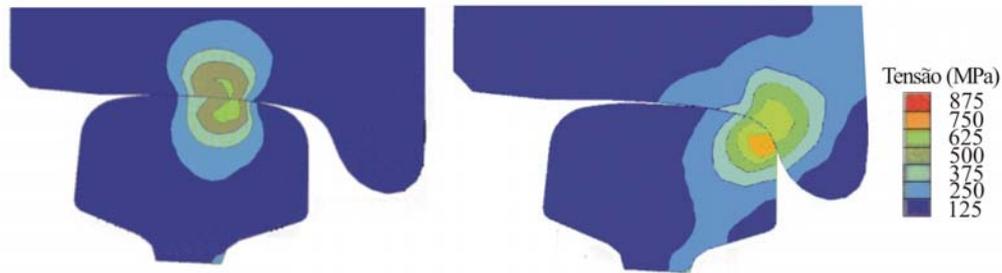


Figura 6: Tensões do contato roda-trilho. Em trajetos retilíneos (esquerda) e em curva (direita) [29].

A nucleação de trincas de fadiga no boleto dos trilhos é um fato interessante. Com carregamento imposto ao trilho pela passagem das rodas ele sofre flexão, pois se comporta como uma viga bi-apoiada e são geradas tensões compressivas no boleto e trativas no patim. Porém, no patim, onde só atuam tensões trativas, raramente ocorre a nucleação de trincas.

As cargas de tráfego muitas vezes atingem valores muito elevados, provocando o escoamento do material que se deforma plasticamente na superfície de rodagem do trilho, resultando na criação de uma camada de tensão residual compressiva, cuja espessura é em torno de 5 a 10 mm [23], [29], [24]. A camada abaixo dessa, tem comportamento elástico e tende a restringir a região deformada na sua forma inicial, de forma a manter o equilíbrio interno dentro do material, gerando tensões residuais trativas na mesma. A Figura 7 mostra esquematicamente esse comportamento.

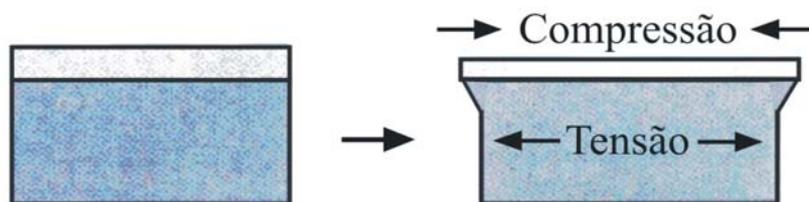


Figura 7: Com a passagem das rodas, surge uma camada com tensões residuais compressivas. Já o metal abaixo dela tem comportamento elástico e tende a puxar a região deformada para a sua forma inicial, gerando tensões residuais trativas no mesmo [29].

A presença de altas tensões residuais compressivas é verificada na prática quando ocorrem fraturas transversais nos trilhos. Observa-se que, após o surgimento da trinca, a sua propagação ocorre na direção do patim e a última região a fraturar é a camada superior, pois a mesma está submetida a tensões de compressão [18].

2.1.5 Linhas Continuamente Soldadas:

As exigências com o conforto para o transporte de passageiros e do aumento da tonelage transportada por eixo no transporte de cargas, associados ao aumento da velocidade, exigem o uso de linhas soldadas contínuas, *Continuous Welded Rail (CWR)*. Essas linhas nas ferrovias garantem menores níveis de ruído e balanço, dando conforto aos passageiros. Além disso, diminuem o impacto das rodas contra os trilhos, minimizando a probabilidade da ocorrência de defeitos tanto para as rodas e mancais como para os trilhos.

Ferrovias com estas características são projetadas após uma criteriosa avaliação das condições geográficas, climáticas e de uso da via, sendo montadas segundo rigoroso controle de parâmetros especificados no projeto.

As linhas contínuas são montadas a partir de sucessivos processos de soldagem feitos para unir vários segmentos de trilhos. Para isto, são usados os processos de soldagem elétrica por centelhamento (*Flash Butt Weld*), realizada em estaleiro, e soldagem por aluminotermia, em campo.

Para a montagem de uma linha contínua, os segmentos de trilhos, que podem ter de 12 a 26 m de comprimento, são soldados em estaleiro até perfazerem de 240 a 396 m de comprimento. Os trilhos com este comprimento recebem a denominação Trilhos Longos Soldados (TLS) e são, então, levados ao local onde serão assentados na linha. Finalmente, pelo processo de soldagem de aluminotermia, são soldados aos demais trilhos já assentados.

O processo de soldagem dos trilhos na via para a obtenção da linha contínua deve ser feito em uma faixa de temperatura bastante estreita, pois é desta faixa de temperatura que dependem as tensões longitudinais na linha que manterão o alinhamento dos trilhos, possibilitando que a bitola fique uniforme em todo o trajeto [25]. A temperatura ideal para o trilho é estipulada durante o projeto e leva em consideração as estações do ano e a variação da temperatura entre dia e noite, ocorridas na região de implantação da ferrovia. A temperatura de instalação é dada pela temperatura média (máxima e mínima temperatura que pode ocorrer na via) adicionada de 5 C para evitar o fenômeno de flambagem lateral (Figura 8. Em países de clima muito frio tem-se uma preocupação especial com o intervalo de temperatura no qual o trilho estará submetido à compressão, pois pode ocorrer mais facilmente a flambagem. Cada vez que a temperatura de instalação (soldagem) não for obedecida ocorrerá uma variação no estado de tensões local da linha.



Figura 8: Fotografia mostrando o fenômeno da flambagem lateral. Para evitá-la, na temperatura de instalação, adiciona-se 5 C à temperatura média.

O não cumprimento destes parâmetros na montagem da linha bem como nas posteriores intervenções de reparo e manutenção podem provocar efeitos danosos, como a degradação prematura da linha devido à introdução de tensões não previstas no projeto, e que podem inviabilizar futuros aumentos de carga por eixo ou da velocidade das composições.

As soldagens feitas em temperaturas baixas acarretam uma diminuição do tensionamento da linha. Já soldagens feitas em temperaturas altas acarretam tensões altamente trativas após o resfriamento. Isso provoca um aumento da amplitude de variação da tensão aplicada a cada passagem de uma roda da composição sobre o ponto considerado no trilho.

Os efeitos provocados pelas tensões térmicas são importantes, pois propiciam maior facilidade para a propagação de trincas já existentes ou da nucleação de novas trincas. É comum nas ferrovias que as rupturas transversais nos trilhos ocorram à noite ou pelo amanhecer, já que, como as temperaturas são menores, o trilho fica mais tracionado e a propagação de trincas é favorecida.

Entretanto, nem sempre os parâmetros de soldagem podem ser seguidos, pois os reparos na linha devem ser feitos o mais rápido possível para minimizar o tempo de permanência de trilhos fraturados, ou com defeitos graves, na linha.

2.1.6 Circuitos Fechados:

Ferrovias onde são transportadas cargas elevadas por eixo e com velocidade elevada apresentam grande incidência de defeitos. As condições operacionais específicas de cada ferrovia incluem características mecânicas e metalúrgicas dos trilhos empregados, condições climáticas, além da frequência e carga transportada. Essas peculiaridades de cada ferrovia dificultam a solução de problemas relacionados à presença de defeitos, como por exemplo, a previsão da vida remanescente. Portanto, as ferrovias seriam os locais mais

indicados para a realização de testes. Porém, esses tipos de testes realizados exclusivamente nas vias demandam muito tempo, além de serem muito caros, já que uma grande infra-estrutura é necessária.

Trabalhar com testes e avaliações em laboratório, que simulem da melhor maneira possível as condições de serviço da via, proporciona agilidade na obtenção de dados, oferecem métodos de avaliação relativamente simples, são bem mais baratos e proporcionam resultados mais fáceis de serem analisados, visto que existe uma maior facilidade no controle das variáveis. A principal restrição para os testes em laboratório consiste em decidir até que ponto os resultados são relevantes para as condições reais e se podem ser usados de maneira quantitativa e/ou qualitativa [26]. Sempre que possível, os testes em laboratório devem ser realimentados com dados e condições levantados na via, tornando os ensaios mais significativos.

Sabendo-se das vantagens de obter-se resultados de ensaios em laboratório e também da real necessidade de obter-se valores a partir de medições feitas na via, surgiu a alternativa de criar circuitos fechados, simulando ferrovias, junto a centros de pesquisa, para tratar de casos específicos das ferrovias. Neles podem ser testados novos materiais para trilhos, novos perfis, influência de velocidades maiores, efeito causado pelo aumento da carga por eixo, tipos de soldas, de lastros, de dormentes e uma infinidade de outros produtos. Além dos testes citados, também podem ser efetuadas avaliações sobre o comportamento de trilhos que apresentam defeitos, trilhos estes que são retirados das vias e implantados nos circuitos. A alternativa do uso dos circuitos fechados é uma opção intermediária para a obtenção de dados entre testes de laboratório e resultados obtidos na via em condições reais de uso. Uma das desvantagens, porém, é o seu alto custo de implantação e manutenção. O *Facility for Accelerated Service Testing* (FAST) do Centro de Tecnologia de Transporte (TTC) de *Pueblo* (Colorado, EUA) é um ótimo exemplo de circuito fechado.

2.2 Defeitos em Trilhos:

Os defeitos podem se manifestar internamente ou externamente [11].

Os defeitos internos podem ser previamente descobertos através de inspeção por ultra-som, raios-X ou por percussão de um martelo (que emite um som característico: quando puro e duradouro, há grande probabilidade de não haver defeito, mas quando “chocho” é praticamente certo que esteja trincado) [27]. Eles só se tornam visíveis quando seu tamanho é tão grande que eles afloram no boleto ou nas faces da alma, isto é, quando

os trilhos estão na iminência de uma fratura. Esses defeitos são muito perigosos porque progridem com a tonelagem trafegada e a fratura ocorre durante a passagem dos trens, caso não sejam removidos a tempo. Dentre eles, incluem-se os seguintes:

- Trinca horizontal;
- Trinca vertical;
- Bolha ou vazio;
- Defeitos nas soldas (aluminotérmica e elétrica).

Todos os defeitos internos se vinculam a defeitos metalúrgicos adquiridos durante o processo de fabricação dos trilhos ou durante os processos de soldagem. Podem ocorrer isoladamente ou repetidos em um ou mais trilhos de uma mesma corrida. São de grande importância, já que quando muito pequenos são dificilmente detectáveis.

Os defeitos externos são facilmente detectáveis, permitindo que sua degradação em outros mais graves seja acompanhada durante o processo de sua formação.

Considerando que na iminência de uma fratura os defeitos internos podem mostrar indícios de externos, esses dois tipos de defeitos foram agrupados em outros quatro grupos:

- Defeitos longitudinais;
- Defeitos superficiais;
- Defeitos transversais;
- Desgastes;

Os defeitos incluídos em cada grupo serão descritos individualmente, embora defeitos de um grupo possam ocorrer combinados com defeitos de outros grupos, principalmente com aqueles que se manifestam na superfície do trilho.

2.2.1 Defeitos Longitudinais:

Os principais são: a trinca horizontal (se manifesta paralelamente à superfície de rolamento e que tende a fraturar o boleto em duas partes) e a trinca vertical (gera uma fratura no lado externo ou interno da superfície de rolamento no local em que a trinca estava situada). Outro tipo de defeito longitudinal, porém não muito comum é o rechupe. Todos esses defeitos formam-se durante a solidificação do aço devido à segregação e à presença de inclusões. A melhor maneira para detectar esses defeitos é através da inspeção por ultra-som. Existem outros dois tipos de defeitos longitudinais como trinca na concordância do boleto com a alma ou na concordância da alma com o patim que podem ser detectados tanto por ultra-som como por evidências externas.

2.2.2 Defeitos Superficiais:

São aqueles que se manifestam na superfície do boleto, no caminho de rolamento das rodas. São defeitos de elevada importância por afetarem os trilhos e as rodas, dois componentes de elevado custo de manutenção na ferrovia. Em geral, por serem externos, são evidenciados visualmente, logo podem ser removidos por ações preventivas ou corretivas. Os principais são: fissuração do canto da bitola (*head checkings*), escamação do boleto (*flaking*), estilhamento do canto da bitola (*spalling*), despedaçamento do canto da bitola (*shelling*), depressão (*squat* ou *dark spot*), patinagem (*wheel burn*) e deformação plástica do boleto (*rail plastic flow*).

Tendo em vista que as ações dinâmicas resultantes da circulação dos trens se manifestam de formas diversificadas, tais como choques, arrastamento longitudinal de rodas nas curvas ou frenagens, atrito de escorregamento transversal das rodas associado com a grande pressão do contato roda/trilho, esses defeitos raramente se apresentam individualmente, mas sim, combinados entre si ou com defeitos de outros grupos.

Fissurações no Canto da Bitola (*Head Checkings*):

São trincas capilares de pequena extensão que se manifestam transversalmente ao boleto (no sentido de sua largura) próximas do canto superior da bitola. Ocorrem devido à grande pressão das rodas contra os trilhos, principalmente quando a carga por eixo dos vagões é muito elevada (igual ou maior que 30 toneladas).

Pode ocorrer em todos os tipos de trajetos, mas é encontrado principalmente em curvas fechadas e subidas inclinadas. Com a redução do raio da curva, sua posição tende a se mover para o canto da bitola. É muito difícil de ver (ou sentir) *head checking* nos seus primeiros estágios de desenvolvimento, já que as trincas são pequenas e finas. Em estágios posteriores, eles são muitas vezes manchados (marcados) por sombras que emergem de finas depressões da superfície.

Geralmente as curvas são locais esperados para *head checking*, mas veículos oscilantes (que se movem ciclicamente de um canto da bitola para o outro) também podem criar problemas, se houverem em número suficiente. Por causa da inclinação, trajetos verticais também podem motivar a roda para andar próximo do canto da bitola. A Figura 9 mostra um desenho esquemático e uma foto desse tipo de defeito.

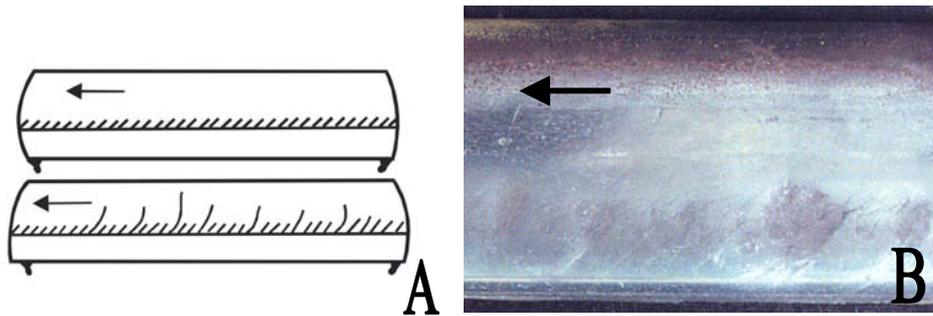


Figura 9: Aspecto visual do defeito superficial tipo Fissurações no Canto da Bitola (*Head Checkings*). Em A, um desenho esquemático do defeito (início e evolução). Em B, uma fotografia de trilho com o defeito mostrando as “sombras”. As setas indicam o sentido do tráfego [28], [29].

Testes de laboratório têm mostrado que é muito mais fácil de se iniciarem defeitos sob condições secas e de alta fricção. Entretanto, para que os defeitos cresçam é necessária a presença de um fluido entre as trincas, como por exemplo, água ou óleo. Na via, água pode vir obviamente da chuva, neve ou geada, porém pode ficar retida nas trincas, mesmo que o trilho pareça seco. Óleo pode vir de lubrificações, mas também pode ser deixado cair por unidades de potência. O mecanismo de propagação desse tipo de defeito será descrito no item 2.6.

Escamação no Boletto (*Flaking*):

Na medida da evolução do *head checking*, devido às elevadas pressões que resultam do contato roda/trilho, as trincas vão se comunicando internamente gerando perda leve de material. As pequenas lâminas vindas da superfície de rolamento são levadas e agrupadas próximas do canto da bitola. Assim é gerado esse defeito chamado escamação no boletto. A Figura 10 mostra um desenho esquemático e uma foto desse tipo de defeito.

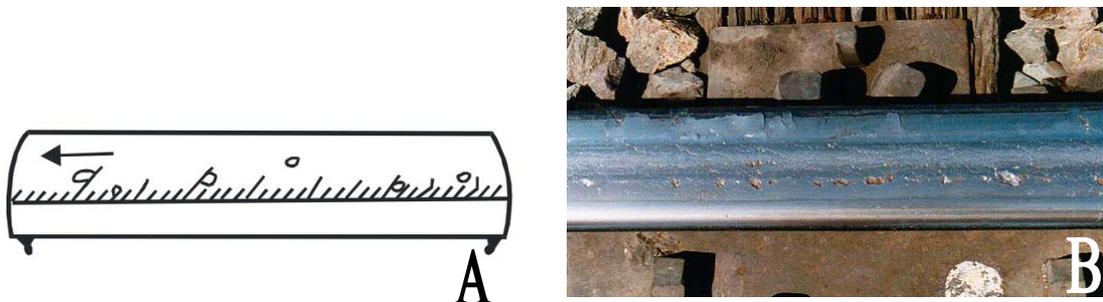


Figura 10: Aspecto visual do defeito superficial tipo *Flaking* (perda leve de material). Em A um desenho esquemático e em B uma fotografia de trilho com o defeito [28], [14]. A seta indica o sentido do tráfego.

Estilhamento do Canto da Bitola (*Spalling*):

O estilhamento do canto da bitola é um defeito associado à escamação do boleto, caracterizado pelo deslocamento de massa ou porções de aço do trilho próximas do canto da bitola, motivadas pelas pesadas cargas de rodas atuando sobre áreas do trilho em que o aço está fragilizado entre trincas superficiais que se aprofundaram. A Figura 11 mostra um desenho esquemático e uma foto desse tipo de defeito.

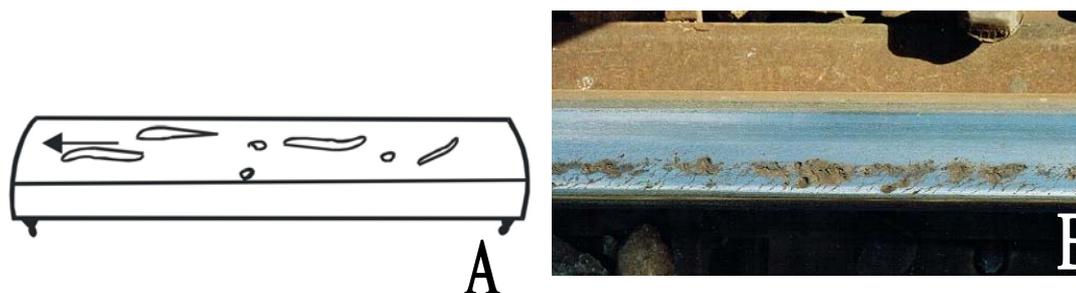


Figura 11: Aspecto visual do defeito superficial tipo *Spalling* (perda severa de material). Em A um desenho esquemático e em B uma foto do defeito [28], [14]. A seta indica o sentido do tráfego.

Despedaçamento do Canto da Bitola (*Shelling*):

No despedaçamento do canto da bitola, inicialmente, os trilhos exibem manchas escuras alongadas e irregularmente espaçadas no canto da bitola. Essas manchas são os primeiros sinais de desintegração do aço logo abaixo da superfície de rolamento que, após, se manifesta por rebarba e trincas na face lateral e, finalmente, pelo despedaçamento do canto da bitola que pode atingir uma grande extensão do trilho. Neste estágio de evolução, o escoamento do metal pelo efeito do tráfego provoca um desnivelamento do boleto.

Já nos trilhos de boleto tratado, a degradação por *shelling* segue um processo um pouco diferente. O canto da bitola pode mostrar umas pequenas trincas superficiais (*head checkings*). Em uma fase mais avançada observa-se um esboroamento quase geral do canto da bitola.

Esse defeito é causado principalmente por elevadas cargas por roda agindo com elevada frequência sobre uma pequena área de contato roda/trilho, resultando em tensões de cisalhamento e de escoamento que excedem a capacidade do aço do trilho para suportá-las. Geralmente o despedaçamento do canto da bitola ocorre no lado superelevado onde o desgaste foi combatido pela lubrificação dos trilhos. A Figura 12 mostra um desenho esquemático e uma foto desse tipo de defeito.

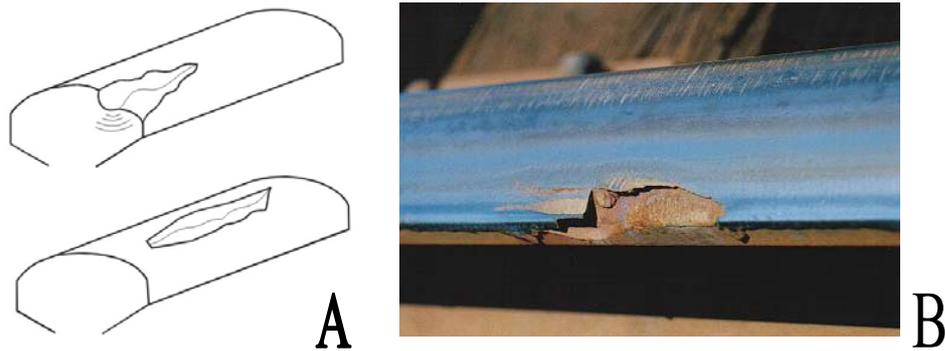


Figura 12: Aspecto visual do defeito superficial tipo *Shelling*. Em A um desenho esquemático do defeito no canto da bitola e na superfície e em B uma fotografia do defeito [28], [14].

Depressão (*Squats* ou *dark spot*):

Podem ocorrer em qualquer lugar, mas a maioria deles está associada com: corrugações, soldas, pequenos buracos periódicos na superfície de rodagem (*squats* periódicos). Como características, apresenta uma sombria e escura área que resulta do crescimento da trinca próximo ao plano horizontal, logo abaixo da superfície de rolamento. Isso significa que a superfície de rodagem acima da trinca é destacada do resto do trilho. Como resultado o metal flui para parte lateral, formando uma pequena depressão sobre a trinca onde ocorre a acumulação de produtos de corrosão e sujeira, resultando na “sombra”.

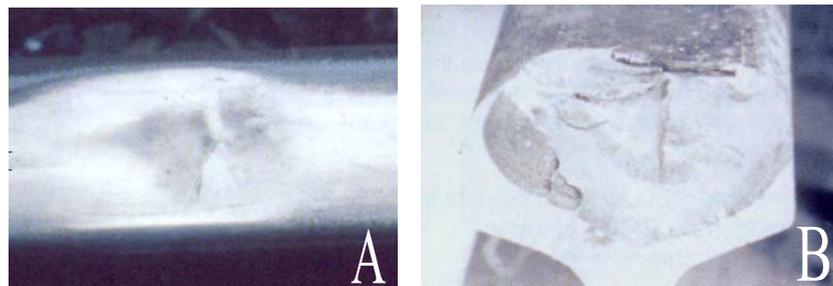


Figura 13: Aspecto visual do defeito superficial tipo squat. Em A uma fotografia com a “mancha” do defeito e em B uma fotografia mostrando a aparência da fratura [16].

Não é muito comum tornarem-se evidentes em trilhos com menos de 10 anos ou naqueles que tem sido trafegados com menos de 150 MGT.

As causas do desenvolvimento dos *squats*, costumam ser as mesmas dos *head checkings*. A diferença é que geralmente os *squats* desenvolvem-se no ponto de alta tensão de contato, que ocorre como resultado de irregularidades no boleto, como por exemplo, solda desgastada.

Patinagem (*wheel burn*):

A patinagem é uma avaria na superfície de rolamento causada pelas rodas das locomotivas, que por insuficiência eventual de atrito entre as rodas e o trilho, ficam rodando no mesmo lugar sem movimentar o trem. A fricção e o calor gerados nesses deslizamentos ocasionam uma escavação da superfície do trilho. Pode haver a formação de trincas transversais em volta da marca deixada pela patinagem e, com isso, o trilho adquirir um sério defeito: a trinca transversal interna, que pode progredir até uma fratura completa. Em geral se manifesta nas proximidades de pátios, de sinais e nos trechos de fortes rampas, em que os trens pesados são obrigados a parar para depois retornar a sua marcha e ali não encontram condições favoráveis de aderência (trilho úmido, óleo ou graxa).

