



AValiação FRATURAMECÂNICA DE DEFEITOS CRÍTICOS EM DISCOS DE RODAS FERROVIÁRIAS

Cláudio Buchholz Ferreira Filho¹; Auteliano Antunes dos Santos Júnior²

¹MRS Logística SA — Brasil

²Universidade Estadual de Campinas — Brasil

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de integrar resultados experimentais de sanidade metalúrgica, propriedades mecânicas (ensaio de tração e impacto *Charpy*), tenacidade à fratura (K_{IC} e J_{IC}) e evidências de campo com a Mecânica da Fratura Linear Elástica (*LEFM*) para quantificar a geometria do defeito crítico em discos de rodas ferroviárias de alta carga. A interação entre K_{IC} , a tensão efetiva (operacional + residual de fabricação) e o fator geométrico Y delimita o tamanho crítico de trinca a_c e a tolerância a inclusões e vazios, com validação por Análise por Elementos Finitos (*FEA*) das zonas de máxima tração radial. A metodologia integrou sanidade metalúrgica, tração, *Charpy* e K_{IC} em corpos de prova retirados do disco segundo a *European Standard (EN) 13262* e *American Society for Testing and Materials (ASTM) E399*, correlacionando com *FEA (S-660/S-669/EN 13979-1)* para localizar zonas críticas e estimar a_c . Os resultados mostram que macro e microinclusões e ductilidade/tenacidade reduzidas no disco diminuem a tolerância a defeitos, especialmente em cenários com incrementos térmicos de 40–60 MPa. Por fim, são propostos limites objetivos para o disco, incluindo sanidade metalúrgica (média e pior campo), ductilidade mínima e K_{IC} mínimo, que são coerentes com as regiões críticas apontadas por *FEA* e com a recorrência de falhas nucleadas entre 200 e 220 mm do centro. Esses limites visam elevar a robustez de projeto da roda e mitigar o risco de fratura catastrófica em regime de alta carga.

Palavras-chave: Rodas ferroviárias, Disco, Mecânica da fratura linear elástica (*LEFM*), Tenacidade à fratura (K_{IC}), Tensões residuais, Análise por Elementos Finitos (*FEA*).

1. INTRODUÇÃO

A trinca (Figura 1) e a consequente fratura súbita de discos de rodas ferroviárias em aplicações de alta carga permanecem eventos de alto risco. São associadas à combinação de grandes cargas, gradientes térmicos severos de frenagem e históricos de sanidade metalúrgica heterogênea. Eventos recentes (MRS, 2025) indicam falhas recorrentes no disco em rodas fundidas, com nucleação próxima ao cubo, coincidindo com regiões críticas de tração radial previstas por *FEA* e agravadas por tensões residuais de fabricação.

Além de inclusões e vazios, a literatura descreve *bifilms* (duplas películas de óxidos não unidas) como trincas pré-existentes oriundas da consolidação e da fusão do metal. Esses defeitos podem atuar como precursores *Griffith* (descontinuidade microscópica pré-existente que atua como concentrador de tensões), favorecendo nucleação e propagação de trincas e ingresso de meios corrosivos quando afloram à superfície. Tal quadro dá suporte à ênfase deste trabalho em sanidade metalúrgica, elevação de K_{IC} e controle de σ e Y para ampliar a tolerância a defeitos a_c (Campbell, 2016).

Este trabalho relaciona resultados experimentais e Mecânica da Fratura Linear Elástica (*LEFM*) para definir geometrias de defeito crítico e tolerância a danos, subsidiando limites práticos (sanidade, ductilidade, K_{IC}) e decisões de projeto, fabricação,

homologação e manutenção, em alinhamento com a norma *EN 13979-1* para verificação termomecânica e mecânica do disco. Assim, o trabalho tem como objetivo integrar resultados experimentais de sanidade metalúrgica, propriedades mecânicas (ensaio de tração e impacto *Charpy*), tenacidade à fratura (K_{IC} e J_{IC}) e evidências de campo com a *LEFM* para quantificar a geometria do defeito crítico em discos de rodas ferroviárias de alta carga.

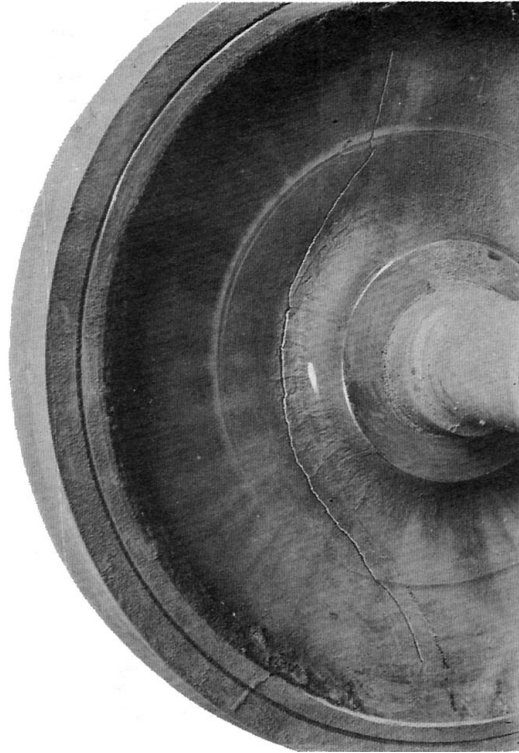


Figura 1. Trinca em disco de roda ferroviária. Fonte: AAR (2015).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fundamentação Teórica

