

CATEGORIA 3

**RECUPERAÇÃO DE TRINCAS EM LATERAIS DE TRUQUES -
DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE VIABILIDADE**

LEANDRO PRATES FERREIRA DE ALMEIDA

DENNIS VIEIRA LEMOS

RAFAEL AZEVEDO GRIPP

WANDERSON LUIZ RODRIGUES DE SOUZA

INTRODUÇÃO

As laterais de truques de vagões são fabricadas com aço grau B ou B+ da norma AAR [1]. São divididas em 03 diferentes zonas, de acordo com a criticidade em relação à ocorrência de defeitos e às recomendações para recuperação por solda, durante o processo de fabricação, conforme indica a Figura 1 [2].

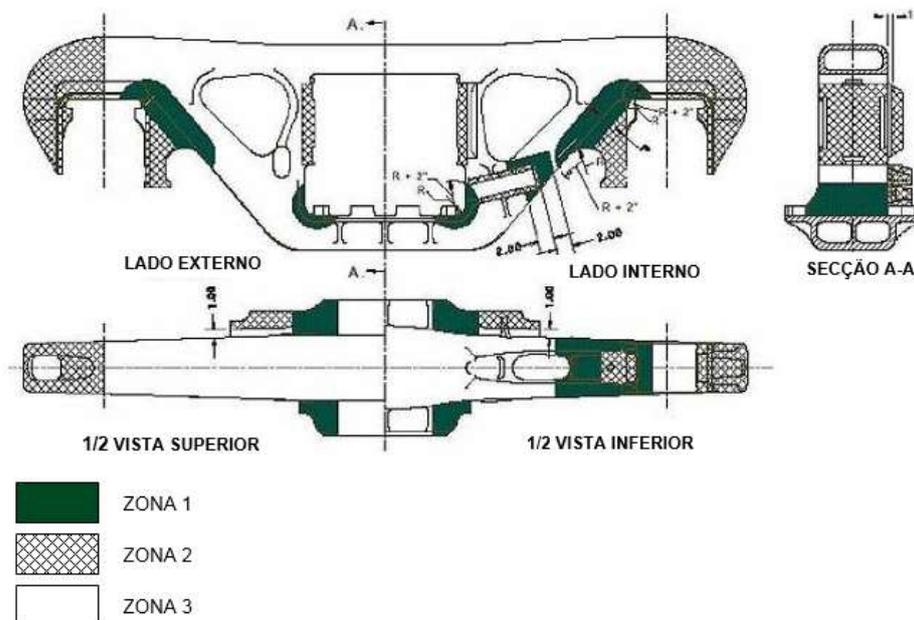


Figura 1 – Divisão da lateral em zonas de criticidade (adaptado de [2]).

As regiões marcadas como zona 1 são as que apresentam maiores concentrações de tensões, estando então mais susceptíveis a defeitos. A ocorrência de trinca no pedestal pode gerar sua quebra e, conseqüentemente, o descarrilamento do vagão, conforme ilustra a Figura 2 [3].



Figura 2 – Lateral com pedestal quebrado [3].

Os casos de quebra de pedestal ocorrem geralmente devido a procedimentos inadequados de solda próximos à região crítica, formando martensita não revenida [3] e regiões de solda de alta dureza e baixa tenacidade [4], por exemplo. A norma AAR [2] orienta sobre recuperação de defeitos em componentes fundidos durante o processo de fabricação: necessário pré-aquecimento quando a temperatura ambiente estiver abaixo de 40 °F (4,5 °C) e a temperatura de pré-aquecimento não deve superar 600 °F (315,6 °C), para evitar empeno. A norma determina ainda que as propriedades mecânicas na região recuperadas devem atender aos requisitos do material original. Não há recomendação para recuperação de laterais já colocadas em uso.

Para desenvolver o procedimento para recuperação de solda nas regiões críticas do pedestal foi necessário então garantir que as propriedades mecânicas e metalúrgicas fossem mantidas de forma homogênea na região de recuperação e na zona

termicamente afetada (ZTA), permitindo assim a extensão da vida útil das laterais e, conseqüentemente, redução de gastos com manutenção.

PROCEDIMENTO DE RECUPERAÇÃO DE TRINCAS EM PEDESTAIS

O procedimento de recuperação desenvolvido para laterais ferroviárias da Estrada de Férias Vitória a Minas (EFVM) contempla: remoção da trinca por plasma (goivagem), preparação da superfície, pré-aquecimento entre 250 °C e 315 °C, enchimento com solda por filetes (arame ER70S6) e transferência por curto-circuito, resfriamento lento (utilização de manta térmica por 48 horas) e inspeção por partículas magnéticas após o resfriamento [5].