O efeito do aquecimento e resfriamento subsequente muito rápido provoca uma modificação da microestrutura, formando uma fina camada de martensita em cima do boleto. Essa camada cria uma interface que dificulta a inspeção por ultra-som, pois gera um sinal repetido (ruído) que prejudica a interpretação de sinais referentes a defeitos internos, principalmente se estes ainda forem pequenos. A Figura 14 apresenta uma foto característica de uma marca de patinagem e outra de uma camada de martensita formada com o defeito.

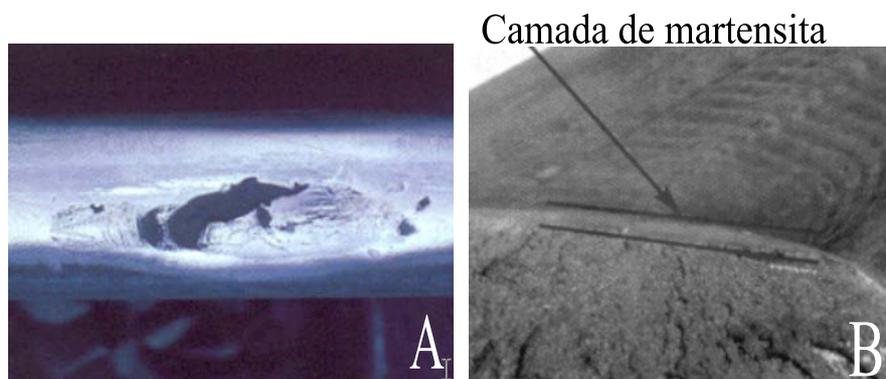


Figura 14: Aspecto visual do defeito superficial tipo patinagem. Em A uma fotografia com a “marca” do defeito e em B uma fotografia mostrando a camada de martensita formada no boleto [29].

É comum uma comparação entre squats e *wheel burns*. Esses normalmente ocorrem aos pares (um em cada trilho). Ambos defeitos podem, entretanto, ter ligação com *spalling* da superfície.

Deformação Plástica do Boleto (*rail plastic flow*):

O escoamento do aço do boleto é uma deformação plástica que altera o contorno do boleto sem afetar a integridade do trilho. Essa irregularidade resulta da ação combinada de elevadas forças de compressão e de arrastos gerados pelos repetidos “passeios” dos aros das rodas sobre o seu caminho de rolamento. Com isso, o aço escorre para além da face externa do boleto, formando rebarbas ou apêndices externos. Esse defeito pode apresentar-se algumas vezes em deformações menores com aspecto de “línguas”, sendo chamado, nesse caso, de *tongue liping*. Esse defeito, que não é muito perigoso, pode afetar a transposição dos trilhos (operação de duplo deslocamento paralelo dos trilhos de uma fila oposta com inversão das faces laterais do boleto) quando o externo desgastar. A Figura 15 apresenta uma foto característica de deformação plástica do boleto e outra de *tongue lipings*.

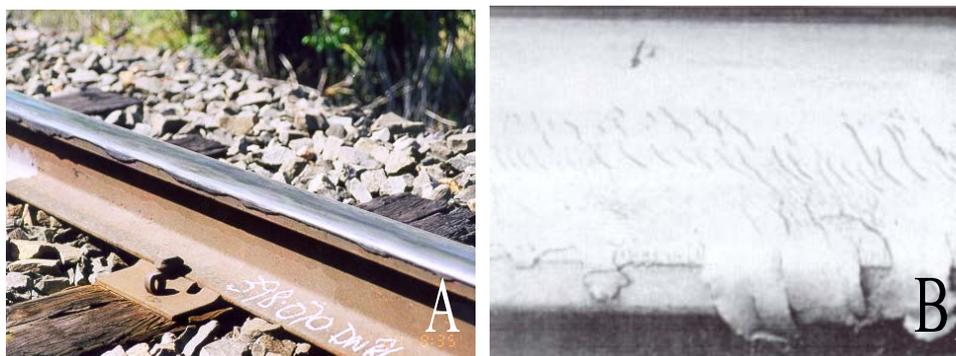


Figura 15: Aspecto visual do defeito superficial tipo deformação plástica do boleto. Em A uma fotografia característica do defeito e em B uma fotografia mostrando os *tongue lipings* [14], [29].

2.2.3 Defeitos Transversais:

Um defeito transversal é qualquer defeito interno, que ao progredir, pode provocar uma fratura transversal do trilho. São detectáveis por ultra-som, mas a classificação acurada dos mesmos só pode ser feita após o trilho ter fraturado. Podem ser: trinca transversal, trinca composta e trinca transversal reversa. O grau de perigo que esses defeitos representam são avaliados em função do percentual da área de seção transversal enfraquecida pelo defeito. São muito perigosos porque geralmente o trilho fratura com a passagem do trem.

As trincas transversais podem ser originadas durante o processo de fabricação do trilho ou por uma separação longitudinal próxima da superfície de rolamento (geralmente *shelling* ou *head checkings*). As primeiras se desenvolvem no interior do boleto a partir de

micro-trincas de solidificação, de inclusões ou de algum rechupe, progredindo transversalmente no sentido do patim e formando uma superfície lisa, de forma oval ou circular. Também é perigoso porque trilhos de uma mesma corrida podem ser portadores de iguais defeitos. As segundas, também chamadas de (*detail fracture*), após iniciarem junto a outros defeitos, giram mudando a direção de propagação progredindo transversalmente no sentido do patim até formar uma substancial separação transversal em ângulos retos com a superfície de rolamento [7]. Particular foco tem sido dado a esse defeito porque ele é o defeito de fadiga mais comum de ser encontrado em linhas continuamente soldadas. Esses defeitos se tornam detectáveis por equipamentos de ultrassom quando eles alcançam aproximadamente 4% da área da seção transversal do boleto (%HA). A Figura 16 mostra uma fotografia de um defeito transversal nucleado a partir de uma inclusão. A Figura 17 mostra fotografias de defeitos transversais originados a partir de *shellings*.



Figura 16: Aspecto visual do defeito transversal nucleado de uma inclusão. Na fotografia estão indicados: o ponto de início (inclusão) e os estágios de crescimento [29].

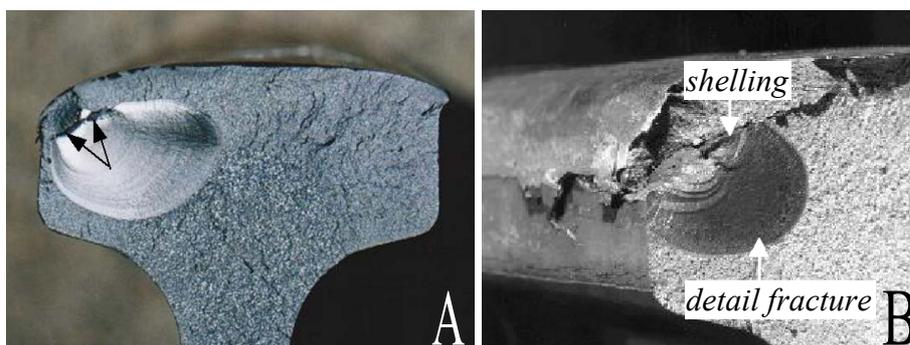


Figura 17: Aspecto visual de defeitos transversais originados a partir de *shellings*. Em A, as setas indicam a zona de iniciação e em B, indicam os defeitos envolvidos na fratura [14], [7].

A trinca composta inicia com uma separação horizontal depois muda para a direção vertical, formando uma fratura em dois planos, um dos quais atinge a superfície de

rolamento. Do mesmo modo que a trinca transversal, é um tipo de defeito que inicia a partir de um defeito interno.

Um outro tipo de defeito transversal tem sido inspecionado. A origem desse defeito ao invés de se localizar na parte de cima do canto da bitola do boleto onde geralmente o *detail fracture* inicia, localiza-se na parte de baixo, geralmente em um entalhe na borda inferior de deformação ou próximo a ela. Por essa razão esse novo tipo de defeito tem sido chamado de *reverse detail fracture* e costuma ocorrer em linhas curvas, pobremente lubrificadas com trilhos desgastados e que carreguem altas cargas por eixo. O defeito tem uma imediata orientação no plano transversal, e, portanto, sua superfície de propagação se torna mais rapidamente plana do que a superfície de um *detail fracture* típico. A Figura 18 mostra um desenho esquemático desse tipo de defeito.

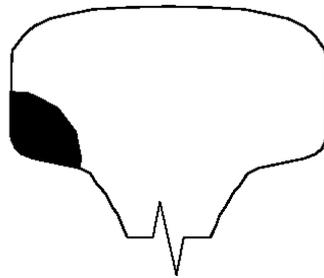


Figura 18: Desenho esquemático de um *reverse detail fracture* [30].

2.2.4 Desgaste (*wear*):

Os desgastes em trilhos são uma conseqüência natural do seu uso em serviço, mas que pode ser sensivelmente atenuado se o traçado for projetado com amplos raios de curvatura (acima de 1000 m) e rampas suaves (com inclinação abaixo de 0,5%), já que o agente causador é o atrito desenvolvido tanto na inscrição dos rodeiros dos truques nas curvas, como também nas frenagens que ocorrem nas longas descidas do percurso dos trens. Pode-se diminuir esse desgaste com a prática de uma controlada lubrificação da face da bitola dos trilhos superelevados, uma vez que a lubrificação em excesso estimula a formação de *shellings*. Também há uma espécie de desgaste do boleto que ocorre no sentido vertical e que diminui a sua altura devido à ação de esmerilhamento feito para sanear temporariamente defeitos superficiais ou em trilhos tangentes após muitos anos de prestação de serviço na linha.

O desgaste lateral do trilho ocorre pelo contato dos frisos das rodas durante a inscrição dos veículos nas curvaturas do traçado. Atinge principalmente os trilhos externos das curvas de pequenos raios, podendo ainda ocorrer em tangentes em virtude de um

movimento anormal dos truques. A evolução do desgaste depende fortemente da qualidade da lubrificação que é dada aos trilhos. O desgaste lateral constitui propriamente um defeito a partir do momento em que ele se torna prejudicial à manutenção da via, ou o perfil do trilho fique enfraquecido a tal ponto que possa vir a fraturar.

O desgaste vertical anormal do boleto do trilho não constitui propriamente um defeito, mas uma situação resultante da ação do tráfego por um longo período aliado à falta ou descuido na inspeção dos trilhos das tangentes onde as frenagens são freqüentes. A redução excessiva da altura dos trilhos pode levar a uma fratura. A identificação da anormalidade pode ser caracterizada pela excessiva largura (achatamento) da camada superficial do boleto que se forma pelo escoamento do aço nessa região. A Figura 19 mostra desenhos esquemáticos de desgaste vertical da superfície, do canto da bitola e uma foto de desgaste de trilho em curva fechada.

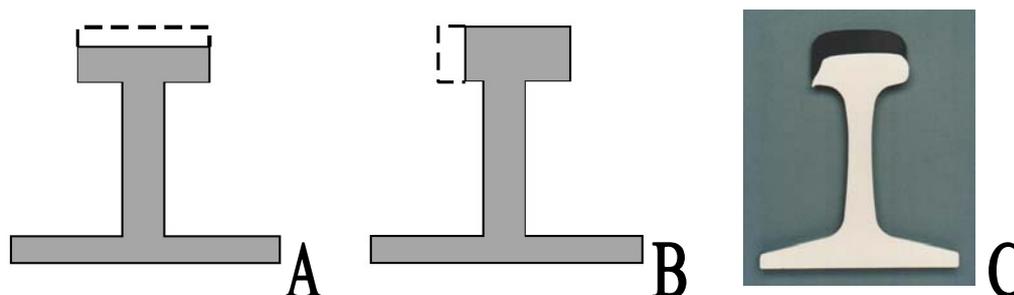


Figura 19: Desgaste (esquemático) em A, vertical da superfície, e em B no canto da bitola. Em C, desgaste (real) de trilho em curva fechada [6], [14].

Corrugações:

Muitas hipóteses têm sido levantadas para explicar a origem das corrugações, entre as quais: a presença de elevadas cargas a baixas velocidades; truques rígidos e mancais de rolamento; cargas leves a maiores velocidades; desbalanceamento de rodas e eixos; vibrações na linha; vibrações no truque; faixas críticas de velocidade; deslizamento rotativo pela diferença de raios entre a fila externa e interna dos trilhos, entre outros. Certamente mais de uma delas, contribuem para instalação desse tipo de defeito. Na crista da deformação ondulatória, a estrutura metalográfica é idêntica àquela que se observa normalmente na superfície de rolamento em regiões onde não existe o defeito. A superfície é brilhante e dura, pela presença de uma fina capa constituída principalmente de martensita (camada branca), característica da superfície de rolamento. Isto indica que nas cristas das ondas de deformação a roda está completamente em contato com o trilho e não há deslizamento relativo entre as superfícies. Por outro lado, a superfície dos trilhos é mais

escura na região dos vales de deformação e o material tem menor dureza, como ocorre em regiões do trilho pouco trabalhadas pelo tráfego. Há indícios, portanto, de que a ação das rodas é distinta nesta região, função de uma inscrição que permite deslizamento relativo [31]. A Figura 20 mostra uma foto desse tipo de defeito.



Figura 20: Corrugações em trilhos [14].

Estudos realizados em uma ferrovia australiana em que operam trens de minério identificaram certa correlação entre a frequência de ressonância teórica para o sistema veículo-via e o comprimento de onda das corrugações instaladas no trilho. O fenômeno de ressonância adiciona tensões dinâmicas que podem conduzir à deformação plástica ondulatória em forma de corrugação [39].

2.3 Gerenciamento do Risco de Falha:

O gerenciamento do risco de falha das ferrovias associado com a nucleação e propagação de defeitos do tipo *head checkings* tem três elementos: inspeção, esmerilhamento e inversão de sentido do trilho.

2.3.1 Inspeção:

A inspeção envolve tanto classificação visual como exame por ultra-som. O comprimento significativo para trincas visíveis é de 20 mm. Para comprimentos iguais ou maiores que esse, é possível que uma trinca se desenvolva para baixo (na direção do patim), acarretando assim, um significativo risco de falha associado. Caso o comprimento da trinca visível seja menor que 20 mm, sua profundidade deve ser menor que 5 mm, não tendo se desenvolvido significativamente, e assim pode ser considerada uma situação de baixo risco. A relação que tem sido estabelecida entre o comprimento de trincas visíveis e

os estágios de profundidade de penetração das mesmas para dentro do trilho pode ser vista na Figura 21.

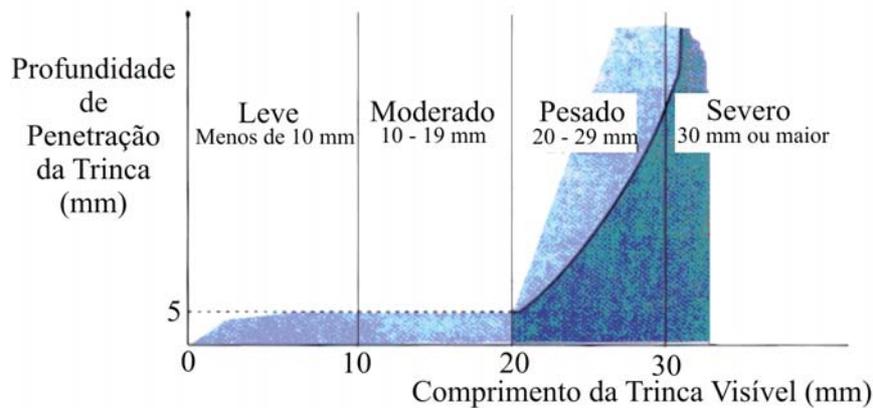


Figura 21: Estágios de profundidade de penetração da trinca em função do comprimento visível da mesma. As trincas podem estar em qualquer lugar da área sombreada [29].

A intenção do gerenciamento do risco de falhas é não permitir que as trincas atinjam um estágio de profundidade considerado pesado ou severo. Para isso são necessárias ações como esmerilhamento e/ou inversão de sentido do trilho.

2.3.2 Esmerilhamento:

O esmerilhamento preventivo busca a remoção de trincas antes mesmo que elas se tornem visíveis. Para ser efetivo, ele deve ser empreendido logo após a instalação das trincas e, após, repetido de forma periódica. Também é possível modificar o perfil do boleto para reduzir as tensões de contato (particularmente nas curvas), bem como as chances de trincamento.

O esmerilhamento corretivo é requerido para locais onde os comprimentos das trincas visíveis não são superiores a 15 mm. A intenção aqui não é remover as trincas, mas remover o contato roda-trilho delas. Uma vez que as trincas são visíveis, é geralmente tarde demais para removê-las completa e economicamente por esmerilhamento. Após terem alcançado esse estágio, um periódico re-esmerilhamento é necessário para manter essa situação e garantir que a trinca não terá chance de se desenvolver nas novas zonas de contato. Existe um benefício no esmerilhamento corretivo de locais levemente trincados, mas se houverem fontes de esmerilhamento limitadas, as prioridades são: re-esmerilhamento de locais onde já foram realizadas a inversão de sentido do trilho, e em locais cuja a profundidade das trincas seja considerada leve ou moderada.

2.3.3 Inversão de Sentido do Trilho:

O esmerilhamento corretivo é útil somente se as trincas estiverem crescendo dentro da camada compressiva. Uma vez que as trincas tenham crescido através dessa camada, elas vão continuar crescendo independentemente de haver fluido preso nelas ou não. Por isso, locais que alcançarem estágios pesados de profundidade de trinca deverão ser invertidos e não esmerilhados.

Enquanto as trincas forem moderadas, ainda é preferível empreender esmerilhamento corretivo do que inverter o sentido do trilho, mas no caso de serem consideradas maiores, seria arriscado demais e a inversão é a melhor solução.

2.3.4 Contato Roda-Trilho:

As ferrovias podem ser classificadas em dois diferentes grupos, quanto ao modo de degradação no contato roda-trilho [35]:

- Regime de desgaste;
- Regime de fadiga.

No regime de desgaste, é marcante o desgaste lateral do friso da roda, enquanto no regime de fadiga não há desgaste lateral importante no friso e são marcantes as tensões de contato, excepcionalmente elevadas, geradas pelo desgaste côncavo na pista.

De maneira geral, toda ferrovia que opere em regime de fadiga, terá a vida útil dos seus trilhos governada por defeitos superficiais associados à fadiga, (embora a recíproca não seja necessariamente verdadeira). Nas ferrovias que operam em regime de desgaste, a vida útil dos trilhos é determinada, em geral, também pelo desgaste que ocorre na face lateral do boleto e isto é marcante em curvas fechadas.

Existem ferrovias com elevada densidade de transporte e carga por eixo que podem operar em regime de desgaste e ter a vida útil de seus trilhos governada por fadiga. Portanto, na prática, a ferrovia pode apresentar comportamentos de interface entre os dois regimes e, nesse caso, as estratégias de gerenciamento devem observar padrões que agreguem ambos os regimes.

2.3.5 Contato em Regime de Desgaste:

O chamado “regime de desgaste” está geralmente associado a traçados predominantemente sinuosos, capazes de provocar esforços laterais acentuados. Resulta

daí um tipo de contato abrasivo que desgasta o friso da roda e o boleto do trilho, progressivamente, tornando-os finos até o limite de rejeito. Também em virtude destas características geométricas, o trilho interno das curvas de pequeno raio pode sofrer deformação plástica substancial.

A avaliação constante e precisa do perfil de desgaste do trilho permite a identificação de pontos de súbita mudança na taxa de desgaste. Frequentemente esses pontos definem limites de desgaste que, se observados, podem resultar em substancial economia de energia e prolongamento da vida útil para componentes do equipamento e via. O segredo para entendimento dos fenômenos e escolha da estratégia mais adequada de gestão dos desgastes é o monitoramento constante, até mesmo porque as circunstâncias podem se modificar ao longo do tempo [35].

Nesse regime deve haver uma ótima lubrificação na interface roda-trilho, obtida com maior eficiência pela conjugação de lubrificantes na via e nas locomotivas.

É recomendável o reperfilamento dos trilhos, dentro dos padrões usuais, rebaixando partes da superfície que poderiam comprometer o melhor aproveitamento do efeito cônico das rodas e prejudicar a inscrição e o contato.

De acordo com critérios da *Spoornet*, um desgaste côncavo máximo de 6 mm nas vias principais parece ser adequado para linhas que operem em regime de desgaste [28].

A Tabela 1 fornece indicações mais precisas acerca desse importante tema, que são os limites de desgaste para o perfil TR-68, que normalmente é empregado em ferrovias que operam com elevada densidade de transporte e carga por eixo, e que é bastante utilizado no Brasil [32], [33] e [34].

Tabela 1: Limite de desgaste do boleto para o trilho TR-68 [32], [33].

Vias de utilização	Máximo desgaste vertical (mm)	Máximo desgaste horizontal (mm)
Principais	5,6	12,7
Ramais principais	10,3	19,1
Ramais secundários	15,1	22,2
Pátios	16,7	25,4

Adicionalmente, na Figura 22 mostra-se a política da *Canadian Pacific Railroad* (CPR) para gerenciamento do desgaste no trilho para o perfil TR-68 [34].

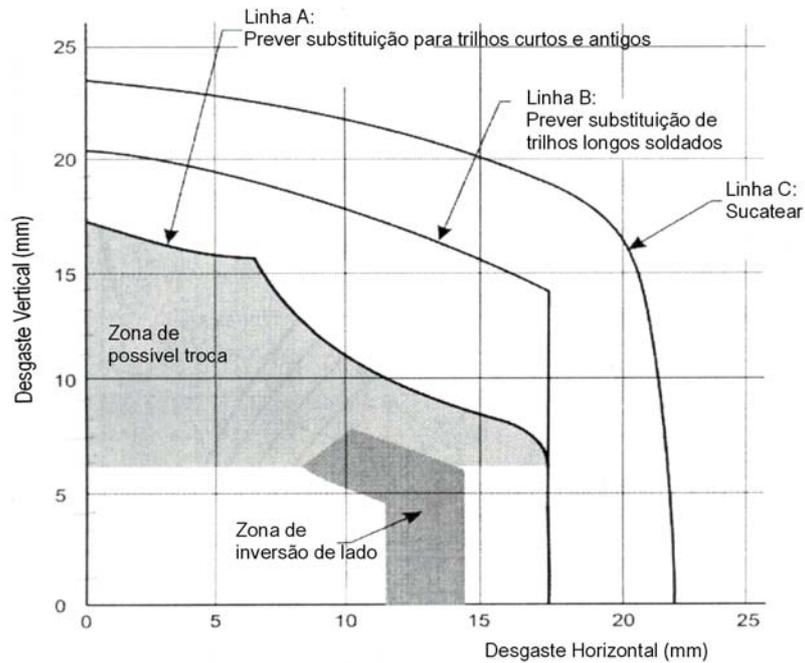


Figura 22: Política da *Canadian Pacific Railroad* para gerenciamento em termos de níveis de desgaste para o perfil TR-68 [4], [34].

Da Tabela 1, pode-se observar que as vias principais e os pátios apresentam os menores e maiores valores de tolerância ao desgaste, respectivamente. O limite de desgaste vertical para vias principais indicado na mesma apresenta um valor muito próximo ao sugerido pela *Spoornet*, e também está de acordo com a política da *CPR* para gerenciamento do desgaste mostrada na Figura 22.

2.3.6 Contato em Regime de Fadiga:

O “regime de fadiga” está geralmente associado a traçados predominantemente retos, que geram um certo aprisionamento lateral das rodas, já que o veículo tende a se manter centrado pela própria concepção mecânica de circulação dos rodéis.

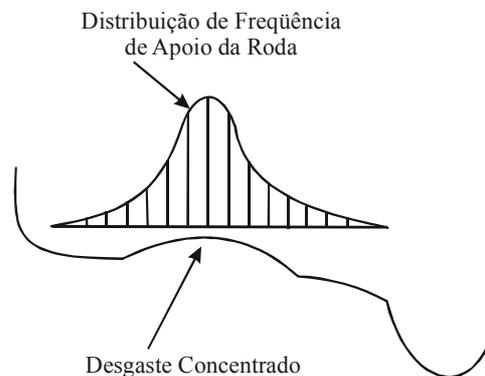


Figura 23: Desgaste côncavo no contato [28].