A Mecânica da Fratura Linear Elástica (*LEFM*) é baseada nos seguintes modos de abertura da trinca: Modo I (abertura/tração), Modo II (cisalhamento no plano) e Modo III (cisalhamento fora do plano). A condição de fratura frágil em Modo I é dada pela Equação (1), em que K_{IC} é a tenacidade à fratura em regime de deformação plana. O campo de tensões junto à ponta da trinca é caracterizado pelo Fator de Intensidade de Tensões (K_I). A fratura em modo I ocorre quando o fator de intensidade de tensões na ponta da trinca, K_I , atinge a tenacidade à fratura do material, K_{IC} :

$$K_I \geq K_{IC} \quad (1)$$

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2) Y é o fator geométrico adimensional (função de forma e posição da trinca e do componente), σ a tensão atuante nominal efetiva (incluindo as parcelas



operacional e residual de fabricação) e a o semi-comprimento ou profundidade efetiva do defeito (conforme a idealização geométrica).

A partir das equações anteriores, o tamanho crítico de trinca a_c pode ser calculado por:

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{IC}}{Y\sigma} \right)^2 \quad (3)$$

A Equação (3) evidencia que aumentar K_{IC} e/ou reduzir σ eleva a tolerância a defeitos. Assim, maior K_{IC} e/ou menor σ elevam tal tolerância, aumentando a janela segura para inspeção e detecção. A Equação (3) estima o tamanho crítico à ruptura instável para discos em regiões críticas de tração radial e valida limites propostos de K_{IC} e ductilidade.

Na prática industrial, *bifilms* podem elevar o Y efetivo local e/ou fornecer um tamanho de início de trinca a_0 não desprezável, reduzindo a_c . Assim, mitigar esses defeitos de origem de processo é coerente com a estratégia de aumentar K_{IC} e reduzir σ para ampliar a janela segura de inspeção.

Os critérios de validade de K_{IC} em regime *LEFM* (*ASTM E399*) impõem requisitos de espessura, ligamento remanescente (região íntegra de material à frente da ponta da trinca) e tamanho de trinca, além da condição de pequena plasticidade (*small-scale yielding*). Quando tais critérios não se cumprem, a resistência à fratura deve ser caracterizada em regime elasto-plástico (*EPFM*), segundo a *ASTM E1820*, via J-integral, utilizando curva J-R e parâmetros J_{IC} (tenacidade à fratura no início da extensão estável da trinca) ou J_c (condição crítica associada à instabilidade da fratura), conforme aplicável.

Em rodas ferroviárias, materiais forjados tendem a apresentar maior capacidade de propagação estável de trincas (maior J_{IC}), ao passo que materiais fundidos frequentemente favorecem a propagação instável, resultando em tenacidade efetiva inferior, condição comumente associada à presença de inclusões e à heterogeneidade microestrutural (Tarafder, 2007).

Neste trabalho, adotaram-se as hipóteses usuais de *LEFM*: estado plano de deformação, trinca semi-elíptica superficial e carregamento predominantemente de tração.

2.2. Fator Geométrico Y

Para trincas semi-elípticas superficiais em placas de espessura finita sob tração e/ou flexão, empregam-se as soluções de Newman–Raju (Newman, 1981) para estimar o fator geométrico Y em função das razões a/c (razão entre profundidade da trinca e comprimento da trinca) e a/t (razão entre a profundidade da trinca e a espessura da placa). Considerando as morfologias observadas no disco (macroinclusões e vazios alongados) e os gradientes de tração radial, adota-se, para a estimativa inicial de a_c , um intervalo conservador de Y entre 1,2–1,4, com posterior refinamento local por *FEA* quando necessário. O fator geométrico Y efetivo depende da forma e da posição da descontinuidade e do campo de tensões local. Esse intervalo mostrou-se coerente com as morfologias identificadas por Microscopia Eletrônica de Varredura com Espectroscopia por Dispersão de Energia (*MEV-EDX*) (*ASM*, 1992) e com a localização típica das trincas no lado da bandagem, entre 200 e 220 mm do centro.

2.3. Comparativo de Trincas em Rodas Fundidas e Forjadas

No crescimento por fadiga de trincas, o parâmetro dirigente é a variação do fator de intensidade de tensões no ciclo:



$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (4)$$

onde K é o fator de intensidade de tensões na ponta da trinca (unidade: $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$).

Ensaio reportados por Tarafder et al. (2007) e Liu et al. (2007) mostram que rodas fundidas e forjadas apresentam comportamentos distintos de fechamento e resistência intrínseca, com maior suscetibilidade à instabilidade nas fundidas devido à sanidade metalúrgica inferior. Quando a qualificação de K_{IC} pela *ASTM E399* não foi possível, adotou-se EPFM. Nestas condições, amostras de rodas forjadas apresentaram J_{IC} da ordem de 140 kJ/m^2 , enquanto amostras de rodas fundidas ficaram entre $25\text{--}60 \text{ kJ/m}^2$, evidenciando menor resistência à extensão estável de trinca (menor *tearing resistance*). As superfícies de fratura corroboram essa diferença, pois rodas fundidas exibem fratura predominantemente frágil, como dito anteriormente, com marcas em *Chevron* (padrões macroscópicos em forma de “V” na superfície de fratura de materiais frágeis ou na fase final de ruptura de fadiga). Por sua vez, rodas forjadas mostram maior ductilidade e resistência à extensão estável de trinca.