Para validar o procedimento de recuperação, foram realizadas análises laboratoriais na região soldada, ZTA e metal base, com medições de dureza, perfil de microdureza e micrografia e macrografia [6-8]. As Figuras 3 e 4 apresentam a comparação das análises de laterais recuperadas internamente, pelo procedimento desenvolvido, e externamente [6].

Amostra	Região	Tipo	Medidas					Média	Média (HB)
RECUPERAÇÃO EXTERNA	Material base	HRB	83	84	82	83	82	82,8	159
	Solda	HV	281	288	319	241	233	272	258
RECUPERAÇÃO INTERNA	Material base	HRB	81	81	82	82	81	81,4	154
	Solda	HV	177	172	169	185	176	176	176

Figura 3 – Análise de dureza de laterais recuperadas (adaptado de [6]).

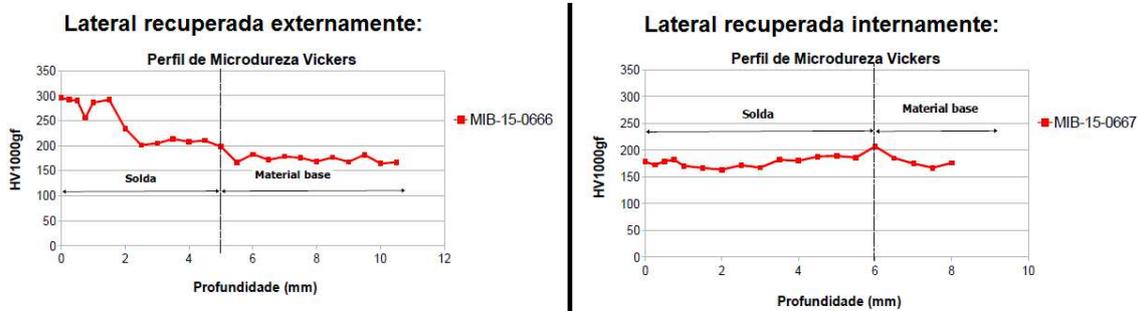


Figura 4 – Perfis de microdureza de laterais recuperadas (adaptado de [6]).

Como pode ser observado, a recuperação feita internamente manteve a faixa de dureza da região soldada dentro do especificado na norma AAR [2] – 127 a 228 HB, enquanto que na recuperação externa a faixa de dureza foi maior do que o especificado (fazendo a conversão de dureza Vickers para dureza Brinell). Para a lateral recuperada internamente, os valores médios de dureza na solda foram 14% maiores do que no metal base. Já na lateral recuperada externamente, a diferença foi de 62% [6].

Quanto à microestrutura, nenhuma das amostras apresentou martensita não revenida, o que seria indesejável (ambas apresentaram uma microestrutura refinada de ferrita e perlita na zona fundida), conforme exemplo da Figura 5 [6].