A Figura 23 apresenta uma curva característica de distribuição de probabilidade da frequência com que o contato ocorre em cada posição da roda [35]. Nota-se claramente que neste tipo de linha a roda estará apoiada, na maior parte do tempo, em sua região mais central. Quando isto ocorre, há uma perfeita adequação e encaixe no contato, uma vez que a forma côncava é impressa nas rodas pelo próprio desenho dos trilhos. Portanto, em geral, uma roda côncava se amolda bem ao boleto e as tensões no contato se mantêm em torno de um valor mínimo, bem inferior ao que se observa para uma roda nova.

Entretanto, a roda não permanece o tempo todo aprisionada à superfície côncava e, em certos pontos da linha, abandona esta posição de equilíbrio. Quando isto ocorre, seja por aceleração centrífuga em curvas ou por interações dinâmicas complexas que podem ocorrer em diversas partes da via, o apoio se desloca para região mais próxima ao friso ou na região do falso friso. Neste caso, o contato ocorre em raios muito pequenos e as tensões de contato tornam-se substancialmente elevadas.

A curva de distribuição da Figura 23 indica claramente esta possibilidade, ainda que a frequência de ocorrência seja destacadamente menor. Em consequência disto, surgem defeitos de fadiga que afetam principalmente as regiões da linha onde há apoio crítico. Na prática, os defeitos se instalam em geral da forma indicada na Figura 24. Nas curvas mais fechadas, a roda é forçada a se apoiar justamente em um dos pontos mais críticos de mudança de concavidade, local onde as tensões de contato se tornam excepcionalmente elevadas. Sob tais circunstâncias, em geral *head checkings* se instalam de forma discreta, para em seguida progredirem até que as trincas comecem a se encontrar, gerando *flaking* e outros defeitos associados à fadiga.

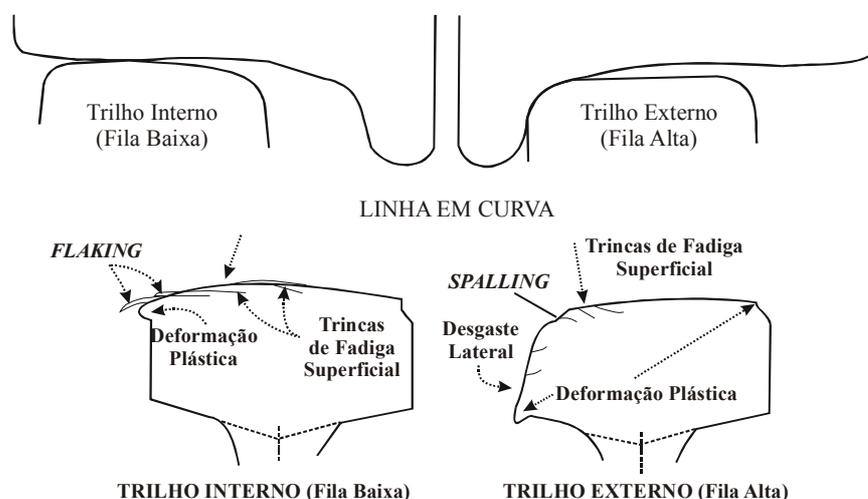


Figura 24: Desenho esquemático mostrando como se instalam os defeitos de fadiga no contato [28].

2.4 Fadiga:

A fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas sujeitas a um estado de tensões variável. A falha ocorre com um nível de tensões consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração ou ao limite de escoamento para carga estática. O termo “fadiga” é usado, pois normalmente a falha ocorre após um longo período de tensão repetitiva. É um modo de falha extremamente importante, já que é a maior causa individual de falha em metais, estima-se em torno de 90%. Pode ser considerada catastrófica e traiçoeira, já que, caso não seja feita uma inspeção de defeitos, ocorre repentinamente e sem avisos. O motivo final da falha de uma peça por fadiga é a ruptura abrupta da seção que restou durante o processo de danificação da seção. Essa ruptura final tem o aspecto frágil. Sempre há deformação plástica. Quando se trata de fadiga de alto ciclo há deformação plástica na ponta da trinca (escala macroscópica). Quando se trata de fadiga de baixo ciclo a plastificação ocorre em porções significativas (escala “natural”) da peça.

O processo ocorre pela iniciação e propagação de trincas que causam ruptura após um determinado número de ciclos. Falhas por fadiga são geralmente causadas pela ação simultânea de cargas cíclicas, tensões trativas e deformação plástica microscópica. O carregamento também pode ser estático mas com estado de tensões variável. Estruturas submetidas a um carregamento constante, mas sob ataque químico (corrosão) também podem sofrer fadiga.

Sob condições normais de carregamento, as trincas de fadiga iniciam na superfície ou logo abaixo em descontinuidades como, por exemplo, pites de corrosão, inclusões ou mudanças bruscas de seções que amplifiquem a intensidade de tensões no local.

Em geral, a superfície de fratura é perpendicular a uma tensão de tração aplicada.

Análises detalhadas sobre fadiga de metais iniciaram em 1842, motivadas por um grave acidente ferroviário ocorrido nas proximidades de Versailles. O rompimento por fadiga de um dos eixos da locomotiva foi a causa do acidente [36].

Com o surgimento de várias indústrias e avanços tecnológicos durante o século XIX, a fadiga tornou-se um problema sério e foi estudada por vários pesquisadores. Os mais famosos foram *Fairbairn*, *Rankine* e *Wöhler*, sendo que esse último conduziu vários experimentos, no período de 1852 a 1870, tentando explicar a ruptura de eixos de rodados de vagões ferroviários sujeitos a tensões abaixo da tensão de escoamento do material com um grande número de ciclos [37].

Apesar dos estudos incessantes desenvolvidos, principalmente nas décadas de 40 e 50, a ocorrência de acidentes com os aviões *Comet* e os navios *Liberty I* incentivou o desenvolvimento de pesquisas mais aprofundadas. Foi somente a partir da década de 60, com os trabalhos feitos por *Paris* e *Erdogan*, que correlacionaram a taxa de propagação de trinca por fadiga com o fator de concentração de tensões, que os conhecimentos sobre fadiga passaram a ter uma ainda maior aplicação prática em estruturas, principalmente nas indústrias aeronáutica, nuclear, petroquímica e ferroviária [38].

2.4.1 Fatores Intervenientes na Fadiga:

Nesta seção serão abordados fatores que exercem influência na fadiga, tais como a velocidade da passagem do trem, a composição química do aço do trilho, a qualidade metalúrgica, propriedades mecânicas e lubrificação.

Influência da Velocidade da Passagem dos Trens:

Um aumento significativo de velocidade pode alterar de forma importante as tensões de cisalhamento, pois essa leva em conta a carga dinâmica [39]. Existe ainda um outro aspecto a ser considerado: a área elíptica formada no contato entre sólidos elásticos curvos aumenta em função do tempo de aplicação do esforço. Assim, quanto menor a velocidade do trem, melhor é a distribuição de carga e menores serão as tensões no contato [40].

Movimentos dinâmicos dos carros e dos truques devidos a irregularidades na roda ou no trilho, causam uma variação na magnitude de carregamento da roda no trilho a medida que o trem viaja sobre a linha. Essa variação depende da velocidade e do diâmetro das rodas e é analisada na seção 2.8.5.

Influência da Composição Química:

A composição química do aço tem forte influência sobre as propriedades metalúrgicas e físicas, afetando o desempenho e vida útil por fadiga.

Um elemento que pode causar problemas é o hidrogênio. As bolhas características da sua presença no aço, em maiores proporções, podem originar microtrincas potencialmente perigosas pelo risco de nucleação de trincas transversais. Por esta razão, o teor de hidrogênio deve ser reduzido ao mínimo, não devendo ultrapassar 1,5 ppm.

Elementos residuais como o fósforo e o enxofre, presentes no aço, exercem um efeito nocivo e devem ser mantidos em níveis muito baixos. Em geral, são níveis inferiores a 0,035%, para o fósforo e 0,037%, no caso do enxofre. O fósforo confere fragilidade ao aço, diminuindo a sua tenacidade à fratura, enquanto o enxofre aparece formando inclusões de sulfeto de manganês, que diminuem a tenacidade à fratura e resistência à fadiga.

Influência da Qualidade Metalúrgica:

A microestrutura do aço afeta diretamente os limites de resistência, alterando o desempenho quanto ao desgaste e fadiga. Esse tópico já foi abordado na seção 2.1.3.

As inclusões não metálicas devem ser mantidas em níveis tão reduzidos quanto possível, por serem pontos preferenciais para início e nucleação de trincas [28]. Por esta razão, algumas ferrovias, como a *Canadian National* (CN), já especificam aços de alta pureza, chamados *clean steel*, com nível de inclusões muito reduzido, para aplicação em circunstâncias onde os benefícios justifiquem o maior custo.

Quanto à composição química e à morfologia das inclusões presentes nos aços de trilhos, estas podem ser endógenas, quando originadas a partir de impurezas inerentes à matéria prima, tais como enxofre e fósforo, ou de elementos usados no processo de desoxidação como alumínio e silício; ou podem ser exógenas, provenientes da erosão dos refratários e/ou do aprisionamento de escória no metal líquido. Ainda, podem ocorrer precipitados e de elementos de liga com baixa solubilidade no ferro alfa e ávidos por carbono como o nióbio e titânio.

Apesar da pequena influência do coeficiente de dilatação dos sulfetos em relação à matriz metálica, nos aços de alta resistência, inclusões de sulfetos de manganês podem dar início às trincas de fadiga, pois os esforços aplicados podem provocar o descolamento entre a inclusão e a matriz metálica [36].

A influência da quantidade de inclusões no material e a relação custo-benefício entre a obtenção de materiais mais limpos, de alta qualidade, e os gastos com manutenção e riscos de acidentes na via é analisada por *Steele, Rungta e Rice* [41].

Trincas nucleiam em inclusões, independente da composição, sendo importante a determinação do tamanho e forma limites destas inclusões em relação ao carregamento imposto [42].

Um método para identificação do tamanho crítico de agrupamentos de inclusões sugere que haveria uma nítida relação entre a instalação de certos defeitos de fadiga e a presença de inclusões não metálicas, particularmente as de óxido [43]. Nos estudos

experimentais que deram origem a esse método, análises detalhadas da posição das trincas de fadiga em trilhos danificados, mostraram que todas elas tiveram origem numa mesma região confinada no interior do boleto. A localização dos pontos de origem de trincas está indicada na Figura 25, podendo-se notar que a dispersão é pequena. Algumas se originam um pouco mais próximas da superfície, mas todas estão concentradas numa área de aproximadamente 1 cm^2 , que é relativamente pequena em relação à área do boleto.

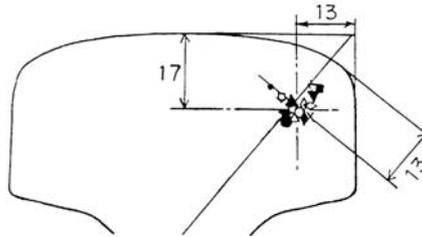


Figura 25: Região de origem das trincas [43].

A análise metalúrgica também foi direcionada à região de origem das trincas. Para todas as seções analisadas, parecia haver indícios de que $2000\ \mu\text{m}$ seria o tamanho limite de agrupamentos de alumina permitidos em aço *standard* para minimizar o desenvolvimento de defeitos de fadiga. Essa técnica requer ainda investigações adicionais para validação do método, conforme sugerido pelos próprios autores.

Influência das Propriedades Mecânicas:

A dureza do aço tem influência decisiva na instalação dos defeitos de fadiga e isto ficou muito evidente em uma experiência que comprovou a influência da qualidade mecânica do trilho [44]. Em uma curva com raio de 1800 m, por onde circulavam trens de alta velocidade e trens de carga mais pesados, a fila externa de trilhos foi substituída. Introduziu-se uma seção S54 em aço *standard*, com resistência à tração de 520 MPa, em seguida a um tramo de mesma seção, mas com aço especial de resistência à tração de 880 MPa. Depois de um curto período de serviço, observou-se uma notável diferença nas condições de superfície para os dois tipos de trilho. O de mais baixa resistência apresentou severos defeitos na superfície de rodagem, enquanto o trilho adjacente apresentou desgaste normal, dentro da mesma parte da curva.

Há circunstâncias, porém, em que o endurecimento superficial dos trilhos, pelo trabalho das rodas ou por tratamento térmico no boleto, pode reduzir a vida útil em fadiga, gerando um aparente paradoxo, com relação às conclusões anteriores. Isto ocorre, em geral, nos casos em que a profundidade atingida pelo endurecimento é pequena e o ponto

onde ocorre a tensão máxima de cisalhamento permanece com baixa dureza e limite de escoamento [28]. A explicação para a redução da vida por fadiga é a seguinte, neste caso: a superfície mais endurecida estanca ou retarda o desgaste natural das camadas de trilho ao longo do tempo, e com isto o ponto de máxima tensão de cisalhamento ocorre sempre numa mesma região, no interior do boleto. Se esta região permanece com dureza e limite elástico originais do aço *standard* tem-se condição ainda mais propensa a problemas de fadiga. Por outro lado, quando o trilho sofre desgaste natural, as camadas superficiais vão sendo removidas e o ponto de máxima tensão se modifica permanentemente, tornando-se mais profundo, o que dificulta o alcance do número de ciclos exigido para fadiga, mesmo para aço carbono *standard* [45].

Influência da Lubrificação:

A influência desfavorável do uso de lubrificantes na propagação de trincas de fadiga por contato foi primeiramente descrita por *kalousek* [46]. Pressões hidrodinamicamente transmitidas a partir da interface roda-trilho conduzem o lubrificante para o interior das trincas, facilitando sua propagação e agravando a formação de *head checkings*, *flakings* e pontos de *shelling*. Os fragmentos de material desprendidos por fadiga em trilho lubrificado costumam estarem cobertos por resíduo de graxa e são fragmentos maiores e mais largos do que aqueles observados em linha sem lubrificação. A perda de material é, portanto, substancialmente maior, devendo-se evitar ou restringir a lubrificação em linhas propensas à instalação de defeitos de fadiga.

De fato, há um aparente paradoxo entre a recomendação anterior e o senso comum de que a lubrificação das partes é quase obrigatória para otimização de desempenho geral [28]. Entretanto, do ponto de vista técnico, a lubrificação é indesejável, a menos que a vida útil do trilho seja governada apenas pelo desgaste. A explicação é análoga àquela anteriormente apresentada para os trilhos de maior dureza, ou seja: nas linhas bem lubrificadas cessa ou diminui a natural eliminação de camadas por desgaste e a tensão máxima de cisalhamento ocorre sempre a uma mesma profundidade, numa mesma região. Nas linhas sem lubrificação, o desgaste progressivo faz com que o ponto de máxima tensão se torne cada vez mais profundo e não há repetição de ciclos de carregamento exatamente numa mesma região do boleto, o que precipitaria a fadiga. Um indício de validade disso é o fato do *shelling* se desenvolver mais em curvas de maior raio e bem lubrificadas, onde é menor o desgaste.

2.5 Mecânica da Fratura Aplicada à Fadiga:

Griffith, em seus estudos sobre fratura de materiais, associou a teoria de *Inglis* para a propagação instável das trincas com a Primeira Lei da Termodinâmica e formulou uma teoria para a propagação de trincas baseado no balanço de energia. Nela, ele diz que uma trinca torna-se instável, quando a energia de deformação, que é responsável pelo incremento do crescimento da trinca, supera a energia superficial de formação de duas novas faces da trinca. Devido a este importante trabalho e do conseqüente avanço que propiciou este estudo, *Griffith* é considerado o pai da Mecânica da Fratura.

A tendência na industria ferroviária tem sido de aumentar a densidade de tráfego e a carga por eixo. Portanto, pesquisas sobre integridade de trilhos reconhecem a necessidade de rever e atualizar estratégias de inspeção baseadas na tecnologia da mecânica da fratura aplicada e das tendências da indústria ferroviária.

Os últimos trinta anos mostraram um desenvolvimento notável na aplicação da mecânica da fratura ao problema de fadiga e, atualmente, ela vem sendo largamente utilizada. Em geral a aproximação na pesquisa sobre a integridade de trilhos é similar à filosofia de tolerância ao dano originalmente adotada pela força aérea norte-americana, depois pela indústria aérea. A filosofia assume que trincas vão existir, causadas ou por processo de manufatura ou por processo de fadiga. Análises da mecânica da fratura e testes podem ser aplicados para checar se trincas podem ser detectadas por inspeções periódicas, antes que elas cresçam até um tamanho grande o suficiente para causar uma falha estrutural.

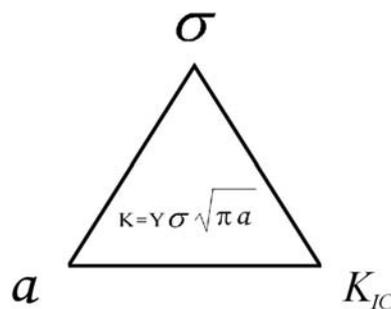


Figura 26: Triângulo da mecânica da fratura mostrando como estão correlacionados o carregamento aplicado, o tamanho crítico e a propriedade do material.

A vida em fadiga pode ser estimada com base em parâmetros do material e do estado de tensões. Com a mecânica da fratura, podemos determinar o comprimento máximo de uma trinca que pode ser tolerado sem que haja a indução de uma falha. A Figura 26 mostra o triângulo esquemático da mecânica da fratura representando como estão correlacionados o carregamento aplicado, o tamanho crítico e a propriedade do

material (supondo-se uma placa semi-infinita de espessura unitária com carregamento no modo I).

No contexto de trilhos ferroviários, tolerância ao dano é a capacidade do trilho de resistir à falha e continuar em operação segura com defeitos. Isso implica que um trilho contendo uma trinca ou um defeito é mais fraco que um trilho normal, e que a resistência dos trilhos decresce com o crescimento dos defeitos. A medida em que o crescimento continua, as tensões aplicadas irão eventualmente exceder a resistência do trilho e causar a falha. Nesse ponto o defeito alcançou o tamanho crítico. Ferramentas da mecânica da fratura são usadas para determinar a taxa de crescimento de defeitos e seus tamanhos críticos. Tais informações podem ser usadas para estabelecer guias para determinação de frequências de inspeção apropriadas para minimizar o risco de falhas a partir de defeitos não detectados.

2.5.1 Taxa de Propagação da Trinca:

Sob influência de tensões cíclicas, trincas irão se formar e crescer, e caso este crescimento não seja combatido, prosseguirá até a fratura.

A taxa de propagação da trinca é uma função não somente do nível de tensão e do tamanho da trinca, mas também das propriedades do material.

O comportamento típico da taxa de crescimento da trinca de fadiga em materiais está representado esquematicamente na Figura 27. A curva pode ser dividida em três regiões distintas: Na região I, em baixos níveis de tensão ou pequenos tamanhos de trinca, as trincas preexistentes não irão crescer em resposta ao carregamento cíclico. A curva é essencialmente linear na região II, onde existe, efetivamente, uma relação entre a velocidade de propagação, da/dN , e a amplitude do fator de intensidade de tensões ΔK . Essa relação é expressa pela lei de Paris, com a qual é possível estimar a vida em fadiga para peças e componentes [38]. Na região III, existe um crescimento acelerado da trinca, o qual ocorre até que o $K_{máx}$ se aproxime do K_{IC} , onde a fratura instável é iminente.

Na região II, a propagação ocorre predominantemente por um mecanismo de estriação dútil transgranular e é pouco afetada pela microestrutura, tensão média e espessura [47].

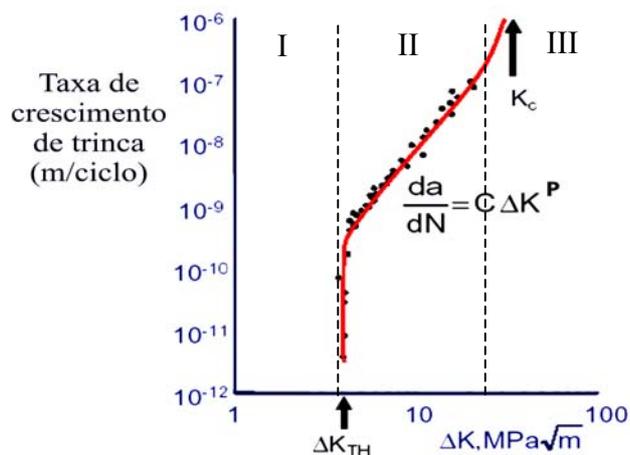


Figura 27: Comportamento típico da taxa de crescimento da trinca de fadiga. A curva é essencialmente linear na região II, o que está de acordo com a lei de Paris, com a qual é possível estimar a vida em fadiga para peças e componentes.

2.6 Mecanismos de Propagação de Trincas:

Normalmente, trincas não propagam através de um campo de tensões compressivas. Entretanto, uma vez que trincas tenham iniciado devido a altas tensões de contato, a presença de fluido em conjunto com a passagem dos trens pode incentivar o crescimento das trincas. Isso ocorre por que o fluido preso dentro da trinca fechada, produz uma pressão localizada muito alta em sua ponta, com magnitude maior do que a da tensão compressiva. Este fenômeno é conhecido como *squashed balloon* ou balão esmagado. O mesmo ajuda a explicar porque os perfis de trilhos esmirilhados podem parar o crescimento de trincas mesmo que elas não tenham sido totalmente removidas. Se as trincas são tiradas do contato roda-trilho, o mecanismo de “balão esmagado” (*squashed balloon*), que facilita a propagação delas pela camada compressiva, não pode operar. Com a aproximação da roda, a boca da trinca se abre, permitindo a entrada de fluido. Após a passagem da roda sobre a trinca, a boca da trinca se fecha guardando fluido dentro, e assim a ponta da trinca fica aberta permitindo a continuidade de seu crescimento. Esse comportamento é mostrado esquematicamente na Figura 28.



Figura 28: Desenho esquemático do mecanismo de “balão esmagado”. Com a aproximação da roda, a boca da trinca se abre, permitindo a entrada de fluido. Após sua passagem, a boca se fecha guardando fluido dentro [29].

Esse mecanismo também ajuda a explicar porque as trincas normalmente crescem no sentido do tráfego. Se esse for invertido, a roda forçará o fluido para fora da trinca em vez de mantê-lo dentro dela, minimizando o crescimento nesse sentido. A Figura 29 mostra esquematicamente esse fenômeno.



Figura 29: Desenho esquemático mostrando que, com a inversão do sentido de tráfego, a roda força o fluido para fora da trinca minimizando seu crescimento [29].

2.7 Modelo para Crescimento de Defeitos Transversais:

Os princípios da mecânica da fratura podem ser aplicados para examinar a resistência à fadiga e à fratura de trilhos contendo defeitos de tamanhos detectáveis. Diferentes tipos de defeitos podem ser analisados através das expressões matemáticas da tensão na ponta da trinca ou do fator de intensidade de tensões. Uma vez que o fator de intensidade de tensões para uma dada trinca ou defeito é conhecido, o estado de tensões na vizinhança da ponta da trinca é completamente definido e o crescimento da trinca pode ser previsto.

O modelo de engenharia para o crescimento de defeito transversal do tipo *detail fracture* é baseado na solução da mecânica da fratura linear elástica para uma trinca elíptica contida dentro do boleto [8]. Esse defeito foi modelado a partir de fórmulas básicas do fator de intensidade de tensões que foram modificadas para levar em conta os efeitos dos contornos finitos e do gradiente de tensões. Considera-se o modo I de abertura da superfície da trinca conforme ilustrado na Figura 30.

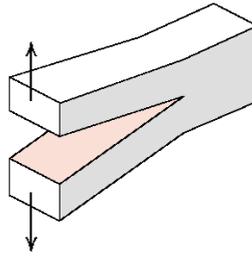


Figura 30: Modo I de abertura de superfície de trinca [48].

O modelo foi inicialmente calibrado correlacionando-se dados de resultados obtidos de seis trilhos testados no FAST (TTC de *Pueblo - Colorado*, EUA). O modelo foi validado com dados de outros 12 trilhos fraturados testados no FAST [49]. A validação do modelo incluiu também correlações com resultados de testes em laboratório feitos com corpos de prova do tipo *compact-tension* que simularam o crescimento dos defeitos. O procedimento experimental para essa simulação foi desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) e foram aplicados após por *Instron Corp* [50], [51]. Os dados de crescimento de trinca produzidos pelas simulações experimentais estiveram razoavelmente de acordo (entre 10 e 20%) com os dados de testes em campo coletados no FAST. Os dados da taxa de crescimento de fadiga obtidos desses experimentos foram correlacionados na seguinte equação de taxa de crescimento:

$$\frac{da}{dN} = C \frac{\Delta K^p}{(1-R)^q} \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde a é o tamanho característico do defeito, N é o número de ciclos de tensão, ΔK é o gradiente de fator de intensidade de tensões e R é a razão entre as tensões mínimas e máximas. C , P e q são constantes empíricas que dependem da taxa de crescimento da trinca no material.