Do ponto de vista metalúrgico, *bifilms* formados durante o vazamento de rodas fundidas, em decorrência da turbulência e da oxidação do metal líquido, podem permanecer no material sólido como interfaces não unidas, equivalentes a trincas pré-existentes. Esses defeitos internos podem ser posteriormente ativados ou intensificados, por exemplo, pela ação do hidrogênio dissolvido no aço, favorecendo sua abertura e aumento efetivo. Como consequência, ocorre uma redução da tenacidade efetiva à fratura, em coerência com a maior propensão à instabilidade da propagação de trincas observada em rodas fundidas (Campbell, 2016).

2.4. Metodologia

Foram analisadas 12 rodas ferroviárias (Tabela 1), distribuídas em três grupos: 4 rodas com falha no disco (fundidas), 4 rodas testemunhas íntegras dos mesmos rodeiros e 4 rodas novas (forjadas). Foi executado um pacote de ensaios padronizados composto por: sanidade metalúrgica (contagem de inclusões e vazios $\geq 2,5 \mu\text{m}$), resistência ao escoamento (σ_Y), resistência à ruptura (σ_U), alongamento ($A_{5\%}$), redução de área (RA), tenacidade à fratura K_{IC} segundo *ASTM E399* com corpo C(T), impacto *Charpy* (*ASTM E23*), micrografia *MEV-EDX* e mapeamentos de dureza (dureza Brinell – HB; Rockwell C – HRC).

Tabela 1. Relação de rodas analisadas. Fonte: Buchholz (2025).

Roda AAR	Tipo	Aplicação	Classe	Fabricação	Condição da roda			
					Falha	Testemunha	Íntegra	Nova
K-36	Forjada	Vagão	D	2024	-	-	-	2
CK-36	Fundida	Vagão	D	2010	1	1	-	-
CK-36	Fundida	Vagão	D	2014	-	-	1	-
D-38	Forjada	Vagão	D	2024	-	-	-	1
CD-38	Fundida	Vagão	D	2014	3	2	-	-
D-42	Forjada	Locomotiva	C	2024	-	-	-	1

Os corpos de prova do disco foram extraídos equidistantes das faces e a $55 \pm 10 \text{ mm}$ medidos radialmente a partir do limite externo do cubo, com orientações e procedimentos estabelecidos em *EN 13262* e *ASTM E399*, de modo a representar os modos reais de sollicitação do disco.



Paralelamente, a análise por elementos finitos (*FEA*) foi empregada para localizar zonas críticas de tração no disco (perfis S e parabólico) e avaliar a evolução das tensões residuais durante frenagens. Em rodas com perfil S, estimaram-se trações residuais radiais de fabricação de aproximadamente 320 MPa a 90 mm (lado bandagem) e 280 MPa a 200 mm (lado flange), com incrementos após frenagem severa, valores compatíveis com a literatura (Seo, 2009) sobre o efeito de tensões residuais e geometria do disco.

A Figura 2 apresenta o local de retirada dos corpos de prova para teste de sanidade metalúrgica, K_{IC} e impacto (região em azul). A Figura 3 apresenta o resultado do cálculo por *FEA* para as tensões referentes a um carregamento em curva.

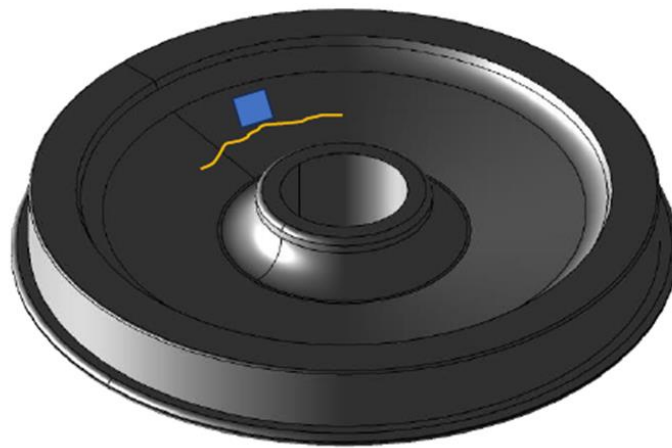


Figura 2. Local do corpo de prova, sanidade, K_{IC} e impacto. Fonte: Minicucci (2024).