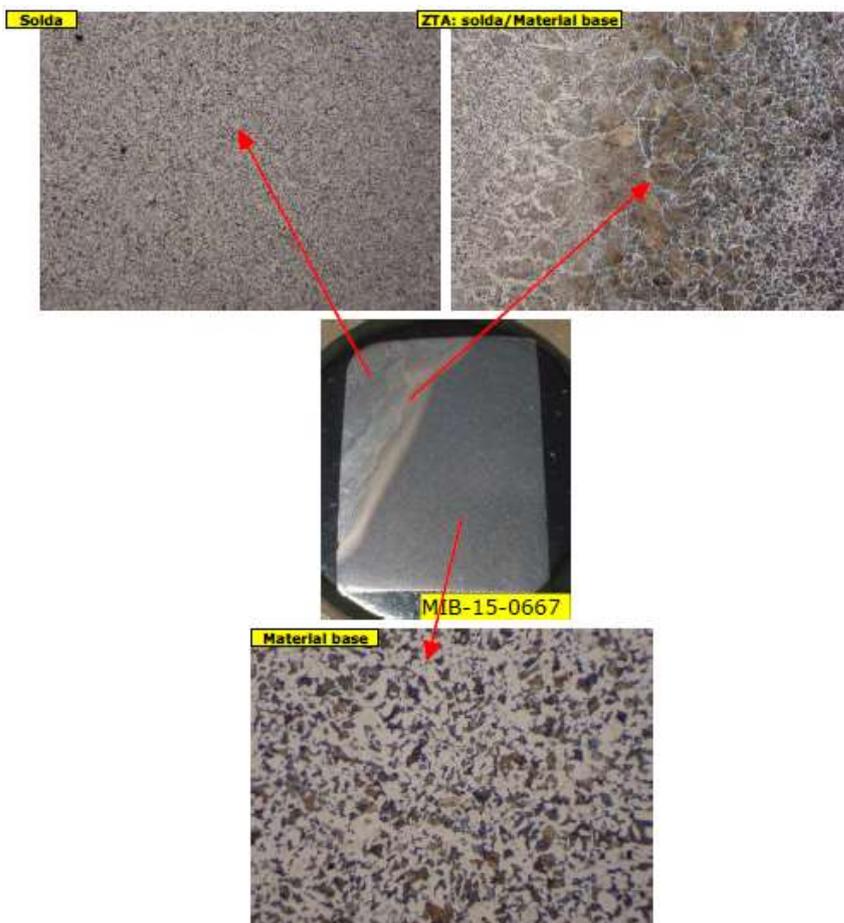


Figura 5: Micrografia da região de solda e ZTA da lateral recuperada internamente [6].

Já a Figura 6 apresenta os resultados dos perfis de microdureza da região soldada de laterais fabricadas em períodos distintos (1968 e 2005), ambas recuperadas internamente [7].

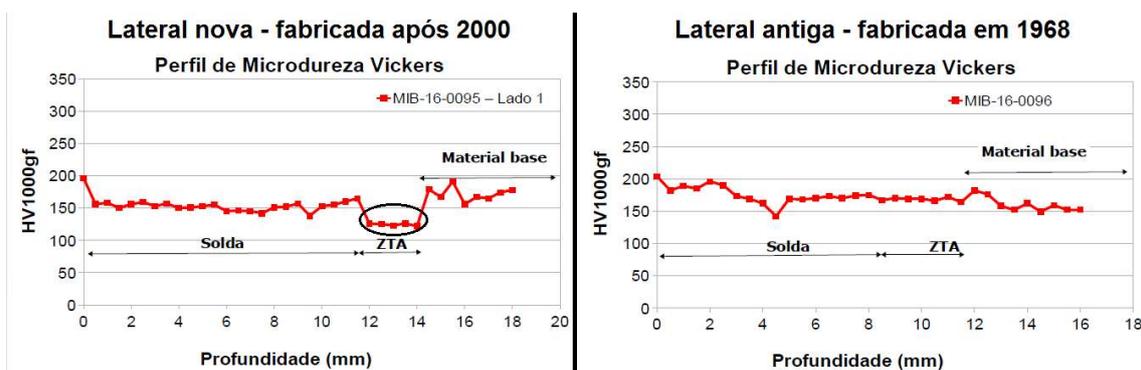


Figura 6: Perfis de microdureza de laterais recuperadas (adaptado de [7]).

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Os resultados de análise química e micrografia em [7] foram similares aos obtidos [6]. O perfil de microdureza também foi aproximado, com a ressalva de que, para a lateral nova, a microdureza na ZTA ficou um pouco abaixo dos valores encontrados na solda e no metal base – em torno de 125 HV, equivalente a aproximadamente 119 HB. Este valor está abaixo do mínimo de 137 HB especificado pela norma AAR [2] e pode estar ligado a uma descarbonetação na região de ZTA, que por sua vez pode favorecer nucleação de trinca por fadiga. Já na lateral antiga, as medidas foram sempre muito próximas e de acordo com a norma [7].

Foram realizados ensaios de laboratório em mais 3 laterais recuperadas seguindo o procedimento interno elaborado, a fim de verificar se a condição de menor dureza foi somente um desvio na lateral avaliada. Todos estes novos ensaios apresentaram resultados de micrografia, dureza e perfil de microdureza adequados à norma [8].

Em outras 3 laterais, após a recuperação, foi realizado Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT), com o intuito de verificar se haveria benefícios com redução nas tensões de tração residuais da região crítica do pedestal. Conforme apresentado no gráfico da Figura 7, construído a partir dos dados de [8], a tensão residual média de laterais com TTAT foi estatisticamente igual à tensão das laterais que não realizaram o tratamento. Além disso, a realização do TTAT acabou gerando descarbonetação superficial na região de recuperação de solda, o que é prejudicial à vida em fadiga (Figura 8).