Cuidadosos estudos foram executados com esse modelo para examinar o efeito relativo ao traçado, manutenção, operação e outros fatores da via sobre o tempo de crescimento estável e o tamanho crítico [8]. Dentre os fatores que têm maior influência, destacam-se a temperatura de trabalho e a tensão residual, que além disso são os menos controláveis. O primeiro por ter grande dependência do clima, já o segundo, por estar sob influência da camada encruada da superfície de rodagem.

2.7.1 Efeitos da Seqüência de Carregamento:

Para um trilho modelado como uma viga em base elástica (Figura 31), a máxima tensão trativa ocorre a uma certa distância longitudinal do ponto de aplicação da carga, conforme mostra a Figura 32. Esse fenômeno é conhecido como “flexão reversa” e essa distância é definida por:

$$x_0 := \frac{\pi}{2 \cdot \beta_v} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde β_v é a constante das vigas sobre base elástica que relaciona a rigidez da viga com a base elástica.

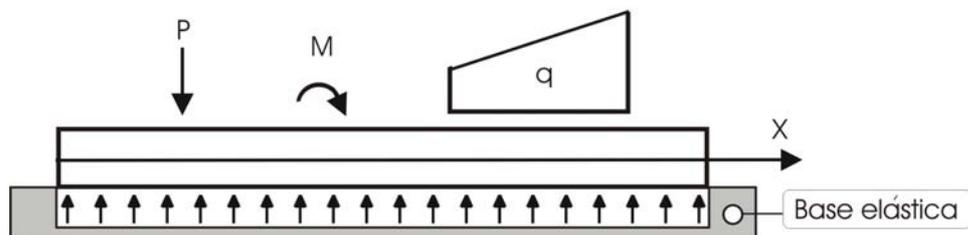


Figura 31: Viga sobre base elástica com carregamento qualquer. Adaptado de [60].

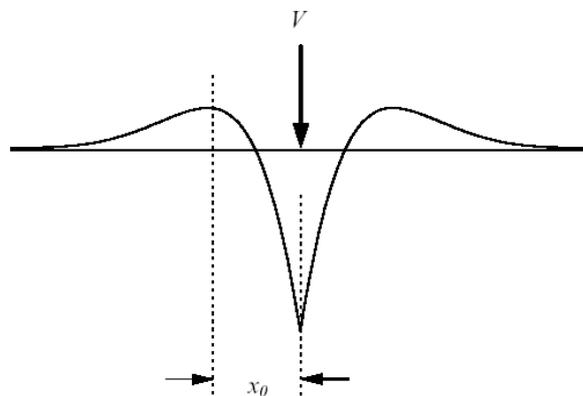


Figura 32: Distribuição do momento fletor para o carregamento simples de uma roda [6].

Experimentos de laboratório em que corpos de prova foram submetidos a carregamentos com amplitude variável, mostraram que a taxa de crescimento não depende somente do ciclo de tensão corrente, mas também dos ciclos prévios de tensão. Isso significa que a seqüência de aplicação de carregamento tem um efeito na taxa de crescimento de trinca. Entretanto, o modelo descrito anteriormente para análise de defeitos transversais negligenciou esse efeito.

O carregamento é afetado pela composição do trem porque os momentos fletores no trilho dependem não somente do peso dos vagões, mas do espaço entre os eixos e engates dos vagões. Tendo-se então a solução para uma deflexão vertical produzida por um

carregamento simples e usando-se o princípio da superposição, a curva de deflexão e o diagrama de momento fletor podem ser obtidos para qualquer sistema de carregamentos verticais [52].

Historicamente, a diferença no comportamento da taxa de crescimento de trinca devido à seqüência de carregamento, tem sido explicada pelo fenômeno de fechamento de trinca [53], [54]. Estudos analíticos e experimentais foram executados para examinar os efeitos da seqüência de carregamento e o papel do fechamento de trinca no comportamento de sua taxa de crescimento por fadiga em trilhos de aço [55], [56], [57].

2.8 Análise da Vida Remanescente:

Nesta seção são apresentadas as ferramentas matemáticas utilizadas no modelamento da previsão da vida remanescente de trilhos com defeitos transversais do tipo *detail fracture* desenvolvida por *Orringer* e outros [8], [6].

2.8.1 Análise das Tensões para Trilhos com Defeitos Transversais:

O crescimento de trincas por fadiga é dirigido pelo carregamento cíclico produzido pelo carregamento das rodas. Ciclos de tensão são criados pela flexão dos trilhos à medida que os trens viajam sobre a linha. O modelo de crescimento de defeito considera somente a componente longitudinal de tensão, porque, quando tracionada, essa componente é associada com a abertura da trinca, que por sua vez conduz ao crescimento da trinca. Entretanto, em adição à flexão, tensões residuais e temperaturas diferentes da neutra (livre de tensão) também contribuem para a magnitude total da tensão longitudinal. Na análise de tensões para defeitos transversais, o estado de tensão para um dado ponto no trilho e para um dado tamanho de defeito é simplesmente a soma das tensões fletoras, residual e térmica na direção longitudinal (perpendicular ao oposto da superfície da trinca e paralela à superfície de rodagem).

Tensões de Flexão:

Na presente análise, assume-se que o trilho se comporte como uma viga em base elástica representando o lastro de suporte [58]. Além disso, as tensões de flexão são calculadas usando a teoria da viga [52], cuja aplicação para crescimento de defeitos em trilhos é descrita em detalhes por *Orringer* [59].

As tensões fletoras nos trilhos compreendem as componentes fletoras vertical, lateral, tensão de empenamento, tensão fletora vertical e lateral no boleto. Essas três últimas atingem valores relevantes em curvas fechadas. Então, por exercerem uma pequena influência em ferrovias com predominância de linhas retas (ou curvas tangentes), como é o caso das típicas ferrovias de transporte de carga pesada brasileiras (como a EFC), e também para simplificação dos cálculos, essas três últimas componentes foram desconsideradas.

Timoshenko e *Langer* derivaram um sistema de equações diferenciais para determinar essas várias componentes fletoras [52]. Mais recentemente, em análises simplificadas, nas quais as equações diferenciais foram separadas, foi mostrada uma aproximação dessas tensões fletoras com razoável exatidão. Os resultados das análises simplificadas têm sido incorporados na análise de tensões dos modelos de crescimento de trinca de defeitos transversais.

A tensão fletora usada no cálculo do fator de intensidade de tensões para análise da fratura é assim calculada:

$$\sigma_b := \sigma_v + \sigma_l \quad (\text{Eq. 3})$$

em que σ_v é tensão fletora vertical e é dada por:

$$\sigma_v := \frac{M_{vx} \cdot z_{mod}}{I_{yyd}} \quad (\text{Eq. 4})$$

e σ_l é tensão fletora lateral e é dada por:

$$\sigma_l := \frac{M_l \cdot y}{I_{zzd}} \quad (\text{Eq. 5})$$

z_{mod} é a distância entre o centro do defeito e o centróide do trilho, M_{vx} é momento fletor vertical em função da posição longitudinal ao longo do trilho, I_{yyd} e I_{zzd} são os momentos de inércia de área (ou momento estático de segunda ordem) em relação ao eixo horizontal e vertical respectivamente que passam através do centróide do trilho em função do nível de desgaste do boleto. O momento fletor vertical usado na Equação 4 é dado por:

$$M_{vx} := \frac{-V}{4 \cdot \beta_v} \cdot e^{-(\beta_v \cdot x)} \cdot (\cos(\beta_v \cdot x) - \sin(\beta_v \cdot x)) \quad (\text{Eq. 6})$$

Na Equação 4 a distância entre o centro do defeito e o centróide do trilho, z_{mod} é dada por:

$$z_{mod} := h_{tot} - z_{nx} - z^* \quad (\text{Eq. 7})$$

em que h_{tot} refere-se a altura do trilho em função do nível de desgaste, z_{nx} é altura do centróide do trilho também em função do nível de desgaste e z^* é a distância entre o centro do defeito e a superfície de rodagem. A Figura 33 mostra a localização relativa do defeito

caracterizado pela distância entre o centro do defeito e a superfície de rodagem, z^* , e a distância entre o centro do defeito e o meio plano vertical do trilho, y .

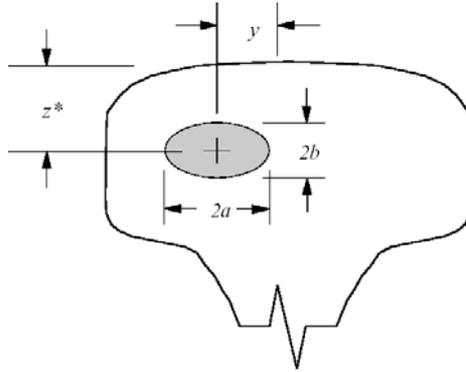


Figura 33: Desenho esquemático do defeito transversal tipo *detail fracture* [6].

As equações para determinar essas distâncias que são dependentes da área do defeito são dadas por:

$$z^* := 0.621 + 1.758 \left(\frac{A}{Ah} \right) - 1.793 \cdot \left(\frac{A}{Ah} \right)^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

$$y := \left(1.187 - 2.952 \cdot \frac{A}{Ah} \right) + 3.431 \cdot \left(\frac{A}{Ah} \right)^2 \quad (\text{Eq. 9})$$

Ainda na Equação 4, o momento de inércia de área em relação ao eixo horizontal que passa através do centróide do trilho em função do nível de desgaste do boleto, I_{yyx} , é apresentado no APÊNDICE B.

Na Equação 6, V é o carregamento vertical da roda e onde β_v é a constante das vigas sobre base elástica que relaciona a rigidez vertical da viga com a base elástica e que é dada por:

$$\beta_v := \sqrt[4]{\frac{k_v}{4 \cdot E \cdot I_{yyx}}} \quad (\text{Eq. 10})$$

em que k_v é a reação vertical da base elástica por unidade de comprimento devido ao deslocamento da viga e E é o módulo de elasticidade que para trilho de aço, é assumido como igual a 207 GPa [60].

Na Equação 5 M_l é momento fletor lateral em função da posição longitudinal ao longo do trilho, y é a distância entre o centro do defeito e o meio plano vertical do trilho e I_{zzd} é o momento de inércia de área em relação ao eixo vertical que passa através do centróide do trilho e também é dado no APÊNDICE B.

O momento fletor lateral (M_l) é dado por:

$$Ml := \frac{-L}{4 \cdot \beta l} \cdot e^{-\beta l \cdot x} \cdot (\cos(\beta l \cdot x) - \sin(\beta l \cdot x)) \quad (\text{Eq. 5})$$

em que L é o carregamento lateral da roda e onde βl é a constante das vigas sobre base elástica que relaciona a rigidez lateral da viga com a base elástica e é dada por:

$$\beta l := \sqrt[4]{\frac{k_l}{4 \cdot E \cdot I_{zzx}}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Nessa equação, k_L é assumido como igual a $0,85 \times k_v$, conforme indicado por *Orringer* e outros [8].

Tensão Residual:

Uma fórmula empírica foi derivada de resultados prévios de pesquisa baseados em dados experimentais obtidos de dois testes separados [8], [49], que relatam a magnitude da tensão residual no boleto do trilho em função do tamanho do defeito transversal.

$$\sigma_m := (30 - 2.125 \cdot HA) \quad (\text{Eq. 7})$$

Válida para defeitos maiores que 0% e menores que 10% de HA ; ou:

$$\sigma := (10 - 0.125 \cdot HA) \quad (\text{Eq. 8})$$

Válida para defeitos maiores que 10% e menores que 80% de HA .

Em que HA é a área do boleto em porcentagem de área do boleto. De acordo com essa fórmula, a tensão residual no trilho é maior para defeitos transversais menores. Ocorre que defeitos menores estão mais tracionados, pois se localizam mais próximos da região deformada plasticamente da superfície do boleto. À medida que eles crescem, a distância entre a frente de propagação (extremidade do defeito) e a camada encruada aumenta, e por isso, a tensão residual tratativa diminui.

Tensões Térmicas:

Para trilhos continuamente soldados, a tensão térmica é calculada pelo produto do coeficiente de expansão térmica linear (α) pelo módulo de elasticidade (E) e pela diferença entre a temperatura neutra T_N (livre de tensões) e a de trabalho T .

$$\sigma_t := \alpha \cdot E \cdot (T_n - T) \quad (\text{Eq. 9})$$

Para trilho de aço, α é igual a $11,7 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1}$ e E igual a 207 GPa. Como indicado na Equação 15, uma temperatura de serviço menor que a temperatura neutra produzirá uma tensão térmica tratativa.

Neste trabalho assume-se, por simplificação, uma diferença de temperatura média constante ao longo da vida em fadiga do defeito transversal.

2.8.2 Análises para Trilho Desgastado:

A seção transversal do trilho pode ser aproximada por uma seção idealizada consistindo de três áreas retangulares que representam o boleto, a alma e o patim (Figura 34). O desgaste do trilho é aproximado pela perda de material ou mudança de área somente do retângulo que representa o boleto. Na presente análise, o desgaste é quantificado por porcentagem de área do boleto.

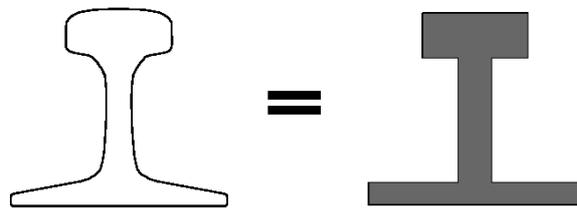


Figura 34: Desenho esquemático mostrando as seções transversais real e idealizada de um trilho [30].

A área da seção transversal do boleto do trilho idealizado é o produto de sua altura por sua largura equivalente. Esse valor é 2,6% menor que a atual área do boleto, estando dentro de uma razoável aproximação de engenharia (tolerância aceitável).

Na presente análise, a perda de material por desgaste é modelada geometricamente de duas maneiras: uma delas assume uma perda uniforme de material na parte de cima do boleto, o que resulta em redução na altura do mesmo, a outra assume que ocorra um uniforme perda de material do canto da bitola. Esses dois modelos idealizados são mostrados esquematicamente na Figura 35.

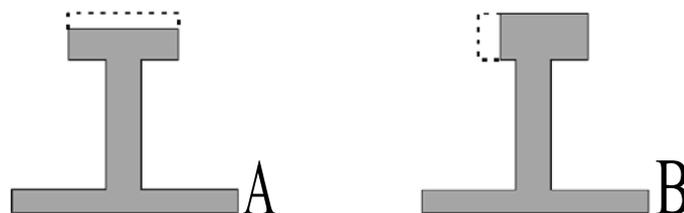


Figura 35: Desenhos esquemáticos dos modelos idealizados de desgaste no boleto. Em A perda de altura do boleto e em B perda de largura [6].

As propriedades da seção requeridas para a análise das tensões fletoras no trilho são estimadas da seção idealizada com o decréscimo de área do boleto causado pelo desgaste.

A Figura 36 compara o efeito dos modelos de desgaste no crescimento de defeitos.

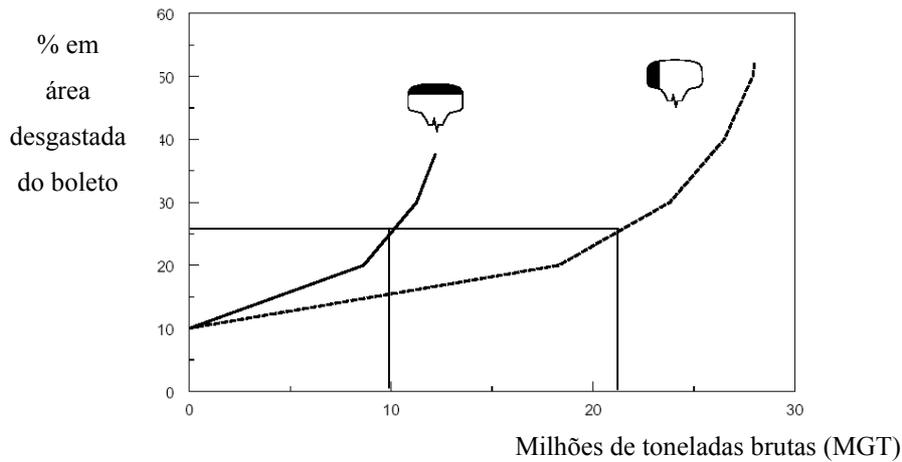


Figura 36: Efeito dos dois modelos de desgaste no crescimento dos defeitos. O gráfico mostra a % em área desgastada do boleto por milhões de toneladas transportadas [30].

Conforme está indicado, um trilho com redução na altura do boleto tem uma menor vida em fadiga do que com uma equivalente redução na largura do boleto. Assim, o modelo de perda de altura fornece uma estimativa mais conservadora para o tempo de crescimento de trinca transversal do que o modelo de perda de largura do boleto.

A análise da propagação de defeitos em trilhos desgastados assume que a quantidade de desgaste é constante durante toda a vida do defeito. Em outras palavras, o modelo assume que todo o desgaste ocorre previamente à formação do defeito e que não ocorre desgaste adicional enquanto o defeito se propaga até o tamanho crítico.

O nível de desgaste é representado por X que é a medida em termos de porcentagem da área do boleto (%HA). A Tabela 2 mostra como estão relacionados o nível de desgaste, X (em %HA) e a respectiva redução de espessura na superfície em mm.

Tabela 2: Relação entre o nível de desgaste X (em %HA) e a redução de espessura na superfície (em mm).

X (%HA)	Δh (mm)	X (%HA)	Δh (mm)
5	2,2	20	8,7
10	4,4	25	10,9
15	6,6	30	13,1

2.8.3 Fator de Intensidade de Tensões para Defeitos Transversais:

Para tamanhos menores que 50% da área do boleto (HA), assume-se que o defeito transversal se encaixe como uma falha elíptica na vizinhança da bitola superior do boleto. As dimensões dos defeitos são caracterizadas pelos semi-eixos maior e menor, a e b , da elipse mostrada na Figura 33. A fórmula para o fator de intensidade de tensões, ou “ K ” para a falha elíptica localizada no boleto e mostrada na Figura 33, tem a seguinte forma matemática:

$$K := \frac{2}{\pi} \cdot Ms \cdot Ma \cdot (\sigma_r + \sigma_t + Mg \cdot \sigma_b) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (\text{Eq. 10})$$

Onde, a é o semi-eixo maior da falha elíptica, Ms é o fator de amplificação da tensão que conta para a forma elíptica da falha (relaciona a área do defeito e a distância do centro do defeito aos eixos de simetria da seção do trilho), Ma é o fator de amplificação que conta para os contornos finitos (relaciona a área do defeito e a área do boleto), Mg é o fator que conta para o gradiente de tensão local, σ_r , σ_t e σ_b , referem-se às tensões residual, térmica e fletora respectivamente. Medições em trilhos contendo defeitos transversais revelaram que a razão b/a é tipicamente igual a 0,7 e corresponde a um Ms de 0,984 [8].

O fator de amplificação Ma leva em conta a perda de área do boleto devida ao desgaste e é dado por [6]:

$$Ma := \sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \left[\frac{1 - \frac{X}{100}}{\frac{A}{Ah}} \right] \cdot \tan \left[\frac{\pi}{2 \cdot \left(1 - \frac{X}{100}\right)} \cdot \left(\frac{A}{Ah}\right) \right]} \cdot \left[\frac{0.63 + \frac{2.02}{\left(1 - \frac{X}{100}\right)} \cdot \left(\frac{A}{Ah}\right) + 0.37 \cdot \left[1 - \sin \left[\frac{\pi \cdot \left(\frac{A}{Ah}\right)}{2 \cdot \left(1 - \frac{X}{100}\right)} \right] \right]^3}{\cos \left[\frac{\pi}{2 \cdot \left(1 - \frac{X}{100}\right)} \cdot \frac{A}{Ah} \right]} \right] \quad (\text{Eq. 11})$$

em que A é o tamanho do defeito em termos de área ($A = \pi \cdot a \cdot b$), Ah é a área de um boleto não desgastado (novo) e X é o nível de desgaste em % HA .

O fator de intensidade de tensões varia com a posição ao longo da frente de propagação da trinca [61], [62]. Essa variação também leva em conta se o campo de tensões aplicado é uniforme [63]. Isso significa que a razão (b/a) da forma elíptica deveria mudar com o crescimento da trinca. Para simplificar a presente análise, assumisse que o aspecto da razão permanece constante enquanto a trinca cresce. Esse valor médio do defeito no boleto é referido agora como o gradiente de amplificação de tensões e é calculado por:

$$Mg := \left[\frac{\int_0^{2\cdot\pi} M\theta^P \cdot \rho d\theta}{\int_0^{2\cdot\pi} \rho d\theta} \right]^{\frac{1}{P}} \quad (\text{Eq.12})$$

em que $M(\theta)$ é uma função do ângulo em torno da trinca e ρ é o raio medido da origem do defeito ao seu perímetro. O fator que conta para o gradiente de tensão local (Mg) depende da razão de carregamento lateral para vertical da roda, como do tamanho do defeito relativo a área do boleto de um trilho novo e sua dedução completa é dada no APÊNDICE C.

2.8.4 Determinação do Tamanho Crítico do Defeito:

Da Equação 16, o fator de intensidade de tensão varia com o tamanho e forma do defeito, o nível de desgaste do trilho e a temperatura. Variando-se valores de tensão residual e térmica pode-se obter valores do fator de intensidade de tensões equivalentes ao valor de tenacidade à fratura do material. Assim, fixando-se o valor de tensão residual e isolando-se a variável a , pode-se obter o tamanho crítico do defeito para uma dada temperatura e nível de desgaste:

$$acr := \left[\frac{KIC \cdot \pi}{2 \cdot Ms \cdot Ma \cdot (\sigma_r + \sigma_t + Mg \cdot \sigma_b) \cdot \sqrt{\pi}} \right]^2 \quad (\text{Eq. 13})$$

2.8.5 Crescimento dos Defeitos Transversais:

No caso do movimento do trem sobre o trilho, os ciclos de tensão têm variação na amplitude. Os vales e os picos dessas variações definem as tensões fletoras mínimas e máximas, que produzem um ciclo de tensão. Para essa amplitude de carregamento, o tempo de crescimento estável para um defeito propagar de um tamanho inicial até o tamanho crítico, pode ser calculado por [59]:

$$n(T) := \int_a^{acr} \left[C \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\sigma^P}{(1-R)^Q} \right] \cdot \frac{1}{(G \cdot \sqrt{a})^P} da \quad (\text{Eq. 14})$$

em que $n(T)$ é o número de grupos de cinco ciclos que é visto como dependente da temperatura, $\Delta\sigma$ é definido como a diferença entre a tensões máximas e mínimas atuantes no ciclo, R é a razão entre a tensão máxima e a mínima, e G é o fator geométrico que depende do tamanho do defeito e é dado por:

$$G := \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot Ma \cdot Ms \quad (\text{Eq. 15})$$

Na Equação 20 tem-se o somatório que se refere ao dano produzido por 5 ciclos do espectro de carregamento, que depende do tamanho do defeito, da temperatura e da distância entre os eixos. Esse grupo de 5 ciclos de carregamento é mostrado esquematicamente na Figura 37 e corresponde à passagem de 4 eixos de dois vagões adjacentes.

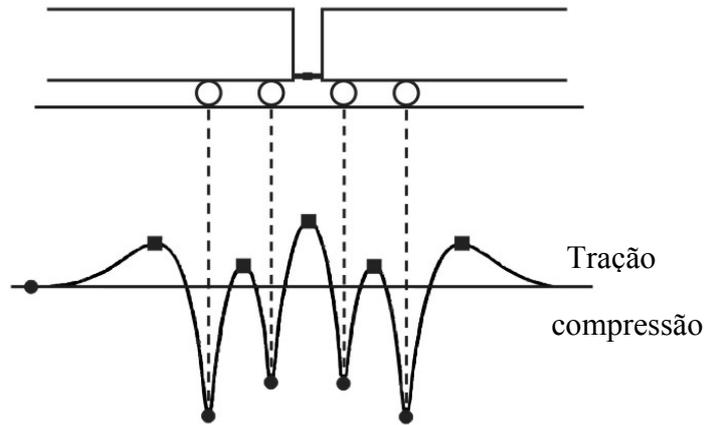


Figura 37: Desenho esquemático dos ciclos de tensão de Flexão produzido por dois vagões adjacentes. Adaptado de *Orringer* [3].