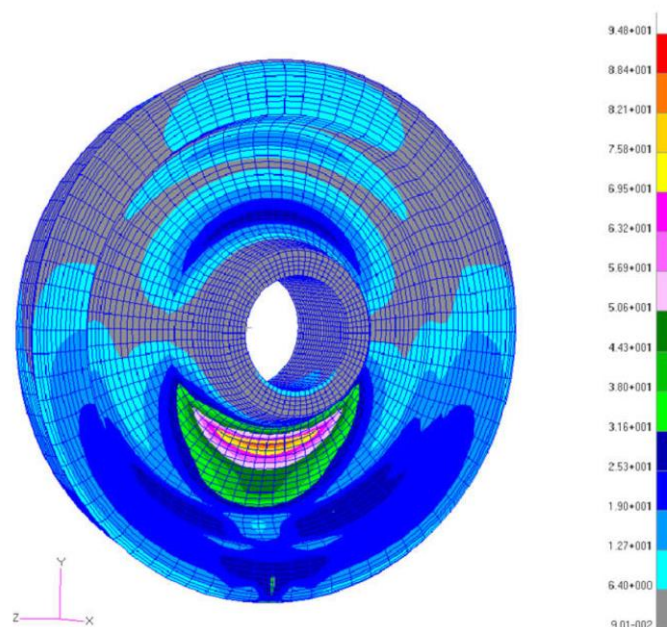


Figura 3. Análise de tensão (MPa) por *FEA* para carregamento em curva. Fonte: Seo (2009).

Para consistência com projeto/*FEA* e verificação de fadiga, adotaram-se as referências *AAR M-107/M-208*, *EN 13262*, *EN 13979-1* e diretrizes *AAR S-660/S-669*. Os resultados

foram comparados entre grupos e confrontados com limites propostos específicos para o disco, não contemplados explicitamente em AAR M-107/M-208.

2.5. Aplicações Práticas

Para o dimensionamento por tamanho crítico estima-se a_c nas regiões críticas de tração radial máxima (Y entre 1,2–1,4) usando σ efetiva (operacional + residual de fabricação). Com boas condições de sanidade metalúrgica e K_{IC} maiores tem-se a_c maior e janela de inspeção ampliada, o que é desejável.

2.6. Eventos Ferroviários

Falhas em disco podem evoluir rapidamente para uma fratura catastrófica, com elevado potencial de descarrilamento. A inspeção visual, por si só, costuma ser insuficiente. A identificação adequada requer ensaios não destrutivos (END), como partículas magnéticas e correntes parasitas (*eddy current*), para revelar descontinuidades não aparentes.

O relatório *Wheel Failure Investigation Program – Phase I* da *Federal Railroad Administration (FRA)* consolida evidências de campo e análises experimentais sobre mecanismos de nucleação e propagação de trincas em rodas ferroviárias de alta carga, incluindo eventos envolvendo o disco (Figura 4).



Figura 4. Trinca em disco. Fonte: Dick (2021).

A *FRA* destaca que rodas em serviço desenvolvem trações residuais subsuperficiais significativas, resultantes da deformação plástica por contato roda-trilho, impactos e ciclos térmicos de frenagem. Eventos térmicos severos podem redistribuir essas tensões, ampliando zonas de tração no disco e favorecendo a transição de trincas horizontais (Modo II) para propagação instável em Modo I, quando $K_I \geq K_{IC}$. Essas observações reforçam a abordagem deste trabalho, que correlaciona K_{IC} , tensão efetiva e fator geométrico Y na definição do defeito crítico no disco a_c .

Os registros históricos da *AAR* (Carter, 1974) mostram a dimensão do problema e o efeito das contramedidas ao longo do tempo: entre 1968 e 1972, fraturas ou trincas em disco chegaram a representar cerca de 24% dos eventos reportados. Já no período 1969–1971 ocorreram aproximadamente 100 acidentes/ano relacionados a rodas. Em contrapartida, a resposta normativa e de processo reduziu drasticamente o risco. Com a padronização moderna estabelecida pela *AAR M-107/M-208*, os acidentes por rodas caíram de cerca de 150/ano para 8/ano em 1994, num universo de 9,5 milhões de rodas em serviço, aproximadamente.

Evidências recentes em operações de alta carga (MRS, 2025) reforçam essa leitura, pois na década de 2020 foram documentados 14 eventos graves com nucleação típica entre 200 e 220 mm do centro do disco (Figura 5), exatamente a faixa crítica prevista por *FEA*,

e com correlação a sanidade metalúrgica inferior (macro ou microinclusões) e tenacidade à fratura (K_{IC}) reduzida.

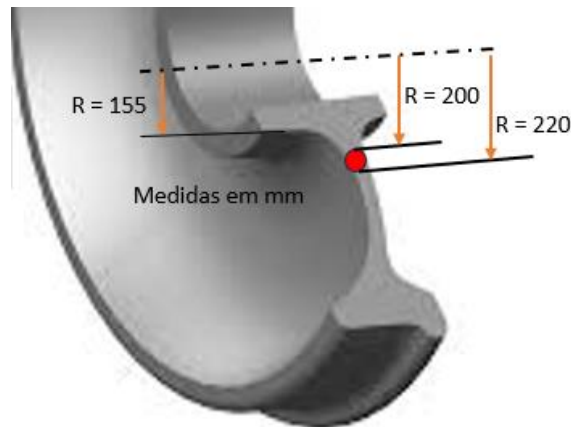


Figura 5. Região típica de ocorrência das falhas no disco. Fonte: Minicucci (2024).

Tanto o histórico setorial quanto as evidências de campo sustentam a adoção dos limites propostos para o disco: sanidade (média e pior campo), $A_{5\%}$, RA, K_{IC} e *Charpy* com foco de inspeção preventiva na faixa com nucleação típica (Buchholz, 2025). É nessa vizinhança que a superposição de tensões residuais de fabricação e operacionais pode elevar K_I a patamares superiores ao K_{IC} em cenários de frenagem severa, reduzindo a margem de tolerância a defeitos e aumentando o risco de instabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Síntese dos Achados

A Tabela 2 sintetiza os principais achados por grupo no disco. A nucleação de trincas concentrou-se entre 200–220 mm do centro com 93% no lado bandagem, em concordância com as regiões críticas de tração radial previstas pela *FEA* (Figura 3, perfil S: 90–200 mm e perfil parabólico: 180–230 mm).