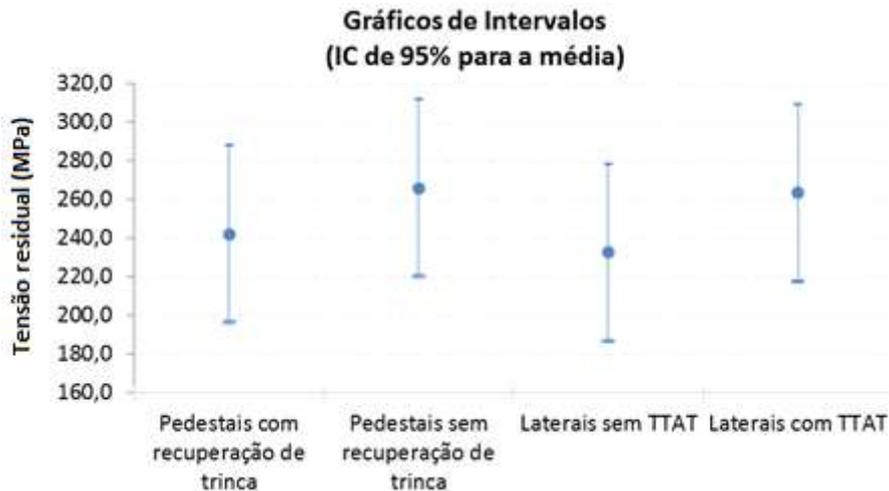


Figura 7: Intervalos de tensão residual de tração esperada para as laterais, de acordo com os diferentes parâmetros. Dados retirados de [8].

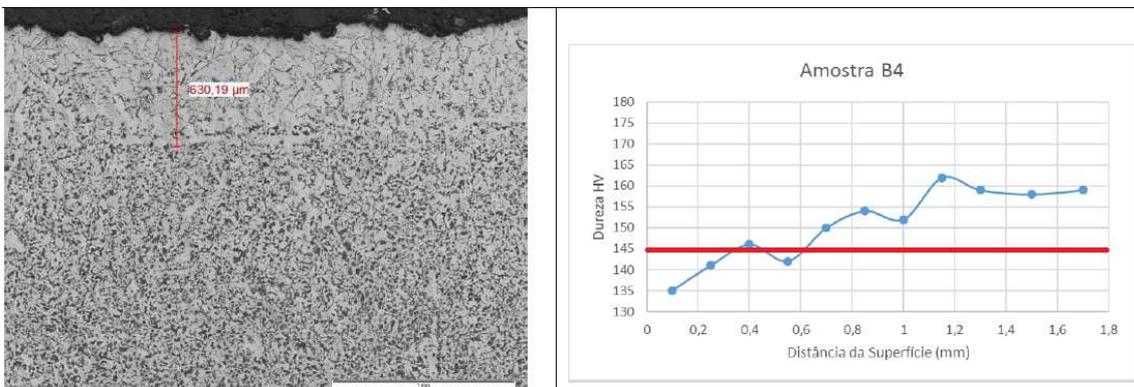


Figura 8: Micrografia e perfil de microdureza em região de recuperação de lateral com TTAT [8].

A partir de todas as análises realizadas, foi validado o procedimento de recuperação de trincas elaborado, sem a necessidade de realização de TTAT.

ENSAIOS ACELERADOS DE FADIGA

Após validação do procedimento, foram realizados ensaios de fadiga em escala real nas laterais, a fim de avaliar a viabilidade de realizar a recuperação das trincas. O protocolo

de ensaios foi baseado na norma AAR [9], que determina aplicação de cargas verticais, transversais e de torção, além dos ciclos de carregamento, para certificação de laterais ferroviárias. Foram determinados 2 patamares de carga de aplicação (68 tf e 80,3 tf de carga vertical - cargas transversais e para torção mantendo sempre a proporção de 13% e 8,5%, respectivamente), para reduzir o tempo necessário até ocorrência das trincas, mantendo o mesmo modo de falha, conforme estabelece o conceito de ensaio acelerado [10].

Como premissa, adotou-se que a condição de uso normal das laterais é com aplicação de carga vertical de 50 tf, dado que o peso bruto médio dos vagões de minério da EFVM é de 25 tf por lateral e que deve ser considerado o fator dinâmico de 2 vezes a carga estática [11]. A multiplicação da carga estática por 2 foi estabelecida com base na norma AAR [12]: “*The mechanical load magnitudes are currently twice the maximum static rail load for a vertical load (...)*”.

Os ensaios de fadiga foram realizados em uma célula com dispositivos de fixação das laterais, apoio sobre rolamentos de rodeiros ferroviários e aplicação de carregamentos dinâmicos através de cilindros hidráulicos, conforme ilustrado na Figura 9 [13].