Para aplicações ferroviárias é conveniente converter o número de ciclos em tonelagem carregada sobre os trilhos. A tonelagem bruta pode ser convertida em dias de tempo de crescimento seguro se a tonelagem diária é conhecida. Assim, o tempo de crescimento estável pode ser calculado por:

$$\text{Dias}(T) := \left[\frac{CP}{TD} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Ah}{100 \cdot \pi} \right)^{\left(\frac{1-p}{2} - \frac{p}{4} \right)} \right]_{Ai}^{Af} \cdot \frac{1}{C \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta\sigma^p}{(1-R)^Q} \cdot (G \cdot \sqrt{A})^p \cdot \sqrt{A}} dA \quad (\text{Eq. 16})$$

em que CP é o carregamento resultante da passagem de quatro eixos que provocam os cinco ciclos de carregamento, TD refere-se à tonelagem bruta diária. A variável de integração foi mudada de a na Equação 14 para A na Equação 16. Isso resultou em termos

adicionais que aparecem na mesma que é deduzida através da derivação dada no APÊNDICE A.

Efeito da Curvatura da Linha:

No modelo de crescimento de defeito, a variação na curvatura da linha se refere a mudanças nas características de carregamento da roda em relação ao trilho, particularmente, a razão lateral/vertical da localização do contato roda-trilho.

Tabela 3: Descrição do carregamento com a variação da curvatura da linha [30].

Curvatura da Linha	Razão L/V
Tangente	0,05
Curva de 5 graus (média)	0,30
Curva de 8 graus (fechada)	0,50

A Tabela 3 lista as características de carregamento correspondentes a três tipos de curvaturas. Pode-se observar que quanto mais fechada é a curva maior é a relação de carregamento “lateral para vertical” (L/V).

Efeito do Fator Dinâmico de Carregamento:

Movimentos dinâmicos dos carros e dos truques devidos a irregularidades na roda ou no trilho, causam uma variação na magnitude de carregamento da roda no trilho a medida que o trem viaja sobre a linha. A Associação Ferroviária de Engenharia da América (AREA) tem recomendado uma simples, mas conveniente fórmula que leva em conta os movimentos dinâmicos e que é dada pela amplificação do carregamento estático da roda por um fator (*DLF – dynamic load factor*) que depende da velocidade do trem⁷:

$$DLF := 1 + 33 \cdot \frac{veloc}{100 \text{ Diam}} \quad (\text{Eq. 17})$$

Onde *veloc* é a velocidade do trem (em milhas por hora) e *Diam* é o diâmetro da roda (em polegadas).

De acordo com a Equação 23, um fator dinâmico de 1,3 corresponde a um trem com velocidade em torno de 50 km/h e diâmetro de rodas de aproximadamente 0,8 m.

Efeito da Rigidez da Base Elástica:

Para vários valores de k_v , suas interpretações físicas são listadas na Tabela 4.

Tabela 4: Representação do módulo de rigidez vertical da base elástica [30].

Módulo de K	Descrição do tráfego
6,9-13,8 MPa	Baixo subgrau, pobremente drenado, baixa velocidade (V) e Baixo Carregamento (C)
13,8-20,7 MPa	V = 32-64 km/h, C = 10 – 20 MGT/ano
20,7-34,5 MPa	V = 72-193 km/h, C = 30 – 120 MGT/ano

Em geral, o efeito da rigidez da base no tempo de crescimento estável e no tamanho crítico do defeito é fraco quando comparado com outros fatores examinados.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais avaliados nesse trabalho são segmentos de trilhos produzidos por dois diferentes fabricantes de procedência européia (grau 260 da norma Européia prEN 13674-1) e utilizados em ferrovias brasileiras. Parte dos ensaios e resultados apresentados nesse trabalho foram extraídos de relatórios de caracterização de trilhos produzidos pelo LAMEF. Os trilhos foram identificados como Fabricantes A e B.

Segundo o *Draft* da norma Européia prEN 13674-1 de 2002 essa classe de material deve apresentar as seguintes especificações:

A Tabela 5 mostra a composição química do aço para trilho grau 260 (segundo a norma prEN 13674-1 que classifica em função da dureza HB).

Tabela 5: Composição química do aço para trilho da classe 260 segundo a norma prEN 13674-1.

	C	Si	Mn	P (máx)	S	Cr (máx)	Al (máx)	V (máx)	N (máx)
260	0,6/0,82	0,13/0,6	0,65/1,25	0,03	0,008/0,03	0,15	0,004	0,03	0,01

A dureza especificada para os trilhos grau 260 é de 260 a 300 HB. Os valores são aceitáveis até de 390 e caso esteja confirmada a microestrutura perlítica, poderiam chegar até 405 HB [64].

Para esta classe de aço para trilhos, os valores de K_{IC} individuais não podem ser menores que $26 \text{ MPa m}^{1/2}$ enquanto que o valor médio mínimo deve ser de $29 \text{ MPa m}^{1/2}$.

Para um ΔK de $10 \text{ MPa.m}^{1/2}$ a taxa de crescimento de trinca por fadiga não pode exceder 17 m/Gc e para um ΔK de $13,5 \text{ MPa.m}^{1/2}$ não pode exceder 55 m/Gc

3.1 Características Geométricas:

O perfil dos trilhos empregados neste trabalho é do tipo *Vignole*. Esses trilhos são classificados por normas que os classificam através de suas características geométricas. Na presente análise ambos os trilhos possuem o mesmo perfil cuja denominação é 136 RE. Ele possui 136 libras de peso por jarda de comprimento, o que justifica sua denominação. Para

a norma brasileira, ABNT, que usa o sistema internacional de unidades de medidas, este perfil possui 67,37 kg por metro de comprimento e é denominado TR-68.

A Tabela 6 e a Figura 38 apresentam algumas das principais medidas e valores geométricos que caracterizam o perfil 136 RE, e que serviram de base para o cálculo das tensões que deveriam ser aplicadas em cada etapa dos ensaios.

Tabela 6: Valores geométricos usados na avaliação das tensões de ensaio para trilhos 136 RE [25].

Htot	18,57 cm	Altura total do trilho
Zh	16,23 cm	Distância de baixo do patim ao centróide do boleto
Zn	8,51 cm	Distância de baixo do patim ao centróide do trilho
Zb	1,1 cm	Distância de baixo do patim ao centróide do patim
Wh	7,46 cm	Largura do boleto
Ar	86,13 cm ²	Área da seção transversal do trilho
Ah	31,36 cm ²	Área da seção transversal do boleto
Aw	23,36 cm ²	Área da seção transversal da alma
Ab	31,42 cm ²	Área da seção transversal do patim
Iyyo	3951 cm ⁴	Momento de inércia vertical do trilho
Izzo	603,6 cm ⁴	Momento de inércia lateral do trilho
Iyyho	48,71 cm ⁴	Momento de inércia vertical do boleto
Izzho	126,13 cm ⁴	Momento de inércia lateral do boleto
Izzw	11,24 cm ⁴	Momento de inércia lateral da alma
Izzb	466,24 cm ⁴	Momento de inércia lateral do patim

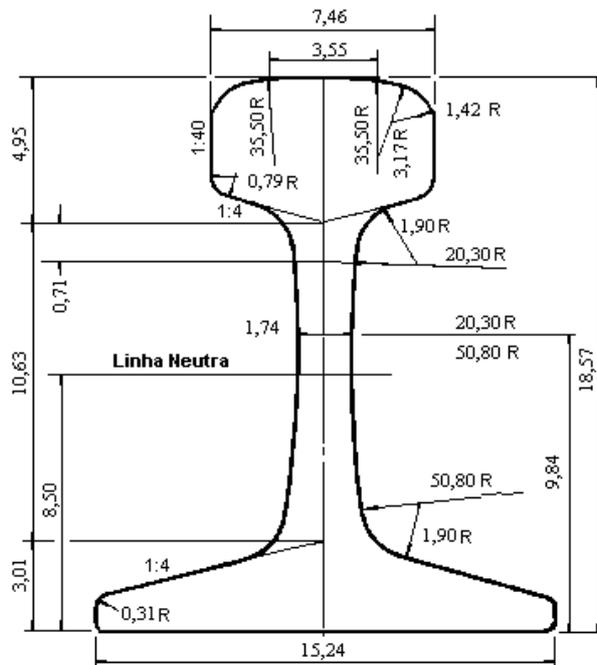


Figura 38: Perfil 136 RE com suas principais medidas cotadas em centímetros [25].

3.2 Caracterização Mecânico-Metalúrgica:

Nesta seção é apresentada a metodologia utilizada na realização das análises e ensaios necessários para a caracterização mecânica e metalúrgica, salientando-se as etapas e procedimentos adotados.

3.2.1 Análise Química:

A análise química dos trilhos foi realizada com espectrômetro de emissão ótica da *Spectro* modelo *Spectrolab*. Esse equipamento permite fazer análises rápidas e simultâneas de diversos elementos, detectando qualquer elemento estranho presente que entre na composição do material do trilho examinado, ainda que seu teor seja relativamente pequeno. A região do boleto foi analisada cinco vezes para cada trilho e os resultados correspondem a uma média das mesmas. Também foi feito o cálculo do carbono equivalente através da seguinte fórmula:

$$Ceq = \%C + \%Mn/6 + (\%Cr + \%Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (\text{Eq. 18})$$

3.2.2 Análise Macroestrutural:

Através do exame do aspecto de uma seção transversal plana, lixada e atacada de um segmento de trilho é possível revelar a macroestrutura de laminação e detectar heterogeneidades como segregações ou trincas que não tenham sido adequadamente atenuados ou eliminados por tratamentos mecânicos e térmicos a que o material é submetido após a solidificação.

Para a realização da análise macrográfica foram efetuados cortes nas seções transversais dos segmentos dos trilhos e retiradas amostras que foram preparadas para impressão de Baumann. Para este ensaio foi seguida a Norma ISO 4968 e utilizado o reagente químico ácido sulfúrico (H₂SO₄) 5%.

3.2.3 Análise Microestrutural:

Na análise micrográfica foi realizada uma avaliação da microestrutura, das seções longitudinal e transversal, e a determinação do tamanho de grão austenítico prévio (seção transversal) de acordo com a Norma ASTM E 112. A Figura 39 apresenta um desenho esquemático da localização de retirada dos corpos de prova.

todos os ensaios realizados à temperatura de -20 C , pois a procedência dos trilhos é européia e, por isso, devem atender as especificações da respectiva norma.

Dentre os possíveis tipos de corpos de prova foi escolhido o do tipo dobramento (*single edge notched bend specimen*) para os ensaios de flexão a três pontos conforme sugerido pela norma prEN 13674-1, o qual possui a forma de uma barra de seção retangular. A retirada dos corpos de prova foi feita na região do boleto, de tal forma que a direção de propagação da trinca no corpo de prova fosse a mesma em que ocorre no boleto dos trilhos em serviço (direção transversal). Essa orientação foi utilizada tanto no ensaio para determinação da Tenacidade à Fratura (K_{IC}), quanto para o ensaio para determinação das Curvas da $dN \times \Delta K$ e é mostrada esquematicamente na Figura 41.

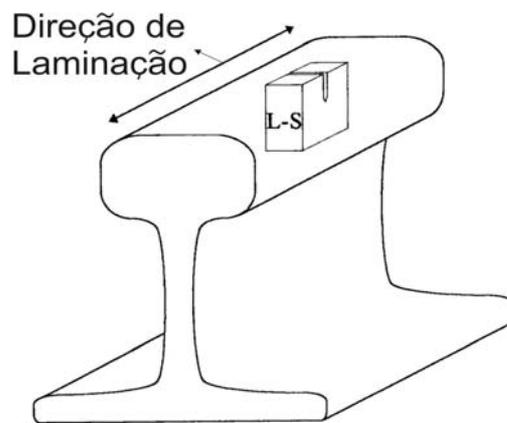


Figura 41: A orientação dos corpos de prova utilizada nos ensaios de determinação da Tenacidade à Fratura (K_{IC}) e de determinação da taxa de propagação de trincas foi do tipo L-S.

A Figura 42 e a Figura 43 mostram desenhos com as principais cotas para o corpo de prova do tipo dobramento utilizado no ensaio.

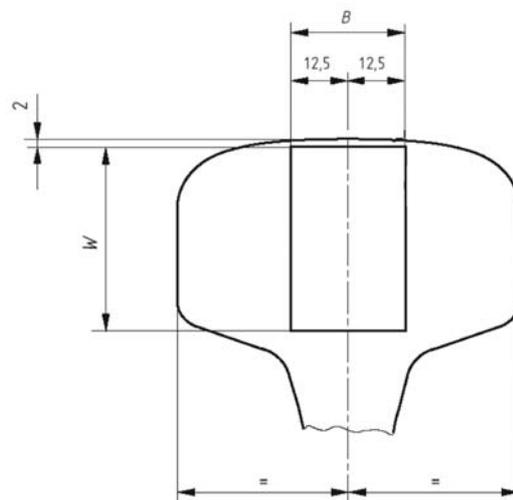


Figura 42: Localização e seção dos corpos de prova para tenacidade à fratura [64].

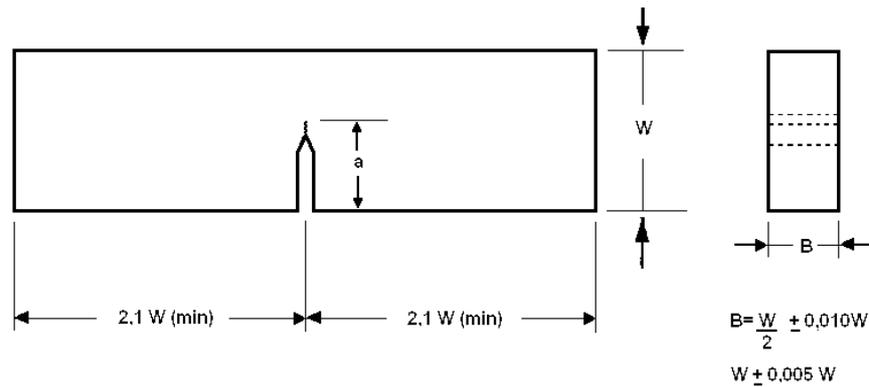


Figura 43: Representação do corpo de prova para o ensaio de tenacidade à fratura (K_{IC}) [64].

O dimensionamento dos corpos de prova, visando ensaios dentro do estado plano de deformação, estabelece algumas medidas mínimas. As medidas utilizadas foram:

- Espessura (B) de 15 mm;
- Altura (W) de 30 mm;
- Pré-trinca (a) de 15 mm;
- Distância entre apoios (S) de 120 mm;
- Comprimento total de 140 mm.

A Norma ASTM E399-90 recomenda que estes corpos de prova tenham, na sua parte central, um defeito com a maior acuidade possível, e que este vá até a metade da altura. Para a produzir esse defeito, foi feito um entalhe através da técnica de eletro-erosão. A mostra uma fotografia de um corpo de prova em um recipiente com álcool e gelo seco sendo monitorado com um termopar até que se atinja a temperatura de -20 C .



Figura 44: Fotografia de um corpo de prova em um recipiente com álcool e gelo seco sendo monitorado com um termopar até que se atinja a temperatura de -20 C .

A pré-trinca foi realizada em uma máquina servo hidráulica de ensaios universal *MTS (Material Test System)* modelo 810, com o corpo de prova em carga de flexão. A execução do ensaio foi monitorada através de extensômetro de fratura (*clip gage*), cujos suportes (*knife edges*) são colocados no corpo de prova.

Os ensaios também foram realizados na mesma máquina universal *MTS* modelo 810. O sistema de aquisição e monitoramento das variáveis do ensaio, tais como, a abertura da trinca, a taxa de aplicação e valor da carga foi feito com o auxílio do *software MTS Multi Purpose Test Wear*. A Figura 45 (A) mostra um corpo de prova posicionado na máquina, pronto para ser ensaiado. Em (B), a disposição do ensaio.



Figura 45: Fotografia de um corpo de prova posicionado na máquina de ensaios, pronto para ensaiar em A. Em B, a disposição do ensaio.

Para os ensaios optou-se pelo controle de carga e utilizou-se uma taxa de carregamento constante no valor de 0,5 kN/s.

Os dados obtidos nos ensaios são plotados em gráficos de carga por deslocamento medido no extensômetro de fratura. A determinação do valor da carga máxima que o corpo de prova trincado é capaz de suportar antes de romper foi feita de acordo com o Anexo B da Norma prEN 13674-1.

Com o corpo de prova rompido é feita a medição sobre a superfície da fratura do tamanho da trinca de fadiga. De posse desses valores pode-se calcular, utilizando a fórmula proposta no item A 3.5.3 da Norma ASTM E399-90, o valor da tenacidade à fratura do material testado, desde que o comprimento da pré-trinca não esteja fora dos limites de 0,45 a 0,55 do valor de w e que a carga máxima não ultrapasse em dez por cento a carga usada para os cálculos [65].

3.2.6 Ensaio para a Determinação das Curvas $da/dN \times \Delta K$:

As curvas de $da/dN \times \Delta K$ para os trilhos em estudo foram executadas segundo as recomendações da Norma prEN 13674-1. A forma dos corpos de prova escolhidos também foi do tipo dobramento (*single edge notched bend specimen*), conforme sugere a mesma

norma, porém com tamanho diferente. A Figura 46 mostra um desenho com as principais cotas para o corpo de prova do tipo dobramento utilizado nesse ensaio.

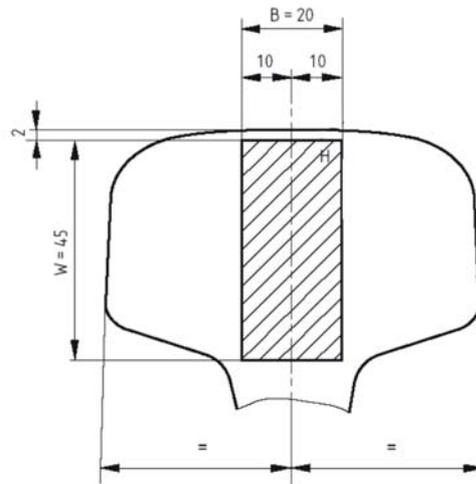


Figura 46: Localização e seção dos corpos de prova para crescimento de trinca de fadiga [64].

Os ensaios de fadiga foram feitos com corpo de prova segundo a orientação LS na mesma máquina universal de ensaios *MTS* modelo 810, sendo que esta foi programada para atuar com controle de carga, frequência média de 30 Hz e razão de carregamento (R) de 0,5. Para controlar estes parâmetros foi usado o programa *MTS Fatigue Crack Growth Test Ware*.

Os valores do número de ciclos e do comprimento da trinca levantados nos ensaios foram usados para a obtenção dos valores de da/dN , através do método da secante. Os valores da amplitude do fator de intensidade de tensões para cada comprimento da trinca também foram calculados segundo este mesmo método. Plotando-se os valores calculados em um sistema de eixos de coordenadas em escala logarítmica obtém-se as curvas da taxa de propagação da trinca versus amplitude do fator de intensidade de tensões, que são características para cada tipo de material testado.

Os resultados obtidos nos ensaios de fadiga feitos em corpos de prova, com a orientação LS, plotados como $\log(da/dN) \times \log(\Delta K)$, permitiram obter a Equação de Paris através de regressão linear para cada material testado e seus respectivos valores dos parâmetros C e P .

3.3 Metodologia para Previsão da Vida Remanescente:

Conforme visto na Figura 37, a passagem de quatro eixos de dois vagões adjacentes provocam a variação da tensão fletora longitudinal ao longo do trilho. Os vales e picos dessa variação definem as tensões mínimas e máximas, que por sua vez definem os ciclos de tensão. Essas tensões são dependentes da distância entre os eixos. Uma vez que os espaçamentos típicos para um vagão de 120 toneladas são da ordem de 1,78 m entre eixos do mesmo truque e de 2,16 m entre eixos de vagões adjacentes, para o presente cálculo, foram consideradas essas distâncias.

De posse dos valores das propriedades do material e dados referentes a geometria do trilho (levando em conta a perda em área pelo desgaste), primeiramente calculou-se o tamanho crítico do defeito utilizando a Equação 19. No cálculo, foram utilizados: A tensão fletora correspondente ao pico do ciclo de maior amplitude resultante da passagem dos quatro eixos de dois vagões adjacentes com carregamento vertical de 33 toneladas por eixo (por ser esse, um valor típico para ferrovias do tipo *heavy haul*), lateral igual à metade do vertical (o que representa os esforços em uma curva fechada), rigidez da base elástica (K_v) de 20,7 MPa, Ma em função do nível de desgaste e σ_r , correspondentes ao defeito crítico. O carregamento estático da roda foi amplificado por um DLF (fator dinâmico de carregamento) igual a 1,42, correspondente a uma velocidade de 65 km/h e rodas com diâmetro de 80 cm. A tensão fletora foi multiplicada pelo Mg (fator de amplificação do gradiente de tensões) utilizando-se para a mesma relação de carregamento lateral/vertical. Para a tensão térmica foram assumidas: uma TN (temperatura neutra) de 28 C e T (temperatura de trabalho) de 12, 15 e 18 C. O ciclo com maior amplitude, bem como a relação lateral-vertical de carregamento utilizados na determinação da tensão fletora e do tamanho crítico de defeito, foram escolhidos de modo a superestimar o carregamento, possibilitando a obtenção de um tamanho de defeito crítico menor, e conseqüentemente, ma maior segurança na previsão. Os cálculos foram feitos para tamanhos iniciais do defeito de: 4, 10, 15 e 20% de HA e níveis de desgaste de 0, 10, 20 e 30% de HA .

A Figura 47 mostra um fluxograma com o procedimento de cálculo para determinação do tamanho crítico do defeito.

As tensões máximas e mínimas para crescimento de defeitos, foram calculadas pela superposição das tensões térmicas e residuais com a tensão fletora máxima e mínima dos ciclos respectivamente, e modificadas por dois fatores: (1) o fator de amplificação do gradiente de tensões, (Mg) que depende do tamanho do defeito e da relação de carregamento lateral-para-vertical da roda de 0,05 correspondente a uma curva tangente

(predominância de linhas retas). (2) um fator dinâmico de carregamento (*DLF*) igual a 1,42 (o mesmo usado no cálculo do tamanho crítico).

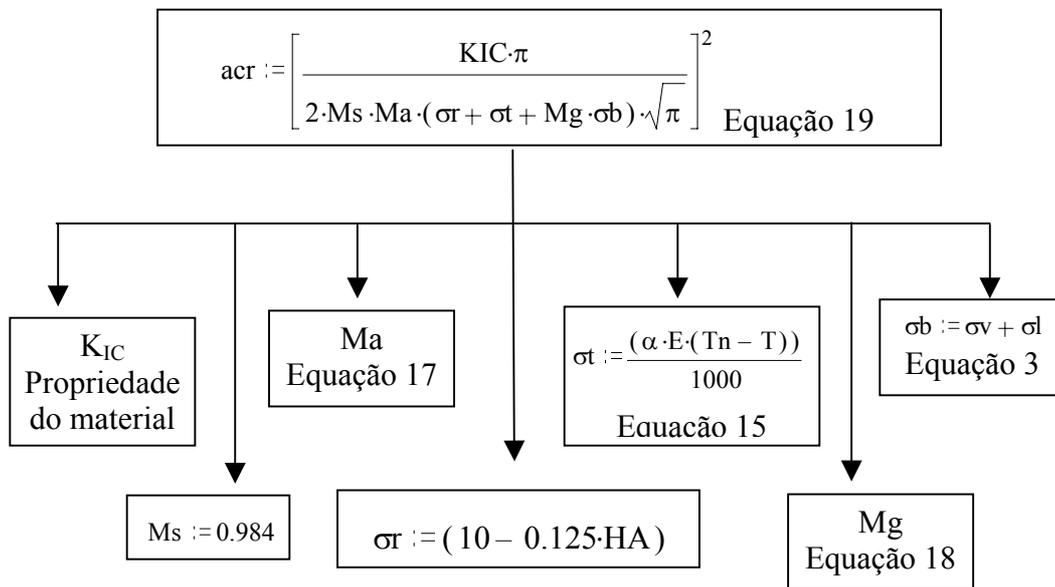


Figura 47: Fluxograma com o procedimento de cálculo para determinação do tamanho crítico do defeito.