Nos conjuntos com falha e nas rodas testemunhas, observaram-se médias e piores campos de inclusões e vazios acima das referências do aro, além de ductilidade reduzida ($A_{5\%} = 4,0\text{--}11,8\%$ e RA = 0,9–18,0%) e tenacidade à fratura K_{IC} reduzida. Em contraste, as amostras de rodas forjadas novas exibiram $A_{5\%} = 11\text{--}15\%$, RA = 13,6–25,4% e $K_{IC} > 45 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Esses resultados reforçam a necessidade de requisitos específicos para o disco em termos de sanidade, ductilidade e tenacidade.

**Tabela 2.** Principais achados por grupo no disco. Fonte: Buchholz (2025).

Métrica		Falha	Testemunha	Novas
Sanidade	média (%)	0,92 – 4,11	0,88 – 2,30	0,15 – 0,65
Sanidade	pior campo (%)	2,24 – 30,45	1,46 – 10,61	0,25 – 1,52
σ_Y	MPa	502 – 533	500 – 627	458 – 626
σ_U	MPa	746 – 1.012	750 – 950	958 – 1.014
$A_{5\%}$	%	4,0 – 11,8	2,9 – 8,5	11,0 – 15,0
RA	%	0,9 – 18,0	1,8 – 13,8	13,6 – 25,4
K_{IC}	MPa $\sqrt{m}$	41,9 – 44,1	44,1 – 51,8	45,5 – 58,5
Charpy	J a 23 °C	Casos < 8	1 Caso < 8	≥ 8

3.2. Integração: Sanidade, K_{IC} , Tensões e Tamanho Crítico

A sanidade metalúrgica, a tenacidade à fratura (K_{IC}) e a ductilidade governam o tamanho crítico de trinca a_c e, por consequência, a tolerância a descontinuidades no disco. O incremento térmico das tensões residuais eleva a tensão efetiva σ e reduz a folga entre K_I e K_{IC} , sobretudo nas faixas críticas em que a *FEA* prevê picos de tração. Nesse contexto, os limites propostos de sanidade e de propriedades mínimas do disco (Buchholz, 2025) alinham-se ao mapa de tensões previsto e reproduzem a severidade observada em campo.

Uma análise mais profunda dos fatores que definem o tamanho crítico da trinca mostra que:

- Sanidade e multiaxialidade. Macroinclusões (cerca de 1 mm) e alinhamentos irregulares de inclusões e vazios atuam como concentradores de tensão, diminuindo o K_{IC} aparente e acelerando a nucleação e a propagação sob carregamentos multiaxiais (curva, frenagem e gradientes térmicos). A multiaxialidade real observada em *FEA* (rotação do campo de tensões principais) reforça a adoção de critérios multiaxiais, como Sines, nas avaliações de fadiga do disco.
- Influência de tensões residuais. Em rodas com disco tipo S, a presença de tração residual radial e seus incrementos após frenagens severas reduz a margem de segurança frente ao K_{IC} efetivo, especialmente quando a sanidade é inferior. Esse quadro explica a coincidência entre falhas de campo e as regiões de pico de tração previstas numericamente.
- Os afloramentos, pites e a maior severidade destes em discos fundidos são compatíveis com a presença de *bifilms* como precursores de trinca e vias de ingresso. Tal mecanismo aumenta a efetividade de Y em regiões onde a *FEA* indica picos de tração, coincidindo com a recorrência de nucleação.

A partir dos valores reais de K_{IC} , Y e a tensão efetiva σ (média superposta: operacional + residual de fabricação), o tamanho crítico calculado a_c define a tolerância ao dano: defeitos $a < a_c$ são toleráveis, mas $a \geq a_c$ implicam ruptura frágil. Em contrapartida, reduções de K_{IC} ou aumentos de σ (curva, frenagem prolongada, bandagem reduzida) reduzem a_c de forma quadrática, pela Equação (3).

Dessa forma, rodas com K_{IC} baixo e sanidade inferior (macroinclusões e vazios) toleram apenas defeitos menores antes de atingir a instabilidade de fratura. A variação de σ , pela soma das parcelas residual e operacional, é determinante para a margem de segurança estático-frágil.

3.3. Tensões Residuais e Efeito Térmico de Frenagem

Análises *FEA* indicam que a frenagem severa pode redistribuir e elevar a tração radial na superfície do disco (entre 40–60 MPa), levando a picos de 320–350 MPa em faixas críticas (Figura 6) a cerca de 100 mm do eixo. Em cenários de sobreaquecimento pode ocorrer reversão de compressão para tração no aro/disco, reduzindo a margem K_{IC} e favorecendo trincamento térmico.