Nos cálculos, assume-se que o crescimento do defeito ocorra somente durante o ciclo trativo de tensão. Matematicamente, quando a tensão mínima é negativa, considera-se como igual a zero.

O efeito das tensões térmicas e residuais junto à tensão fletora modificada para uma dada temperatura de trabalho e nível de desgaste foi plotado em um gráfico que é mostrado no próximo capítulo.

A Figura 48 mostra um fluxograma com o procedimento de cálculo para determinação da vida remanescente.

Para o cálculo da vida remanescente, utilizou-se a Equação 16 com um *CP* igual a 132 toneladas, correspondente a passagem de quatro eixos com carregamento vertical de 33 toneladas cada. Utilizou-se também, uma tonelagem bruta diária, *TD* de 178000 toneladas correspondente a 65×10^6 MTB, sendo 50 milhões de minério mais o peso do vagão.

Com objetivo de ver a influência que tamanhos críticos correspondentes a diferentes temperaturas de trabalho (ambiente) poderiam causar no tempo de crescimento estável, foram então calculados as vidas remanescentes para os tamanhos críticos correspondentes as temperaturas de 12 e 18 C.

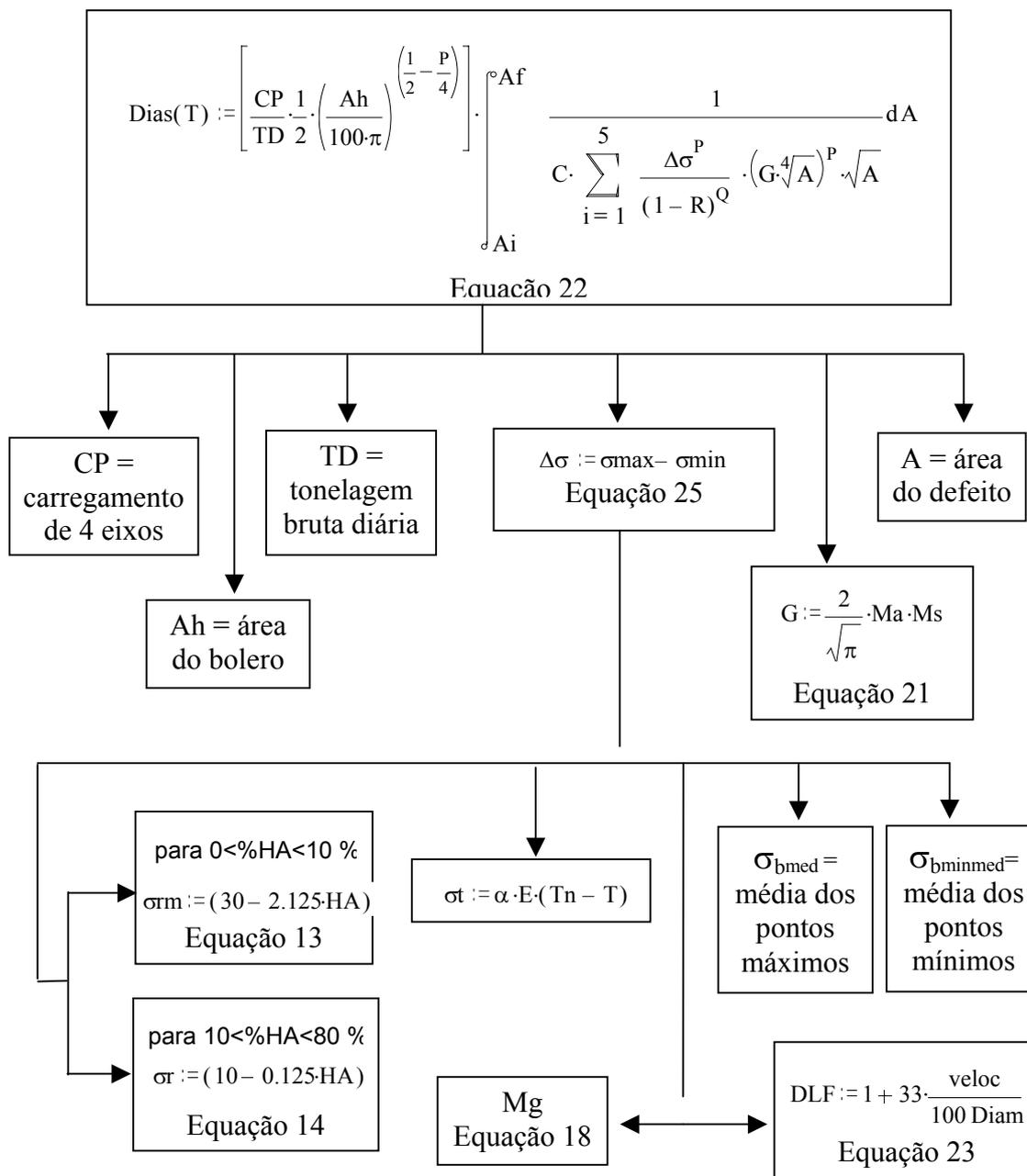


Figura 48: Fluxograma com o procedimento de cálculo para determinação da vida remanescente.

Sabendo que a técnica de inspeção de ultra-som utilizada pela CVRD (segundo o técnico Raimundo Baldez) é capaz de detectar trincas a partir de 6 mm (aproximadamente 4% de HA), também foram calculados os tempos para que um defeito consiga crescer desse tamanho inicial até o tamanho crítico. Analisou-se também, a influência da resolução da técnica de inspeção. Foi calculada a vida remanescente melhorando a sensibilidade da técnica utilizada, de modo que essa fosse capaz de detectar defeitos com 3 e 2% da área do boleto.

Nos cálculos, trabalhou-se com os valores de medidas nas unidades do sistema inglês, pois como grande parte da pesquisa na área ferroviária é feita na Inglaterra e nos Estados Unidos, esse sistema tornou-se um padrão utilizado.

O APÊNDICE D apresenta um memorial de cálculo para o caso do trilho Fabricante A onde o tamanho do defeito inicial é de 20% de HA e nível de desgaste de 20% de HA .

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização Mecânico-Metalúrgica:

Nessa seção serão apresentados os resultados referentes à caracterização mecânico-metalúrgica.

4.1.1 Análise Química:

A análise química foi realizada na região do boleto via espectrometria de emissão ótica e os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Composição química (% em peso) dos trilhos dos fabricantes A e B.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	
Fabricante A	0,83	0,32	1,22	0,013	0,018	0,19	0,006	0,013	<0,001	
Fabricante B	0,81	0,36	1,21	0,020	0,016	0,27	<0,005	0,010	<0,001	
	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Fe
Fabricante A	<0,01	0,03	0,014	0,001	0,055	<0,01	<0,002	0,006	0,0002	97,23
Fabricante B	<0,01	0,01	0,016	0,001	0,057	<0,01	<0,002	<0,001	0,0002	97,23

A composição química encontrada para ambos os fabricantes apresentam teores similares à classe de trilho 260 segundo a norma prEN 13674-1.

O carbono equivalente foi igual a 1,09 para o trilho do Fabricante A e de 1,07 para o do Fabricante B.

4.1.2 Análise Macrográfica:

Como pode ser visualizado na Figura 49, o segmento de trilho Fabricante A apresenta segregação na alma.

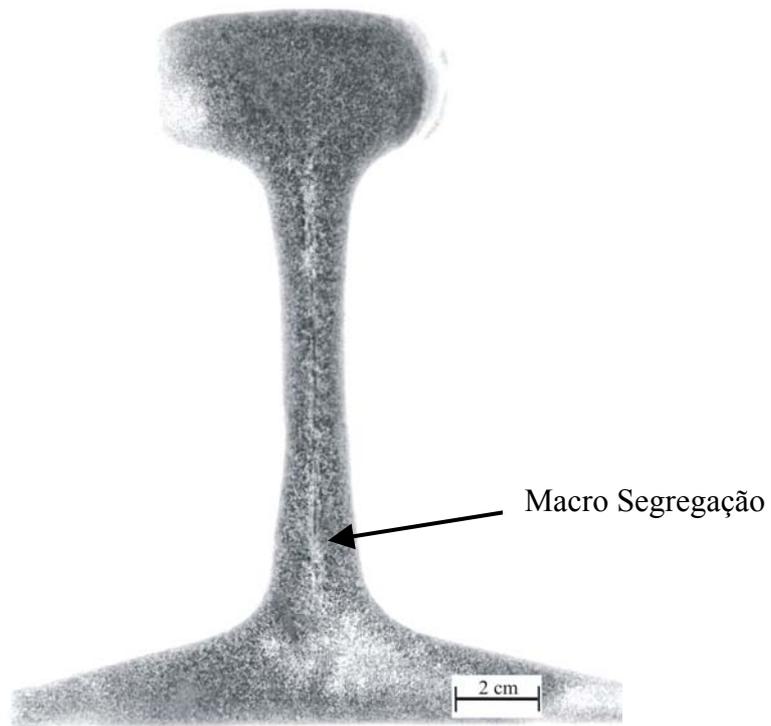


Figura 49: Impressão de Baumann de segmento do trilho Fabricante A. Ataque: H_2SO_4 5%.

Como pode ser visualizado na Figura 50, o segmento de trilho Fabricante B apresenta uma macroestrutura uniforme, o que significa ser um produto de boa qualidade.

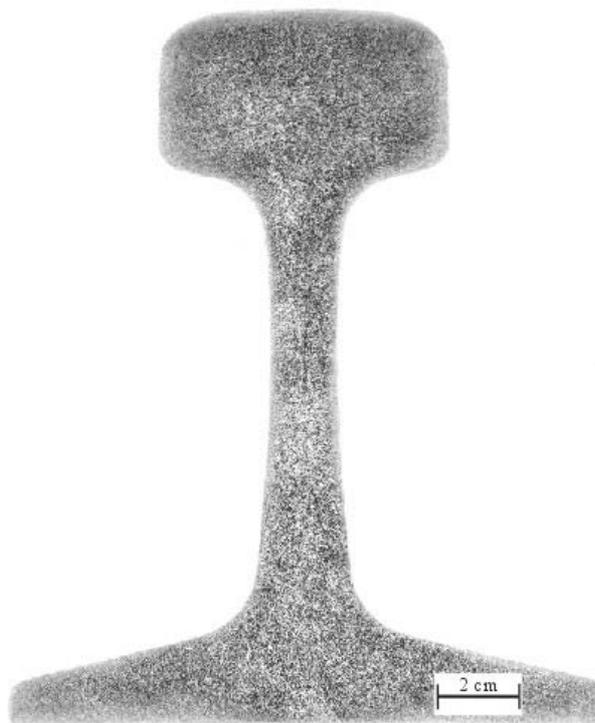


Figura 50: Impressão de Baumann do trilho Fabricante B. Ataque: H_2SO_4 5%.

De acordo com o Anexo D da Norma prEN 13674-1, a classificação dos segmentos de ambos os fabricantes é aceitável.

4.1.3 Análise Micrográfica:

A microestrutura encontrada, tanto no sentido longitudinal como no transversal do Fabricante A, é perlítica fina como mostram as Figura 51 A e B.

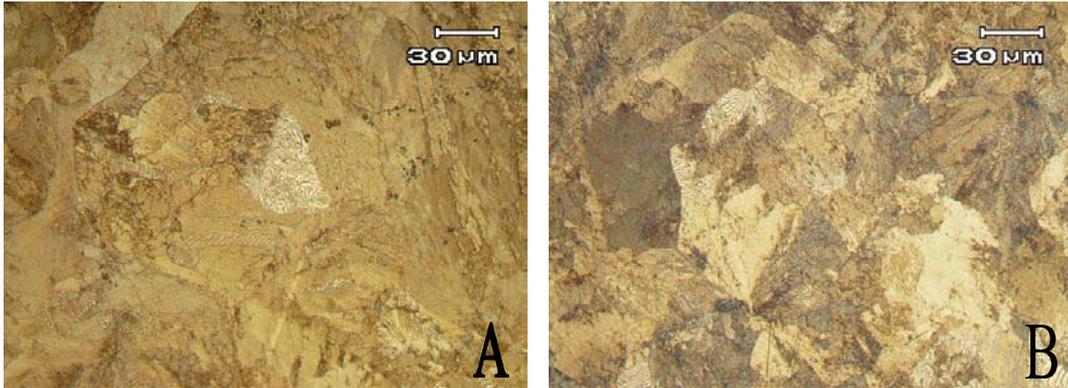


Figura 51: Microestrutura perlítica do Fabricante A. Em A, sentido transversal e em B, sentido longitudinal. Ataque: Nital 2%.

O segmento de trilho analisado do Fabricante A apresenta tamanho de grão ASTM 6, como pode ser visto na Figura 52.

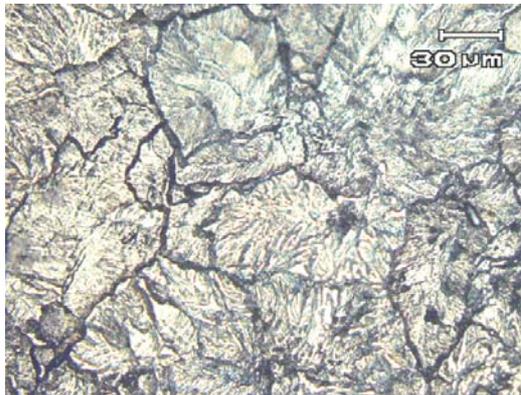


Figura 52: Micrografia apresentando os contornos de grão austeníticos prévios do Fabricante A. Ataque: Ácido pícrico supersaturado.

A microestrutura encontrada para o Fabricante B, tanto no sentido longitudinal como no transversal, também é composta de perlita fina, como mostram as Figura 53 A e B.

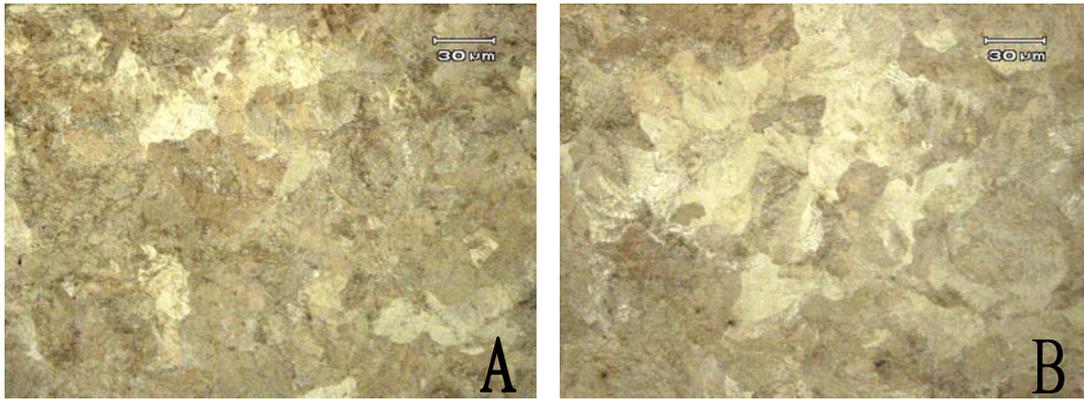


Figura 53: Microestrutura perlítica do Fabricante B. Em A, sentido transversal e em B, sentido longitudinal. Ataque: Nital 2%.

O segmento de trilho do Fabricante B analisado apresenta tamanho de grão ASTM 8, como pode ser visto na Figura 54.



Figura 54: Micrografia apresentando os contornos de grão austeníticos prévios. Ataque: Ácido pícrico supersaturado.

4.1.4 Ensaio de Dureza:

A Tabela 8 mostra as médias dos valores obtidos. Os resultados apresentados satisfazem a especificação de dureza para os trilhos grau 260.

Tabela 8: Resultados dos ensaios de dureza (em HB).

Posição da Indentação	Fabricante A	Fabricante B
1 (lado esquerdo)	321	337
2 (lado esquerdo)	313	321
3	298	306
1 (lado direito)	313	337
2 (lado direito)	298	321
RS	373	345
4 (lado esquerdo)	329	345
4 (lado direito)	329	337

4.2 Ensaio de Tenacidade à Fratura (K_{IC}):

A tabela mostra os resultados dos ensaios de tenacidade à fratura à temperatura de -20 C. Como pode ser observado, pelos valores da Tabela 9, os trilhos apresentam valores maiores do que os especificados pela norma prEN 13674-1 para a classe de aço para trilhos enquadrado em 260 e 260 Mn.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de tenacidade à fratura em -20 C.

	Força (kN)	W (mm)	B (mm)	A (mm)	K_{IC} (MPa·m^{1/2})
Fabricante A	6,89	30,1	14,8	15,5	33,9
Fabricante B	7,75	29,8	14,8	16,1	37,3

4.3 Ensaio de Determinação da Taxa de Propagação de Trinca de Fadiga:

Os resultados obtidos nos ensaios da taxa de propagação de trincas, plotados como $\log(da/dN) \times \log(\Delta K)$, permitiram obter a Equação de Paris através de regressão linear para cada material testado e seus respectivos valores dos parâmetros C e P .

A Tabela 10 mostra os resultados encontrados. A Tabela 11 mostra os valores dos coeficientes C e P obtidos através de regressão das curvas $da/dN \times \Delta K$.

Tabela 10: Resultados dos ensaios de $da/dN \times \Delta K$ (em m/Gc).

	ΔK 10 MPa m^{1/2}	ΔK 13,5 Mpa m^{1/2}
Fabricante A	11,06	40,25
Fabricante B	8,70	26,10

Tabela 11: Coeficientes C e P obtidos através de regressão das curvas $da/dN \times \Delta K$.

	C [m.(MPa.m^{1/2})⁻⁴.ciclo⁻¹]	C [in.(Ksi.in^{1/2})⁻⁴.ciclo⁻¹]	P
Fabricante A	5×10^{-13}	1×10^{-11}	4,31
Fabricante B	2×10^{-12}	6×10^{-11}	3,64

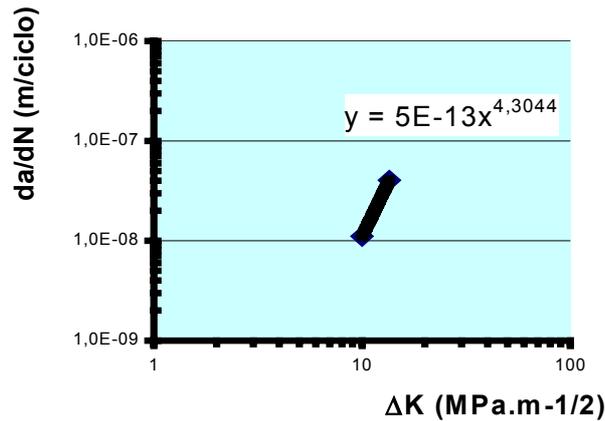


Figura 55: Gráfico de da/dN x ΔK para o material dos trilhos do Fabricante A.

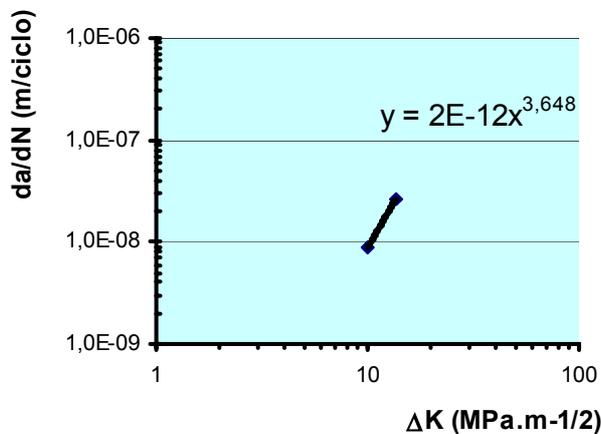


Figura 56: Gráfico de da/dN x ΔK para o material dos trilhos do Fabricante B.

4.4 Análise da Vida Remanescente:

A Tabela 11 lista os tamanhos críticos de defeitos em % de HA para ambos os fabricantes em diferentes níveis de desgaste. Foram utilizados: A Equação 19, um K_V de 20,7 MPa, uma T de 15 C e Ma em função do nível de desgaste. A Tabela 12 lista os tamanhos críticos de defeitos em % de HA para ambos os fabricantes, agora com nível de desgaste igual a 10% de HA e com diferentes temperaturas de trabalho.

Tabela 11: Listagem dos tamanhos críticos em % de HA , para diferentes níveis de desgaste, temperatura de 15 C e Ma em função do nível de desgaste.

Nível de desgaste (%)	Fabricante A	Fabricante B
0	37,7	41,2
10	33,3	36,4
20	29,2	31,8
30	25,1	27,4

Tabela 12: Listagem dos tamanhos críticos em % de HA , para diferentes temperaturas, X de 10% HA .

Temperatura de Trabalho (C)	Fabricante A	Fabricante B
12	27,4	30,5
14	28,2	31,3
16	29,1	32,2
18	30,1	33,1

Cálculo das Tensões Mínimas e Máximas:

A Figura 57 A mostra o gráfico com a variação da tensão fletora longitudinal ao longo do trilho resultante da passagem de quatro eixos de dois vagões adjacentes com carregamento de 33 toneladas por eixo, K_v de 20,7 Mpa, tamanho do defeito de 20% de HA e X de 20%. A tensão foi amplificada pelos fatores Mg (para uma relação de carregamento lateral-para-vertical da roda de 0,05 (correspondente a curva tangente) e DLF de 1,42.

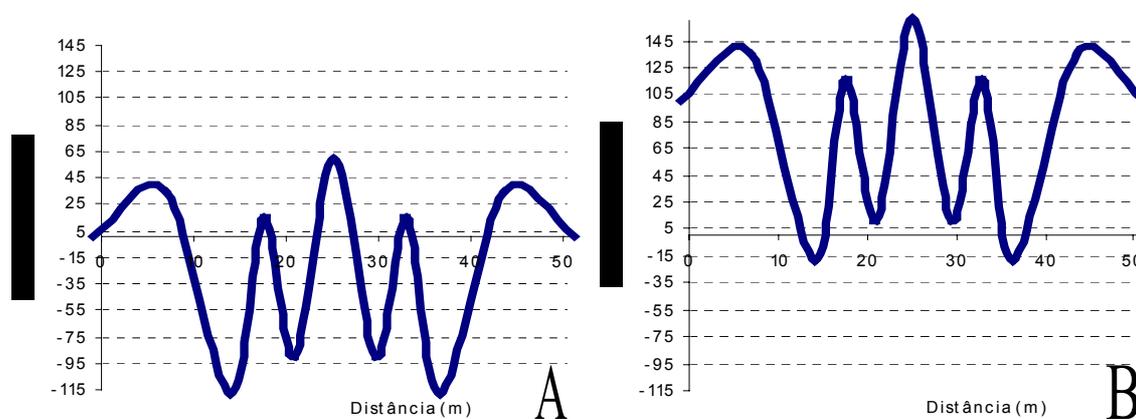


Figura 57: Ciclos de tensão fletora amplificada pelos fatores Mg de 1,087 e DLF de 1,42. O carregamento foi de 33 toneladas por eixo, K_v de 20,7 MPa, tamanho do defeito de 20% de HA , X de 20%. Em A, só a tensão fletora modificada. Em B, o efeito da superposição de σ_t ($T=15C$ e $T_N=28C$) e σ_r na mesma.

Na Figura 57 B é mostrado o efeito da superposição das tensões térmicas e residuais, calculadas para a T de 15 C e tamanho do defeito de 20% HA (que correspondem a aproximadamente 101 MPa), com a tensão fletora modificada.

Foi utilizada essa relação entre de tamanho de defeito inicial e nível de desgaste, porque para ela, dois dos ciclos mínimos são negativos, e por isso, esses foram considerados iguais a zero no cálculo da variação da tensão ($\Delta\sigma$), assim como no cálculo da razão entre as tensões (R) também é considerado como igual a zero.

Crescimento dos Defeitos Transversais:

As Tabelas 13 e 14 listam os tempos de crescimento estável em dias para três diferentes tamanhos de defeitos transversais iniciais e três diferentes níveis de desgaste do boleto para os trilhos Fabricante A e Fabricante B considerando 178000 toneladas brutas trafegadas por dia.