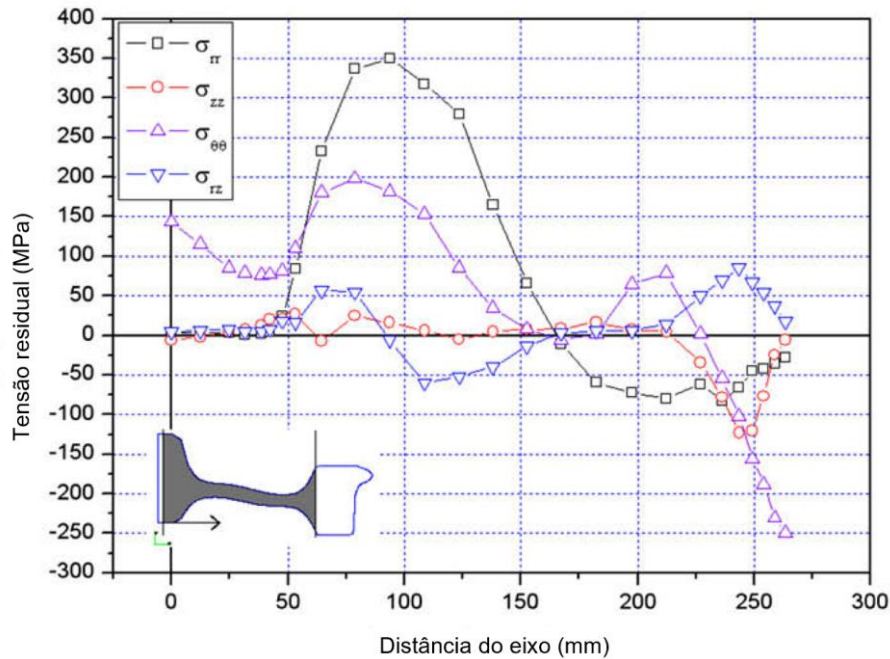


Figura 6. Tensões residuais radiais (σ_{rr}) por *FEA* em frenagem severa para roda com disco perfil S. Fonte: Seo (2009).

A cartografia de tensões por *FEA*, considerando cargas laterais/verticais (curvas), aquecimento de frenagem e geometria do disco, indica duas bandas principais de tração radial: cerca de 90 mm e de 200 mm no perfil S, que coincidem com as zonas de nucleação detectadas nos casos de campo. Em cenários severos, a elevação térmica das tensões residuais pode conduzir a condição operacional ao regime $K_I \geq K_{IC}$ em discos com baixa sanidade metalúrgica e menores valores de K_{IC} .

3.4. Geometria e Escala do Defeito

Macroinclusões com cerca de 1 mm e 10–25 mm de profundidade e microinclusões entre 3–5 mm da superfície figuram como sítios de nucleação preferenciais. Foram constatados eventos de macroinclusões de óxidos (Si-O) e um vazio subsuperficial grosseiro, compatíveis com a localização de regiões críticas de tração e com valores reduzidos de ductilidade e K_{IC} . Defeitos com morfologias alongadas e contornos agudos elevam Y efetivo local através da concentração de tensões, penalizando a_c (Taraferder, 2007).



3.5. Aporte de Bifilms ao Dano

Quando *bifilms* afloram na superfície, criam vias abertas para o meio, favorecem pites e acoplam com segundas fases precipitados sobre o filme, configurando pares galvânicos de curtíssima distância, acelerando o dano local (Campbell, 2016).

3.6. Integração com FEA e Fadiga Normativa

A norma AAR S-660 padroniza casos de carga térmico-mecânicos e fornece o campo de tensões de entrada para a S-669 (fadiga por Sines), sem usar propriedades do aço como critérios de aprovação. A EN 13262, EN 13979-1 e *International Union of Railways (UIC) 510-5* (IRS 50510-5) prescrevem ensaios de disco em roda inteira com 10^7 ciclos sem trinca com 99,7% de probabilidade. Em ambos os marcos, a região crítica do disco (90–230 mm do eixo, a depender da geometria) é sistematicamente identificada como zona de máxima tração, validando o vínculo entre geometria, campo de tensões e tamanho crítico de defeito (AAR, 2020) e (CEN, 2023).

3.7. Limites Propostos para o Disco

Constata-se lacuna em requisitos mínimos específicos do disco em partes do arcabouço AAR M-107/M-208, ao passo que EN 13262, EN 13979-1 e UIC 510-5 incluem ensaios e limiares de disco (tração, impacto e fadiga). Propõe-se adotar, para o disco, limites complementares às normas.

Os limites propostos na Tabela 3 elevam a_c e aumentam a janela de tolerância a defeitos no disco, reduzindo a probabilidade de $K_I \geq K_{IC}$ em serviço normal e em frenagens severas.

Tais limites, implementados em fases e com bloqueio por corrida em não conformidade, elevam a tolerância a defeitos a_c e reduzem a probabilidade de fratura catastrófica no disco sob condições severas de serviço.

Tabela 3. Limites propostos. Fonte: Buchholz (2025).

Métrica		Proposta
Sanidade	média (%)	$\leq 0,70$
Sanidade	pior campo (%)	$\leq 2,00$
σ_Y	MPa	≥ 450
σ_U	MPa	≥ 950
$A_{5\%}$	%	≥ 11
RA	%	≥ 13
K_{IC}	MPa $\sqrt{m}$	$\geq 44,2$
Charpy	J a 23 °C	≥ 8

4. RECOMENDAÇÕES

4.1. Projeto e FEA



- Casos normativos e multiaxialidade. Conforme discutido no item 3.6, empregar *AAR S-660/S-669* e *EN 13979-1/EN 13262* para definir e validar casos padronizados (curva, aparelho de mudança de via/AMV e frenagem), incorporando perfis realistas de tensões residuais de fabricação e o critério de Sines na fadiga multiaxial.
- Classe e geometria do disco. Conforme discutido nos itens 2.2 e 3.6, avaliar classe e perfil geométrico do disco (S ou parabólico) à luz das margens de a_c estimadas por *LEFM/FEA*, Equação (3), priorizando configurações que reduzam Y efetivo e σ local.
- Vazamento de rodas fundidas. Conforme discutido no item 2.3, evitar turbulência e admissão de ar no vazamento (*bifilms*). Adotar regime laminar, por contato ou contra-gravidade, minimizando arraste de óxidos (dupla-película).

4.2. Fabricação e Qualidade

- Rotas metalúrgicas e propriedades-alvo. Conforme discutido no item 2.3, fortalecer o controle de sanidade (redução de macroinclusões e vazios) e otimizar rotas (degaseificação a vácuo, microliga, tratamento térmico) com foco em elevar K_{IC} e ductilidade do disco.
- Correlação dureza–microestrutura–tensões. Conforme discutido nos itens 2.4 e 3.3, correlacionar mapas de dureza com microestrutura e tensões residuais, mitigando heterogeneidades que aumentem Y ou σ local e, por consequência, reduzam a_c .

4.4. Manutenção e Inspeção

Conforme discutido no item 2.6, priorizar ensaios não destrutivos (END) em regiões críticas e monitorar histórico térmico das frenagens, pois a temperatura elevada reduz a_c . Integrar equipamentos de inspeção automatizada instalados ao lado da via férrea (waysides) como: Detector de Impacto de Roda (WILD), Detector de Roda Aquecida (HWD) e Detector de Aro de Roda Trincada (ACWD) com protocolos de retirada preventiva para mitigar o risco de crescimento instável de trincas (Stewart, 2019).

4.5. Limites Mínimos de Especificação

Conforme discutido no item 3.7, especificar, nos pedidos técnicos, que os limites mínimos do disco são os da Tabela 3 (Buchholz, 2025). Ampliar a *FEA* para incluir casos térmicos representativos e validar as tensões residuais por ensaio e medição, a fim de refinar a tensão de projeto σ . Priorizar *END* nas regiões críticas do disco e usar o histórico de frenagens (*wayside*) como indicador de redução do tamanho crítico de trinca (a_c). Atenção à sensibilidade do END, pois, tipicamente, abaixo de 5 mm há perda de detecção. Quando aplicável, planejar por risco combinando σ local (*FEA*), histórico térmico e severidade de pites (defeitos superficiais associados a corrosão localizada).

5. CONCLUSÃO

Integrando sanidade metalúrgica, ensaio de tração, impacto *Charpy*, tenacidade à fratura (K_{IC} , J_{IC}), *FEA* e evidências de campo, demonstrou-se que a interação entre K_{IC} , a tensão efetiva σ (operacional + residual) e o fator geométrico Y governa o tamanho crítico de trinca a_c e, portanto, a tolerância a inclusões e vazios no disco. Reduções de ductilidade e de K_{IC} , associadas a sanidade inferior, diminuem a_c , efeito intensificado por incrementos térmicos entre 40 e 60 MPa. A cartografia de tensões por *FEA* é coerente com a nucleação observada entre 200 e 220 mm (predominantemente no lado bandagem), confirmando o vínculo entre geometria, campo de tensões e criticidade de defeitos. No comparativo,



rodas fundidas exibem menor tenacidade efetiva e maior propensão à instabilidade de propagação. Rodas forjadas apresentam J_{IC} superior e maior margem de inspeção. Esses achados sustentam requisitos mínimos específicos para o disco como sanidade (média e pior campo), ductilidade e K_{IC} . Estes requisitos embasam as recomendações do Item 4 em projeto/*FEA*, fabricação/qualidade e manutenção/*END*, visando elevar a_c e mitigar fratura catastrófica em serviço de alta carga.