Tabela 13: Listagem da vida remanescente (em dias) em função do tamanho de defeito inicial (em % de HA) e do nível de desgaste (em % de HA) para o trilho Fabricante A.

Desgaste A inicial	0%	10%	20%	30%
10 %	40,9	33,8	26,5	19,3
15 %	22,9	17,2	11,8	7,0
20 %	12,6	8,3	4,6	1,9

Tabela 14: Listagem da vida remanescente (em dias) em função do tamanho de defeito inicial (em % de HA) e do nível de desgaste (em % de HA) para o trilho do Fabricante B.

Desgaste A inicial	0%	10%	20%	30%
10 %	51,2	39,4,6	28,7	19,7
15 %	29,6	21,0	13,7	7,9
20 %	15,5	9,8	5,5	2,5

As Figura 58 e Figura 59 mostram a influência da porcentagem de desgaste na vida remanescente dos trilhos Fabricante A e Fabricante B para os três tamanhos de defeitos iniciais.

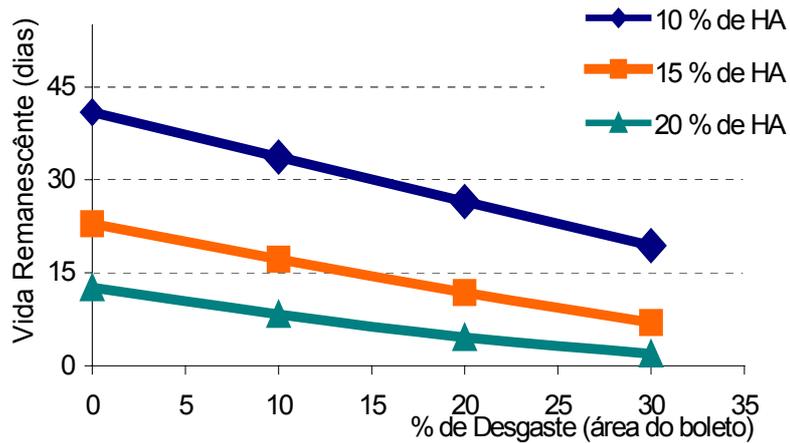


Figura 58: Influência da % de desgaste na vida remanescente do trilho Fabricante A para diferentes tamanhos de defeitos iniciais.

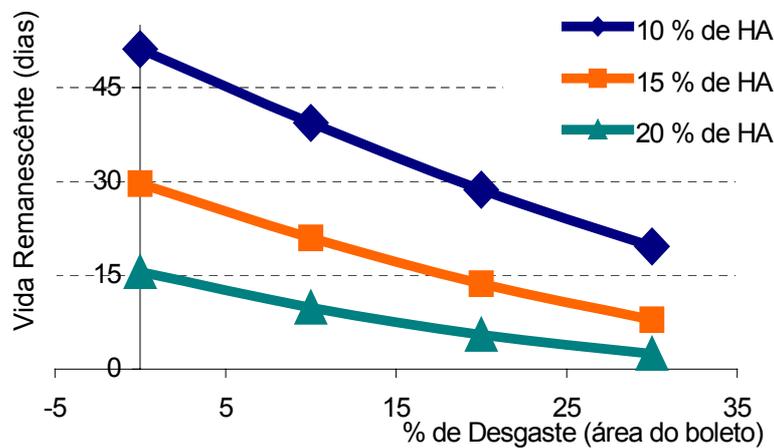


Figura 59: Influência da % de desgaste na vida remanescente do trilho Fabricante B para diferentes tamanhos de defeitos iniciais.

Como pode-se observar, a vida remanescente diminui em função do nível de desgaste do boleto e é menor quanto maior o tamanho do defeito inicial para ambos os materiais. O material do Fabricante A apresenta em média uma vida remanescente menor decorrente de sua maior taxa de propagação.

Tabela 12: Listagem do tempo de crescimento seguro (em dias), para trilhos com defeitos de 10% de HA, nível de desgaste de 10% de HA e tamanhos críticos correspondentes a diferentes temperaturas de trabalho (em C).

Temperatura de Trabalho	Fabricante A	Fabricante B
12	25,6	29,1
18	43,1	45,9

A Tabela 12 mostra a influência que tamanhos críticos correspondente a diferentes temperaturas de trabalho (ambiente) causam na vida remanescente.

A Tabela 13 lista o tempo em dias, para trilhos com defeitos de 4% de *HA* (trincas de aproximadamente 6,5 mm) crescerem até o tamanho crítico para diferentes níveis de desgaste.

Tabela 13: Listagem do tempo de crescimento seguro (em dias), para trilhos com defeitos de 4% de *HA* e diferentes níveis de desgaste.

Desgaste	0%	10%	20%	30%
Trilho				
Fabricante A	95,1	81,5	67,4	53,0
Fabricante B	103,0	87,4	73,6	56,6

A Tabela 14 lista o tempo em dias, para trilhos com defeitos de 3 e 2% de *HA* (inspecionados com técnicas mais sensíveis que sejam capaz de detectar trincas de aproximadamente 5,5 e 4,5 mm) crescerem até o tamanho crítico, para um nível de desgaste de 10%.

Tabela 14: Listagem do tempo de crescimento seguro (em dias), para trilhos do Fabricante A com defeitos de 3 e 2% de *HA* para um nível de desgaste de 10% de *HA*.

Ai	4%	3%	2%
Dias	81,5	102,4	138,6

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das análises químicas feitas nos aços dos trilhos em estudo mostraram não haver, entre eles, significativa diferença na composição química. Analisando os resultados verifica-se que nenhum elemento apresenta valores fora da faixa tolerável especificada para esse tipo de aço.

Nas impressões de Baumann, o trilho Fabricante A apresenta segregação de sulfetos na alma. Os segmentos de ambos os fabricantes estão com a classificação aceitável de acordo Norma prEN 13674-1.

No que se refere à microestrutura encontrada nos dois materiais analisados, pode-se dizer que ambos são totalmente perlíticos com estrutura composta de perlita fina e colônias bem distribuídas, como era de se esperar para materiais de trilhos com composição química equivalente à classe 260.

Foram encontrados valores ASTM 6 a 7 para o tamanho de grão austenítico prévio nos trilhos Fabricante A e ASTM 7 a 8 nos trilhos Fabricante B. Analisando esses resultados, verifica-se que o aço dos trilhos Fabricante B possui uma microestrutura mais refinada que lhe confere maior tenacidade, proporcionando assim um maior tamanho crítico de defeito e portanto, uma melhor qualidade.

A análise dos resultados obtidos na avaliação da dureza feita nos trilhos mostrou uma variação na dureza ao longo da seção transversal, aumentando de dentro do boleto para a superfície. Na região onde não existe influência da região encruada, como a do centro do boleto, o trilho Fabricante A apresentou uma média de 298 HB, enquanto que para o Fabricante B a média foi de 306 HB nessa região. Já na superfície de rodagem, o trilho Fabricante A apresentou um máximo de 373 HB, enquanto que para o Fabricante B esse máximo foi de 345 HB nessa região. Analisando os valores resultantes dos ensaios realizados nos materiais, verifica-se que o aço dos trilhos Fabricante A possui uma faixa de variação de dureza um pouco maior que o Fabricante B. Os valores de carbono equivalente de ambos os materiais foram muito parecidos. O trilho do Fabricante A apresentou um valor um pouco maior o que ajuda a justificar contribuição do teor de carbono no aumento da resistência mecânica.

A superfície de rodagem mais dura do trilho do Fabricante A, lhe confere maior resistência ao desgaste e à nucleação e propagação de trincas superficiais. Assim, uma trinca visível nesse trilho demoraria mais para crescer até de 20 mm, tamanho a partir do qual, caso não fossem realizadas ações como esmerilhamento e/ou inversão de sentido do trilho, ela passaria a se desenvolver significativamente para baixo atingindo estágios de profundidade pesados ou até severos, o que caracterizaria uma situação de risco. Isso permite esperar que a instalação e desenvolvimento de um defeito transversal ocorrerá com maior facilidade no Trilho do Fabricante B pois esse possui um menor nível de tensões residuais compressivas que ocorrem concomitantemente com o encruamento.

Os valores médios obtidos de tenacidade a fratura foram $33,9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para os trilhos do Fabricante A e $37,3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para os trilhos do Fabricante B. Esses resultados são considerados relativamente baixos para este tipo de material, principalmente para o trilho do Fabricante A, já que para trilhos de aço *standard* o valor é assumido como aproximadamente $38,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Verifica-se ainda que esses valores estão de acordo com os valores de tamanho de grão medidos, visto que, de fato, a microestrutura do material do Fabricante B possui grãos menores e apresenta uma correspondente maior tenacidade. A utilização dos valores de tenacidade à fratura obtidos à temperatura de -20 C nos cálculos de tempo de crescimento seguro feitas nesse trabalho (que é baseado em ferrovias instaladas em locais onde a temperatura média de trabalho seja de 23 C) implica em uma estimativa de vida mais conservadora.

Os resultados mostraram que os critérios de qualificação da norma prEN 13674-1 para a taxa de crescimento de trinca por fadiga foram atendidos. Para o ΔK de $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, a taxa de crescimento de trinca por fadiga foi de $11,60 \text{ m/Gc}$ para o Fabricante A e de $8,70 \text{ m/Gc}$ para o Fabricante B, ambos menores que 17 m/Gc . Já para o ΔK de $13,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, a taxa de crescimento de trinca por fadiga foi de $40,25 \text{ m/Gc}$ para o Fabricante A e de $26,01 \text{ m/Gc}$ para o Fabricante B, não excedendo o limite máximo de 55 m/Gc .

Os coeficientes C e P obtidos através de regressão das curvas $da/dN \times \Delta K$ indicam que para o trilho Fabricante A o ΔK necessário para propagação de trincas e a taxa de crescimento dessas são menor e maior respectivamente do que para o Fabricante B.

Nos ensaios de medição da taxa de propagação de trincas ($da/dN \times \Delta K$) cuidados devem ser tomados na determinação dos valores das constantes C e P , visto que resultados imprecisos podem comprometer a confiabilidade dos cálculos de crescimento do defeito e estimativa da vida remanescente. Ao assumir valores médios dos resultados, também deve

ser considerada a dispersão e a variabilidade, que no caso dos ensaios desse trabalho foram bem pequenas.

O tempo de crescimento estável diminui com o aumento do nível de desgaste do boleto e do tamanho do defeito inicial para ambos os materiais. O material do Fabricante B apresenta em média uma vida remanescente maior. Esse aumento na vida remanescente deve-se a sua menor taxa de propagação.

A vida remanescente diminui com o aumento do defeito inicial. Se, por exemplo, o carro detector descobrir um defeito com tamanho igual a 15% *HA*, a temperatura ambiente estiver prevista a manter-se em 15 C e o nível de desgaste seja de 10% de *HA*, espera-se que o defeito se torne grande o suficiente para causar a falha no trilho com a passagem do trem após 17 dias para o trilho do Fabricante A ou após 22 dias se o trilho for do Fabricante B. Se o tamanho do defeito é igual a 10% *HA* no momento da detecção com a mesma temperatura ambiente e nível de desgaste, o tempo de crescimento seguro poderia ser ligeiramente maior que 40 dias para o Fabricante A ou que 51 dias para o Fabricante B.

Intervalos de inspeção podem ser desenvolvidos baseados nos resultados obtidos. Por exemplo, se o tamanho do defeito detectado ou o nível de desgaste ainda não chegaram próximos aos críticos, ações corretivas podem ser adiadas por períodos de tempo dados pela relação entre tamanho de defeito não crítico e níveis de desgaste listados nas Tabelas 16 e 17. Ainda que durante a última inspeção não houvessem defeitos transversais detectados, os resultados da Tabela 16 sugerem que para um trilho desgastado em 10% de *HA* a próxima inspeção deveria ser realizada antes de se completarem 81 dias de serviço para o trilho do Fabricante A ou de 87 dias para o trilho do Fabricante B. Já se os níveis de desgaste forem de 20% *HA*, o tempo se reduz para 67 e 73 dias para os trilhos do Fabricante A e Fabricante B respectivamente. É pertinente destacar que tratam-se de valores médios já que o processo é aleatório.

A vida remanescente calculada a partir de tamanhos críticos correspondentes a diferentes temperaturas mostrou haver uma considerável diferença no tempo de crescimento estável em dias. Se por exemplo para um trilho do Fabricante A com tamanho inicial de defeito de 10% de *HA* e nível de desgaste também de 10% de *HA*, a vida remanescente é de 33 dias para o tamanho crítico referente a uma temperatura de trabalho de 15 C, para temperaturas de 12 e de 18 C são 25 e de 43 dias respectivamente. Ou, se nas mesmas condições, o trilho for do Fabricante B, a vida remanescente passa a ser de 39 dias para o tamanho crítico referente a uma temperatura de trabalho de 15 C e de 29 e 46 dias para temperaturas de 12 e de 18 C respectivamente.

Estratégias de inspeção podem ser desenvolvidas acompanhando-se o crescimento de defeitos em diferentes épocas do ano, a fim de obter, um aumento ainda maior no potencial de utilização do carro detector. Assim, em uma ferrovia como a EFC, a avaliação da influência de épocas mais chuvosas e variações na temperatura durante o ano na taxa de propagação dos defeitos, permitiria estabelecer tempos em dias para atraso ou adiantamento nos intervalos de inspeção. Nos cálculos feitos nesse trabalho é feita uma aproximação por considerar a temperatura de trabalho constante, sendo que certamente os aquecimentos e resfriamentos devem afetar o desempenho dos trilhos em serviço. Uma avaliação sobre o risco e benefício do atraso na inspeção de trilhos foi analisada por *Orringer et. al.* em *Risk/Benefit Assessment of Delayed Action Concept for Rail Inspection* [66].

O desgaste no boleto influi na vida remanescente de trilhos com defeitos transversais de forma negativa, pois conforme os resultados obtidos, quanto mais desgastado estiver o boleto, menor será o momento de inércia (o que diminui sua resistência à flexão), maior será o fator de amplificação Ma (que relaciona a área do defeito com a área do boleto), conseqüentemente menor será o tamanho crítico do defeito, e como resultado menor será a vida remanescente.

O desgaste como conseqüência natural do uso em serviço pode ser atenuado: projetando-se traçados com amplos raios de curvatura e rampas suaves a fim de diminuir a fricção do contato roda-trilho, pela prática de lubrificação controlada, e evitando descuidos, como falta de inspeção dos trilhos por longos períodos.

O efeito do nível de desgaste na diminuição da vida remanescente aumenta com o aumento do tamanho inicial do defeito. Analisando, por exemplo, se para o trilho do Fabricante A um desgaste de 23% HA , que equivale a uma redução da ordem 1 cm na altura do boleto (aproximadamente o limite de desgaste para o perfil TR-68 em ramais principais), provoca uma redução de aproximadamente 40% na vida remanescente se o tamanho inicial do defeito for de 10% de HA . Já se o tamanho do defeito inicial for de 20% de HA , a redução passa a ser em torno de 56%. Já se o trilho for do Fabricante B o mesmo desgaste na altura provoca uma redução de aproximadamente 48% na vida remanescente para o tamanho inicial do defeito for de 10% de HA e de 59% se o tamanho do defeito inicial for de 20% de HA .

As propriedades da seção requeridas para a análise das tensões fletoras no trilho foram estimadas da seção idealizada com o decréscimo de área do boleto causado pelo desgaste, utilizando o modelo de perda de altura, pois esse fornece uma estimativa mais

conservadora para o tempo de crescimento de trinca do que o modelo de perda de largura do boleto.

A análise da propagação de defeitos em trilhos desgastados assumiu que todo o desgaste ocorre previamente à formação do defeito e que não ocorre desgaste adicional enquanto o defeito se propaga até o tamanho crítico. Na prática, o desgaste ocorre simultaneamente com a propagação dos defeitos. Por isso, ao considerar um nível de desgaste elevado desde início, significa assumir uma menor resistência inicial do trilho, e ainda que na realidade depois que o defeito esteja formado e se propagando, o desgaste subsequente possa ser considerado muito pequeno, novamente o modelo proporciona uma estimativa conservadora.

Os valores referentes ao tempo remanescente correspondente aos níveis mínimos de desgaste, apresentam-se superiores aos obtidos em outro estudo, no qual foi avaliada a influência do tamanho inicial do defeito para um aço típico de trilho e uma temperatura de trabalho de -1 C [3]. Isso se deve principalmente porque nele foi utilizada uma temperatura de trabalho menor.

Essa metodologia utilizada na determinação da vida remanescente considera fixo o valor da tensão residual em função do tamanho inicial do defeito. Porém, na prática esse valor não é constante, já que com o crescimento do defeito, a tensão residual diminui acarretando o decréscimo da tensão trativa resultante (força motriz de propagação). Isso ocorre porque o defeito cresce no sentido do patim afastando-se da região sob influência da superfície encruada. Essa relação entre o tamanho do defeito e tensão residual atuante no mesmo é dada pelas Equações 11 e 12 e mostrada na Figura 60.

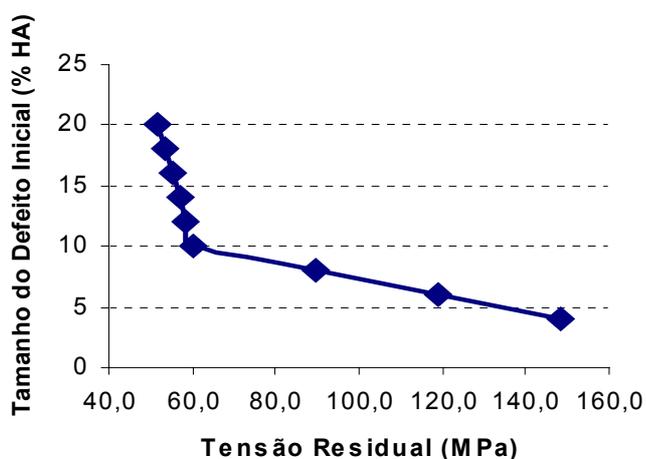


Figura 60: Efeito do tamanho do defeito na tensão residual incidente no mesmo. Essa relação foi determinada pelas Equações 11 e 12.

Na metodologia de cálculo, que foi baseada em uma ferrovia como a EFC, não foi considerado o efeito do mecanismo de “balão esmagado” pois são pequenas as chances de ocorrência de fluido preso dentro de trincas fechadas. Isso se deve ao fato de que, a água proveniente das chuvas que eventualmente fique retida nas trincas, evapora rápido devido ao forte calor decorrente das altas temperaturas da região (que costumam variar entre 18 e 30 C). Além disso, nessa ferrovia não é empregada a prática de lubrificação.

Os resultados apresentados nesse trabalho assumem que o tamanho do defeito medido no momento da detecção é igual ao tamanho de defeito verdadeiro. Dada a grande influência do tamanho do defeito inicial na vida remanescente, deve-se considerar que muitos fatores podem contribuir para variações das medidas na prática, de modo que as medidas feitas em campo podem ser maiores ou menores que o tamanho verdadeiro do defeito e com isso diminuir a exatidão do resultado.

6 CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos nesse trabalho permite concluir que:

Os materiais apresentam composição química, microestrutura perlítica e dureza no interior do boleto semelhantes, entretanto os valores de dureza na superfície de rodagem, e de tamanho de grão indicaram diferenças mais significativas. O material do Fabricante B possui uma microestrutura um pouco mais refinada, com conseqüentes maiores dureza na região do interior do boleto e tenacidade à fratura.

O tempo de crescimento estável é maior se o tamanho do defeito inicial detectado é menor, visto que maior será o número de ciclos necessários para que o mesmo atinja o tamanho crítico.

Quanto maior o nível de desgaste, menor será a vida remanescente de trilhos portadores de defeitos transversais, pois isso provoca um aumento no Ma (fator de amplificação que relaciona a área do defeito e a área do boleto), no Mg (fator que conta para o gradiente de tensão local) e na tensão fletora atuante (por modificar as propriedades da seção do trilho). Isso já era de certo modo esperado, visto que, em trilho com boleto desgastado, menor é a área para um defeito transversal se propagar.

O material do Fabricante B teve, para todas as relações de tamanhos iniciais de defeito e níveis de desgaste, uma maior estimativa de vida remanescente, devido a sua maior tenacidade à fratura (que lhe garante um maior tamanho crítico de defeito) e sua menor taxa de propagação de trincas.

Intervalos de inspeção de tolerância ao dano podem ser estabelecidos baseados nos resultados obtidos. Estratégias podem ser desenvolvidas acompanhando-se o crescimento de defeitos em diferentes épocas do ano e avaliando a influência de épocas mais chuvosas e variações na temperatura durante o ano na taxa de propagação dos defeitos. Assim, poderiam ser definidos tempos em dias para atraso ou adiantamento nos intervalos de inspeção.

Ao fixar-se o tamanho do defeito inicial na determinação da vida remanescente, obtém-se um resultado conservador, pois à medida que o defeito cresce, a tensão residual diminui e, conseqüentemente, a força motriz de propagação também vai ficando menor.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Acompanhar o crescimento de defeitos na via em diferentes épocas do ano, avaliando a influência de épocas mais chuvosas e variações na temperatura durante o ano na taxa de propagação dos defeitos. Assim, poderiam ser definidos novos tempos em dias para o atraso ou adiantamento nos intervalos de inspeção.

Avaliar os fatores que podem contribuir para variações das medidas do tamanho de defeito prévio feitas em campo, de modo a otimizar os cálculos feitos através desta metodologia e conseqüentemente a exatidão dos resultados.

Aplicar essa metodologia em outros materiais, como por exemplo aços microligados ou tratados termicamente e comparar os resultados, avaliando quais apresentam melhor desempenho.

Estudar outros tipos de defeitos através das devidas alterações nas fórmulas matemáticas, tais como estado de tensões na ponta da trinca e geometria do defeito.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 **Associação Brasileira da Indústria Ferroviária** <[http:// www.abifer.org.br](http://www.abifer.org.br)> Acesso em 12 de março de 2005.
- 2 MARAIS, J. J., MISTRY, K. C. **Rail Integrity Management by Means of Ultrasonic Testing**, Blackwell Publishing Ltd. Fatigue Fract Engng Master Struct 931-938, 2003.
- 3 JEONG, D. Y. **Damage tolerance analyses of detail fractures in rail**, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 28, p. 109-115, 1997.
- 4 CASTELLO BRANCO, J. E., FERREIRA R. **Projetos-Tipo para o Sistema Roda-Trilho em Ferrovias Heavy Haul**. p.485-97, 1994.
- 5 RICHTER, F. **Bulletin from Brisbane. Progressive Railroading**, 2001.
- 6 JEONG, D. Y., TANG, Y. H., ORRINGER O. **Estimation of Rail Wear Limits Based on Rail Strength Investigations**. DOT/FRA/ORD-98/06, 1998.
- 7 JEONG, D. Y. **Progress in Rail Integrity Research**. DOT/FRA/ORD-01/18, 2001.
- 8 ORRINGER, O. et al. **Crack Propagation Life of Detail Fractures in Rails**. Volpe National Transportation Systems Center Report No. DOT/FRA/ORD-88/13, 1988.
- 9 GIOLITO PORTO, T. **PTR 2501 – Ferrovias**. Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, 2004.
- 10 **Fascinating facts about Henry Bessemer inventor of a process for the manufacture of steel**. <<http://www.ideafinder.com/history/inventors/bessemer.htm>> Acesso em 25 de abril de 2005.
- 11 GAVIN. **Engenharia da Via Permanente – Manual de Defeitos**. CVRD 2001.
- 12 ROLDO, L. **Análise de Tensões Residuais em Trilhos Ferroviários**. Dissertação. PPGEM, UFRGS, 1998.
- 13 BRINA, H. L. **Estrada de Ferro; Via Permanente**; Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996.
- 14 MARICH S. **Major Advances in Rail Technologies Achieved in the Past 10-20 Years**; p.485-97, 1994.