6. REFERÊNCIAS

- ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook: Fractography*. Volume 12. Materials Park, OH: ASM International, 1992.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (AAR). *2015 Field Manual of the AAR Interchange Rules*. Washington, D.C.: AAR, 2015.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (AAR). M-107/M-208:2020. Wheels, carbon steel. In: *Manual of standards and recommended practices*. Section G, Wheels and axles. Washington, D.C.: AAR, 2020.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (AAR). S-660:2009. Wheel Designs, Locomotive and Freight Car — Analytic Evaluation. In: *Manual of Standards and Recommended Practices*. Section G, Wheels and Axles. Washington, DC: AAR, 2009.
- ASSOCIATION OF AMERICAN RAILROADS (AAR). S-669:2020. Analytic Evaluation of Wheel Designs. In: *Manual of Standards and Recommended Practices*. Section G, Wheels and Axles. Washington, DC: AAR, 2020.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E1820-25b. *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2025.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E23-25. *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Material*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2023.
- ASTM INTERNATIONAL. ASTM E399:1997. *Standard Test Method for Linear Elastic Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1997.
- BUCHHOLZ, C. *Segurança em discos de rodas ferroviárias de alta carga*. In: PRÊMIO BRASIL NOS TRILHOS DE ARTIGOS TÉCNICOS, 2025. [S.l.: s.n], 2025. Disponível em: <https://brasilnostrilhos.com.br/wp-content/uploads/2025/11/9o-Seguranca-em-Discos-de-Rodas-Ferrovias-de-Alta-Carga.pdf>. Acesso em: 21 fev. 2026.
- CAMPBELL, J. Consolidation and corrosion of metals: an overview of the role of bi-films in corrosion. *Innovations in Corrosion and Materials Science*, v. 6, n. 2, 2016. DOI: 10.2174/2352094906666160512115643.
- CARTER, C. S.; CATON, R. G. *Fracture resistance of railroad wheels*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 1974. (FRA ORD&D 75 12; DOT TSC FRA 74 10; PB243638). Disponível em: https://railroads.dot.gov/sites/fra.dot.gov/files/fra_net/15341/DOTFRAORD-75_12.pdf. Acesso em: 11 fev. 2026.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). EN 13262:2020. *Railway applications – Wheelsets and bogies – Wheels – Product requirements*. Brussels: CEN, 2023.



COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN). *EN 13979-1:2023. Railway applications – Wheelsets and bogies – Monobloc wheels – Technical approval procedure – Part 1: Forged and rolled wheels*. Brussels: CEN, 2023.

DICK, M.; SUNDARAM, N.; SHERROCK, E. *Wheel Failure Investigation Program: Phase I*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Office of Research, Development and Technology, 2021. 68 p. (DOT/FRA/ORD-21/04).

INTERNATIONAL UNION OF RAILWAYS (UIC). UIC 510-5, 2nd ed. *Technical approval of monobloc wheels – Application document for standard EN 13979-1*. Paris: UIC, 2007. (Substituído por IRS 50510-5).

LIU, Y.; LIU, L.; MAHADEVAN, S. Analysis of subsurface crack propagation under rolling contact loading in railroad wheels using FEM. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 74, p. 2659–2674, 2007. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2007.02.012.

MINICUCCI, D. *Analysis of Web Failure on CD 38 and CK 36 Wheels*. Botucatu, SP: DJ Consulting, 2024. Relatório técnico; com participação do Materials Institute of Brazil (MIB), São Carlos, SP

MRS LOGÍSTICA S.A. *Relatório técnico interno*. São Paulo: MRS LOGÍSTICA S.A., 2025. Comunicação privada/Documento interno (não disponível publicamente).

NEWMAN, J. C., Jr.; RAJU, I. S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 15, n. 1–2, p. 185–192, 1981. DOI: 10.1016/0013-7944(81)90116-8.

SEO, J. W.; KWON, S. J.; JUN, H. K.; LEE, D. H. Effects of residual stress and shape of web plate on the fatigue life of railway wheels. *Engineering Failure Analysis*, v. 16, n. 7, p. 2493–2507, 2009. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2009.04.013.

SINES, G. *Failure of materials under combined repeated stresses with superimposed static stresses*. Washington, D.C.: National Advisory Committee for Aeronautics, 1955. (NACA Technical Note, 3495).

STEWART, M. F.; FLYNN, E.; MARQUIS, B. P. *An Implementation Guide for Wayside Detector Systems*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, 2019. Disponível em: <https://railroads.dot.gov/elibrary/implementation-guide-wayside-detector-systems>. Acesso em: 10 fev. 2026.

TARAFDER, S.; SIVAPRASAD, S.; RANGANATH, V. R. Comparative assessment of fatigue and fracture behaviour of cast and forged railway wheels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, v. 30, p. 863–876, 2007. DOI: 10.1111/j.1460-2695.2007.01158.x.



FRACTURE-MECHANICS ASSESSMENT OF CRITICAL DEFECTS IN RAILROAD WHEEL PLATES

ABSTRACT

This work aims to integrate experimental results on microcleanliness, mechanical properties (tensile and Charpy impact tests), fracture toughness (K_{IC} and J_{IC}), and field evidence with Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) to quantify the geometry of the critical defect in heavy-haul railway wheel plates. The interaction among K_{IC} , the effective stress (operational + manufacturing residual), and the geometric factor Y defines the critical crack size a_c and the tolerance to inclusions and voids, with validation by Finite Element Analysis (FEA) of the zones of maximum radial tension. The methodology combined microcleanliness, tensile, Charpy, and K_{IC} tests on specimens extracted from the plate according to European Standard (EN) 13262 and American Society for Testing and Materials (ASTM) E399, correlating the results with FEA (S-660/S-669/EN 13979-1) to locate critical regions and estimate a_c . The results show that macro- and micro-inclusions, together with reduced ductility and toughness in the plate, lower defect tolerance, especially in scenarios with thermal stress increments of 40–60 MPa. Objective limits are proposed for the plate, including microcleanliness (mean and worst-field values), minimum ductility, and minimum K_{IC} , which are consistent with the critical regions indicated by FEA and with the recurrence of failures nucleated between 200–220 mm from the center. These limits are intended to increase wheel design robustness and mitigate the risk of catastrophic fracture in heavy-haul service.

Keywords: *Railroad wheels; Plate; Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM); Fracture toughness (K_{IC}); Residual stresses; Finite Element Analysis (FEA).*