-
- 15 MARICH, S., CURCIO, P. **Development of High-Strength Alloyed Rail Steels Suitable for Heavy Duty Applications**. American Society for Testing and Materials, STP 644, Rail Steels - Developments, Processing and Use, 1976.
- 16 MUTTON, P.J, MARICH, S. **Rail and Wheel Materials for High Axle Load Operations**. Proceedings Third International Heavy Haul Conference, Vancouver, 1986.
- 17 MASA HARU, U. **Bainitic Steel Improves Dark Spot Resistance**. International Railway Journal. USA, December, 1999.
- 18 KLEIN, L. B. **Estudo de Tensões em Trilhos Ferroviários**. Dissertação PPGEM, UFRGS, 1995.
- 19 FEYRABEND, M. **Estrada de Ferro - Via Permanente**. Ed. CEUE, Porto Alegre, 1970.
- 20 ORRINGER, O. **How Residual Stresses Can Affect Rail Performance**. Rail Quality and Maintenance for Modern Railway Operation, edited by J.J Kalker, et al., 1993.
- 21 FREUDENTHAL, A.M. **The Inelastic Behavior of Engineering Materials and Structures**. Jhonn Wiley & Sons, USA, 1950.
- 22 FEODOSIE, V. **Resistência dos Materiais**. Ed Mir Moscou, 1977.
- 23 BROEK, D., **The Practical Use of Fracture Mechanics**. Kluwer Academic Publishers, 1989.
- 24 GRIFFIN, K., **Surface Residual Stresses for Rail Steels and Flash-Butt**, Rail Steels Symposium Proceedings, 1992.
- 25 LIMBERGER, I. F. **Estudo da Propagação de Trincas Transversais por Fadiga em Trilhos Ferroviários**. Tese de doutorado, PPGEM, UFRGS, 2002.
- 26 CLAYTON, P., ALLERY, M.B.P. **Desgaste da Superfície de Trilhos** (tradução), Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento da Ferrovia Britânica, Derby, Inglaterra. Acervo da CVRD-EFC, São Luis, MA, 1988.
- 27 COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1974.
- 28 CARDOSO, M.P.C. **Contato Roda – Trilho**. p.235-247, 1994.
- 29 RAILTRACK, P.L.C. **Rolling Contact Fatigue in Rails** A Guide to Current Understanding and Practice, 1993.
- 30 JEONG, D.J. **Propagation Analysis of Transverse Defects Originating at the Lower Gage Corner of Rail**. DOT/FRA/ORD-98/06, 1998.
- 31 RIVES. **Tratado de Ferrocarriles I – Via**. Editora Rueda, Madrid, Espanha, 1977.

-
- 32 **American Railway Engineering and Maintenance of Way Association** <<http://www.arena.org/eseries/scriptcontent/index.cfm>> Acesso em 23 de abril de 2005.
- 33 A&K. **Railroader's Ready Reference**. A&K Railroad Materials, Salt Lake City, EUA, p. 8, 1998.
- 34 RONEY, M.D. **Maintening Optimal Wheel and Rail Performance**. Guidelines to Best Practices for Heavy Haul Railway Operations: Wheel and Rail Interface Issues, International Heavy Haul Association, Virginia, EUA, part 5, 2001.
- 35 TOURNAY, H. **Managing Rail Wheel Interaction**. Railways Africa Magazine. South Africa, 1997.
- 36 SURESH, S **Fatigue of Materials**, 2nd Ed. Cambridge University Press, UK, 1998.
- 37 COLLINS, J. **Failure of Materials in Mechanicals Design**, 2nd Ed., John Wiley & Sons, USA, 1993.
- 38 PARIS, P.C., ERDOGAN, F. **J Basis Eng. Trans. ASME**, Ser. D, 1963.
- 39 HAY, WILLIAM, W. **Railroad Engineering**. Second Edition. John Wiley & Sons. USA, 1982.
- 40 ALIAS, J. **La Voie Ferrée**. Edições Eyrolles. Paris-França, 1977.
- 41 STEELE, R.K., RUNGTA, R. e RICE, R.C. **Metallurgical Cleanliness Improves Rail Fatigue Life**. Railway Cazette International, March 1987.
- 42 SHIH, T.Y e ARAKI T. **The effects of Non-Metallic Inclusions and Microstructures on the Fatigue Crack Initiation and Propagation in High Strength Carbon Steel**. Transactions Iron Steel Institute Japanese, Vol 13, 1973.
- 43 SUGINO, KAGEYAMA e NEWELL, **Boletim AREA # 716**, vol. 89, 1988.
- 44 MARICH, S. e CURCIO, P. **Development of High-Strench Alloyed Rail Steels Suitable for Heavy Duty Applications**. Rail Steels: Developments, Processing, and Use. Special Technical Publication - STP 644. ASTM. USA, 1978.
- 45 READ, **Boletim AREA #639**, vol. 87, 1986 .
- 46 KALOUSEK, J., BETHUNE, E. **Rail Wear Under Heavy Traffic Conditions**. Rail Steels: Developments, Processing, and Use. Special Technical Publication - STP 644. ASTM. USA, 1978.
- 47 RICHARDS, C.E. e LINDLEY T.C. **Eng. Fract. Mech.** 1972.
- 48 CALLISTER, W.D.Jr. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**, Department of Metallurgical Engineering The University of Utah, Quinta edição.

-
- 49 CLAYTON, P., TANG Y.H. **Detail Fracture Growth in Curved Track at the Facility for Accelerated Service Testing**. Residual Stresses in Rails, Vol. 1, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992.
- 50 JOURNET, B.G., R.M. PELLOUX. **A Direct Method for Laboratory Specimen Crack Growth** Theoretical and Applied Fracture Mechanics 7, 1987.
- 51 JABLONSKI, D., Y.H. TANG, e R.M. PELLOUX. **Simulation of Railroad Crack Growth Life using Laboratory Specimens** Theoretical and Applied Fracture Mechanics 14, 1990.
- 52 TIMOSHENKO, A., LANGER, B. F., **Stresses in Railroad Track**, ASME Trans. 54 1932.
- 53 ELBER, W. **Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension**, Engineering Fracture Mechanics 2, 1970.
- 54 ELBER, W. **The Significance of Fatigue Crack Closure**, Damage Tolerance of Aircraft Structures, ASTM STP 486, American Society for Testing and Materials, 1971.
- 55 JEONG, D.Y., SIH. G.C. **Evaluation of Elber's Crack Closure Model as an Explanation of Train Load Sequence Effects on Crack Growth Rates**, Final Report, DOT/FRA/ORD-90/06. 1990.
- 56 SIH, G.C., JEONG, D.Y. **Effect of Load Sequence on Fatigue Life of Rail Steel** Residual Stresses in Rails, Vol. 2, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992.
- 57 JABLONSKI, D.A., PELLOUX, R.M. **Effect of Train Load Spectra on Crack Growth in Rail** Residual Stresses in Rails, Vol. 1, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1992.
- 58 HETENYI, M. **Beams on Elastic Foundation**, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1983.
- 59 ORRINGER, O. **Detail Fracture Growth in Rails: Test Results**, 1986.
- 60 GROEHS, A. G. **Resistência dos Materiais e Vasos de Pressão**. Cap 10, Editora Unisinos, 2002.
- 61 TADA, H., PARIS, P. e IRWIN, G. **The Stress Analysis of Cracks Handbook**. 2nd edition, Paris Productions, 1985.
- 62 ROOKE, D.P., e CARTWRIGHT, D.J. **Compendium of Stress Intensity Factors**. United Kingdom: HM Stationery Office, 1976.
- 63 SHAH, R.C., KOBAYASHI, A.S. **Stress Intensity Factor for an Elliptical Crack under Arbitrary Normal Loading** in Engineering Fracture Mechanics 3:71-96, 1971.

64 EUROPEAN STANDARD prEN 13674-1 (Draft). **Railway Applications – Track – Rail – Part 1: Flat Bottom Symmetrical Railway Rails 46 kg/m and above**, pp.1-108, 1999.

65 ASTM STANDARD E399-90. **Standard Method for Plain-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials**, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, pp.413-443, 1998.

66 ORRINGER O. **Risk/Benefit Assessment of Delayed Action Concept for Rail Inspection**. DOT/FRA/ORD-99/03, 1999.

APÊNDICE A: Integração da Equação de Crescimento de Defeito.

A relação entre a taxa de crescimento do defeito e o fator de intensidade de tensões é assumida como tendo a seguinte forma matemática:

$$\frac{da}{dN} := C \cdot \frac{\Delta K^P}{(1-R)^Q} \quad (\text{Eq. A1})$$

Onde C, P e Q são constantes que dependem do material.

A variação do fator de intensidade de tensões é assumida como tendo a seguinte forma matemática:

$$\Delta K := \Delta \sigma \cdot G \cdot \sqrt{a} \quad (\text{Eq. A2})$$

Onde a é o comprimento característico do defeito.

Combinando as Equações A1 e A2 e tratando o resultado como uma equação diferencial de variáveis separáveis, tem-se:

$$dN := \frac{1}{C} \cdot \left[\frac{(1-R)^Q}{\Delta \sigma^P} \right] \cdot \frac{da}{(G \cdot \sqrt{a})^P} \quad (\text{Eq. A3})$$

Onde G é o fator geométrico que depende do tamanho do defeito e é dado por:

$$G := \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot M_a \cdot M_s \quad (\text{Eq. A4})$$

Agora, introduzindo a nova variável A , que é o tamanho do defeito em porcentagem de área do boleto (%HA). Essa variável é relacionada com a , o semi-eixo maior da elipse que representa o defeito por:

$$A := \frac{\pi \cdot a^2}{Ah} \cdot 100 \quad (\text{Eq. A5})$$

Onde Ah é a área da seção transversal do boleto, do qual:

$$a := \sqrt{\frac{Ah \cdot A}{\pi \cdot 100}} \quad (\text{Eq. A6})$$

Diferenciando a Equação A5:

$$da := \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{Ah}{100 \cdot \pi}} \cdot \frac{dA}{\sqrt{A}} \quad (\text{Eq. A7})$$

Aplicando a corrente regra de cálculos, o número de ciclos para um defeito crescer de um tamanho inicial para um tamanho maior pode ser calculado usando-se:

$$N := \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{C} \cdot \left(\frac{Ah}{100 \cdot \pi} \right)^{\left(\frac{1-P}{2} \right)} \cdot \int_{Ai}^{Af} \frac{(1-R)^Q}{\Delta \sigma^P} \cdot \frac{1}{(G \cdot \sqrt{A})^P \cdot \sqrt{A}} dA \quad (\text{Eq. A8})$$

Onde Ai é o tamanho do defeito inicial e Af é o tamanho final do defeito. Essa equação é aplicada para ciclos de tensões com amplitude constante e pode ser modificada por amplitudes variáveis de carregamento.

Convertendo o número de ciclos em dias de tempo de crescimento seguro em função da tonelage carregada sobre os trilhos por dia. Assim, o tempo de crescimento seguro pode ser calculado por:

$$\text{Dias(T)} := \left[\frac{CP}{TD} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{Ah}{100 \cdot \pi} \right)^{\left(\frac{1-P}{2} \right)} \right] \cdot \int_{Ai}^{Af} \frac{1}{C \cdot \sum_{i=1}^5 \frac{\Delta \sigma^P}{(1-R)^Q} \cdot (G \cdot \sqrt{A})^P \cdot \sqrt{A}} dA \quad (\text{Eq. A9})$$

Onde CP é o carregamento resultante da passagem de quatro eixos que provocam os cinco ciclos de carregamento, TD se refere à tonelage bruta diária.

APÊNDICE B: Equações para as Propriedades da Seção de Trilho Desgastado:

Para um trilho desgastado com perda em altura do boleto, os momentos de inércia usados no cálculo da flexão vertical e lateral são determinados pelo decréscimo da altura na mesma porcentagem da área do boleto desgastada. Os momentos de inércia vertical e lateral do boleto em função do desgaste são definidos respectivamente por:

$$I_{yyHd} := \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{100 - X}{100} \cdot h_{eq} \right)^3 \cdot w_{eq} \quad (\text{Eq. B1})$$

$$I_{zzHd} := \frac{1}{12} \cdot \left[\left(\frac{100 - X}{100} \right) \cdot h_{eq} \right] \cdot w_{eq}^3 \quad (\text{Eq. B2})$$

Onde h_{eq} é a altura equivalente do boleto, w_{eq} é a largura equivalente do boleto, e X é a variável que quantifica o desgaste em termos de porcentagem da área do boleto. h_{eq} e w_{eq} são definidos por:

$$h_{eq} := \sqrt[8]{\frac{144 \cdot I_{yyHo}^3}{I_{zzHo}}} \quad (\text{Eq. B3})$$

$$w_{eq} := \sqrt[8]{\frac{144 \cdot I_{zzHo}^3}{I_{yyHo}}} \quad (\text{Eq. B4})$$

A derivação da equação para calcular o momento de inércia vertical para o trilho desgastado inteiro é detalhadamente descrita por Jeong e outros em “*Propagation Analysis of Transverse Defects Originating at the Lower Gage Corner of Rail*”.

$$I_{yyd} := I_{yyo} + Ar \cdot (z_{no} - z_{nx})^2 - \frac{1}{12} \cdot \left(\frac{X}{100} \cdot h_{eq} \right)^3 \cdot w_{eq} - \left[\left(\frac{X}{100} \cdot h_{eq} \right) \cdot w_{eq} \right] \cdot \left[h_{tot} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{X}{100} \cdot h_{eq} \right) - z_{nx} \right]^2 \quad (\text{Eq. B5})$$

Onde I_{yyo} é o momento vertical de inércia de um trilho novo inteiro, h_{tot} é a altura total de um trilho novo, Ar é a área da seção transversal de um trilho novo, z_{no} se refere à localização do centróide do trilho novo, e z_{nx} é a localização do centróide do trilho desgastado. O momento de inércia lateral para um trilho inteiro desgastado é calculado por:

$$I_{zzd} := I_{zzHd} + I_{zzW} + I_{zzB} \quad (\text{Eq. B6})$$

Onde I_{zzW} e I_{zzB} são os momentos de inércia da alma e do patim respectivamente.

Para um trilho com perda na altura do boleto, o centróide do boleto e o centróide do trilho inteiro estão localizados ao longo da linha central vertical do trilho. A distância vertical do de baixo de um trilho desgastado até o centróide do boleto é estimada por:

$$z_{hx} := z_{ho} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{X}{100} \cdot h_{eq} \right) \quad (\text{Eq. B7})$$

A distância de baixo do trilho ao centróide do trilho inteiro desgastado é:

$$z_{nx} := \frac{A_r \cdot z_{no} - A_h \cdot z_{ho} + \left[\left(1 - \frac{X}{100} \right) \cdot A_h \right] \cdot z_{hx}}{A_b + A_w + \left[\left(1 - \frac{X}{100} \right) \cdot A_h \right]} \quad (\text{Eq. B8})$$

Onde A_b é a área da seção transversal do patim, A_w é a área da seção transversal da alma, A_h é a área da seção transversal do boleto de um trilho novo.

APÊNDICE C: Fator de Amplificação do Gradiente de Tensões.

A fórmula para o fator de intensidade de tensões associada com o aspecto elíptico da razão b/a da falha em um campo fletor de tensão com a localização do centro da falha (y,z) pode ser expresso por:

$$K_{i\theta} := \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \cdot M_{\theta} \quad (\text{Eq. C1})$$

Onde σ é o campo de tensões e $M(\theta)$ é função do ângulo da trinca e é dado por:

$$M_{\theta} := \frac{M_{v\theta} + \frac{y}{z} \cdot \frac{\beta_v}{\beta_l} \cdot \frac{I_{yyx}}{I_{zzx}} \cdot \frac{L}{V} \cdot M_{l\theta}}{1 + \frac{y}{z} \cdot \frac{\beta_v}{\beta_l} \cdot \frac{I_{yyx}}{I_{zzx}} \cdot \frac{L}{V}} \quad (\text{Eq. C2})$$

Onde

$$M_{v\theta} := 1 + \frac{\left(\frac{b}{z}\right) \cdot k^2 \cdot E_{ik} \sin(\theta)}{\left(1 + k^2\right) \cdot E_{ik} + \left(1 - k^2\right) \cdot E_{iik}} \quad (\text{Eq. C3})$$

e

$$M_{l\theta} := 1 + \frac{\left(\frac{a}{y}\right) \cdot k^2 \cdot E_{ik} \cos(\theta)}{\left[\left(1 - 2 \cdot k^2\right) \cdot E_{ik} - \left(1 - k^2\right) \cdot E_{iik}\right]} \quad (\text{Eq. C4})$$

onde $k := \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ E_I e E_{II} são as integrais de primeira e segunda ordem da elipse definidas por:

$$E_{ik} := \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\phi)} \, d\phi \quad E_{iik} := \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\phi)}} \, d\phi \quad (\text{Eqs. C5})$$

A dependência do fator de intensidade tensões com a posição ao longo da frente da trinca pode ser eliminada pelo cálculo de um simples valor médio. O fator de amplificação do gradiente de tensões é definido matematicamente por:

$$Mg := \left[\frac{\int_0^{2\cdot\pi} M\theta^p \cdot \rho d\theta}{\int_0^{2\cdot\pi} \rho d\theta} \right]^{\frac{1}{p}} \quad (\text{Eq. C6})$$

Onde

$$\rho := \frac{b}{\sqrt{\sin(\theta) \cdot \sin(\theta) + \left(\frac{b}{a}\right) \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\theta)}} \quad (\text{Eq. C7})$$

APÊNDICE D: Memorial de Cálculo para o Caso do Trilho Fabricante A onde o Tamanho do Defeito Inicial é de 20 % de HA e Nível de Desgaste de 20 % de HA.

Propriedades:

$$P := 4.31 \quad C := 1 \cdot 10^{-11} \quad Q := 1.63 \quad K_{ic} := 37.12 \quad E := 3 \cdot 10^7 \quad X := 20 \quad A_i := 20$$

$$h_{tot} := 7.313 \quad A_r := 13.35 \quad I_{z0} := 14.5$$

$$z_{ho} := 6.39 \quad A_h := 4.86 \quad I_{yyHo} := 1.17 \quad w_h := 2.9375 \quad A_b := 4.87 \quad I_{zB} := 11.2$$

$$z_{no} := 3.35 \quad A_w := 3.62 \quad I_{zHo} := 3.03 \quad z_b := 0.435 \quad I_{yyo} := 94.9 \quad I_{zW} := 0.27$$

Cálculo do momento de Inércia para o Trilho desgastado:

$$h_{eq} = 1.719 \quad w_{eq} = 2.766 \quad z_{hx} = 6.218 \quad z_{nx} = 3.057 \quad I_{yyHd} = 0.599 \quad I_{zHd} = 2.424$$

$$I_{yyd} = 80.179 \quad \Delta h = 0.344$$

$$M_s := 0.984 \quad y = 0.734 \quad z_{star} = 0.901 \quad a := \sqrt{\frac{A_h \cdot A_i}{\pi \cdot 100}} \quad A := \pi \cdot a^2 \quad A = 0.972$$

$$M_a = 1.358 \quad h_{totx} := h_{tot} - \Delta h \quad z_{mod} := h_{totx} - z_{nx} - z_{star} \quad z_{mod} = 3.011$$

Tensão Residual:

$$\sigma := (10 - 0.125 \cdot A_i) \quad \sigma_r = 7.5 \quad \sigma_{MPa} := \sigma \cdot 6.894 \quad \sigma_{MPa} = 51.705$$

Tensão Térmica:

$$T_n := 82.4 \quad \alpha := 6.5 \cdot 10^{-6}$$

$$T := 59 \quad E := 30 \cdot 10^6 \quad \sigma_t = 4.563 \quad \sigma_{tMPa} := \sigma_t \cdot 6.894 \quad \sigma_{tMPa} = 31.457$$

Constante das Vigas Sobre Base Elástica:

$$\beta_v := \sqrt[4]{\frac{k_v}{4 \cdot E \cdot I_{yyx}}} \quad k_v := 3000 \quad \beta_v = 0.024 \quad \beta_l := \sqrt[4]{\frac{k_l}{4 \cdot E \cdot I_{zzx}}} \quad k_l := 0.85 \cdot k_v \quad \beta_l = 0.035$$

Cálculo dos pontos de Tensão Fletora Máxima (Trativa):

$$x_1 := 70 \quad x_4 := 35 \quad x_7 := 42$$

$$x_2 := 140 \quad x_5 := 120 \quad x_8 := 112$$

$$x_3 := 225 \quad x_6 := 190$$

$$V = 3.3 \cdot 10^4$$

$$veloc := \frac{65}{1.6} \quad Diam := 32 \quad DLF := 1 + 33 \cdot \frac{veloc}{100 \cdot Diam} \quad DLF = 1.419$$

$$V_{cr} := V \cdot DLF \quad V_{cr} = 4.683 \cdot 10^4 \quad L_{cr} := V_{cr} \cdot 0.5 \quad L_{crit} := 0.5 \cdot V_{crit} \quad L_{crit} = 2.341 \cdot 10^4$$

$$\begin{aligned} \sigma_{b1} &:= \sigma_{v1} + \sigma_{l1} & \sigma_{b4} &:= \sigma_{v4} + \sigma_{l4} \\ \sigma_{b2} &:= \sigma_{v2} + \sigma_{l2} & \sigma_{b5} &:= \sigma_{v5} + \sigma_{l5} & \sigma_{b7} &:= \sigma_{v7} + \sigma_{l7} & \sigma_{b7crit} &:= \sigma_{v7crit} + \sigma_{l7crit} \\ \sigma_{b3} &:= \sigma_{v3} + \sigma_{l3} & \sigma_{b6} &:= \sigma_{v6} + \sigma_{l6} & \sigma_{b8} &:= \sigma_{v8} + \sigma_{l8} & \sigma_{b8crit} &:= \sigma_{v8crit} + \sigma_{l8crit} \\ \sigma_{b1} &= 2.782 & \sigma_{b4} &= 0.448 & & & & \\ \sigma_{b2} &= 0.388 & \sigma_{b5} &= 0.962 & \sigma_{b7} &= 1.54 & & \\ \sigma_{b3} &= -0.089 & \sigma_{b6} &= -0.111 & \sigma_{b8} &= 1.259 & \sigma_{bpt3cr} &:= 2 \cdot \sigma_{b7crit} + 2 \cdot \sigma_{b8crit} & \sigma_{bpt3cr} &= \\ \sigma_{bpt1} &:= \sigma_{b1} + \sigma_{b2} + \sigma_{b3} & & & & & & \\ \sigma_{bpt2} &:= 2 \cdot \sigma_{b4} + \sigma_{b5} + \sigma_{b6} & & & & & & \\ \sigma_{bpt3} &:= 2 \cdot \sigma_{b7} + 2 \cdot \sigma_{b8} & \sigma_{bpt1} &= 3.08 & \sigma_{bpt2} &= 1.746 & \sigma_{bpt3} &= 5.599 \\ \sigma_{bmed} &:= \frac{2 \cdot \sigma_{bpt1} + 2 \cdot \sigma_{bpt2} + \sigma_{bpt3}}{5} & \sigma_{bmed} &= 3.05 \end{aligned}$$

Cálculo dos pontos de Tensão Fletora Mínima (Compressiva):

$$\begin{aligned} x_1 &:= 70 & x_4 &:= 35 & x_{min1} &:= 0 & x_{min4} &:= 225 \\ x_2 &:= 140 & x_5 &:= 120 & x_7 &:= 42 & x_{min2} &:= 70 & x_{min5} &:= 85 \\ x_3 &:= 225 & x_6 &:= 190 & x_8 &:= 112 & x_{min3} &:= 155 \\ \sigma_{bminpto1} &:= \sigma_{bmin1} + \sigma_{bmin2} + \sigma_{bmin3} + \sigma_{bmin4} \\ \sigma_{bminpto2} &:= \sigma_{bmin2} + \sigma_{bmin1} + \sigma_{bmin5} + \sigma_{bmin3} & \sigma_{bminpto1} &= -10.917 & \sigma_{bminpto2} &= -8.453 \\ \sigma_{bminmed} &:= \frac{(2 \cdot \sigma_{bminpto1} + 2 \cdot \sigma_{bminpto2})}{4} & \sigma_{bminmed} &= -9.685 \end{aligned}$$

Amplificação das Tensões:

$$M_g = 1.087$$

Tamanho Crítico:

$$a_{cr} = 0.679 \quad A_f = 29.77$$

Tempo de Crescimento Seguro:

$$\sigma_{max} := \sigma + \sigma + DLF \cdot M_g \cdot \sigma_{bmed} \quad \sigma_{max} = 16.768$$

$$\sigma_{min} := \sigma + \sigma + DLF \cdot M_g \cdot \sigma_{bminmed} \quad \sigma_{min} = -2.874$$

como a tensão mínima nesse caso é negativa, então: $\Delta\sigma := \sigma_{max}$ e $R := 0$

$$CP := 132 \quad TD := 178000 \quad G = 1.508 \quad \text{Dias}(T) = 4.658$$