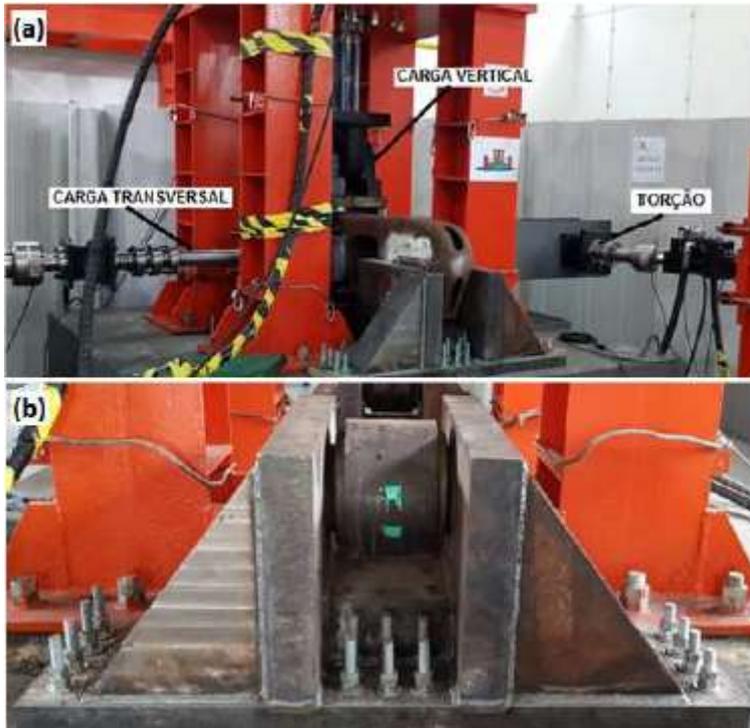


Figura 9: Célula de ensaios com aplicação das 3 cargas (a) e apoios com rolamento, utilizados nos ensaios (b) (adaptado de [13]).

Ao todo, foram realizados 10 ensaios de fadiga válidos para posterior análise da vida remanescente das laterais, que foram divididas em 3 tipos:

- Lateral tipo 1: modelo para truque 6'' x 11'', fabricadas antes do ano 2000 e com recuperação de trinca na zona crítica 1 do pedestal;
- Lateral tipo 2: modelo para truque 6.1/2'' x 9'', fabricadas após o ano 2000 e com recuperação de trinca na zona crítica 1 do pedestal;
- Lateral tipo 3: modelo para truque 6.1/2'' x 9'', peças novas (sem uso).

As laterais foram inspecionadas por ensaios de partículas magnéticas, realizados a cada 25.000 ciclos de carga vertical. Os ensaios foram interrompidos após a identificação de trincas nas laterais [13], conforme indica a Figura 10.



Figura 10: Trincas no pedestal detectadas por ensaio de partículas magnéticas e confirmadas por ensaio de líquido penetrante (adaptado de [13]).

Os resultados dos ensaios (quantidade de ciclos de carregamento até a ocorrência de falha) são apresentados na Tabela 1, de acordo com o modelo da lateral e a carga vertical aplicada.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios dinâmicos de fadiga nas laterais

Modelo de lateral	Carga vertical (tf)	Número de ciclos	Falha ou suspensão
Tipo 1	68	150.000-175.000	FALHA
Tipo 1	68	300.000-326.040	FALHA
Tipo 1	80,3	100.000-125.000	FALHA
Tipo 1	80,3	225.000-250.000	FALHA
Tipo 2	68	475.000-484.122	FALHA
Tipo 2	68	600.000-625.000	FALHA
Tipo 2	80,3	175.000-200.000	FALHA
Tipo 2	80,3	325.000-350.000	FALHA
Tipo 3	68	900.000-1.000.000	FALHA
Tipo 3	80,3	750.000-850.000	FALHA

Com os dados dos ensaios, foi possível construir as curvas de vida média remanescente dos 3 tipos de laterais ensaiadas, com auxílio dos softwares ALTA e Weibull⁺⁺ da Reliasoft.

ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS ACELERADOS

Os gráficos de contorno dos parâmetros das curvas de vida gerados permitiram confirmar que os diferentes valores de carga vertical tiveram níveis de estressamento distintos (análise de η – vida característica menor para cargas de 80,3 tf). Também confirmou que os modos de falha se mantiveram os mesmos (análise do parâmetro de forma β – valores similares) – ou seja, fadiga.

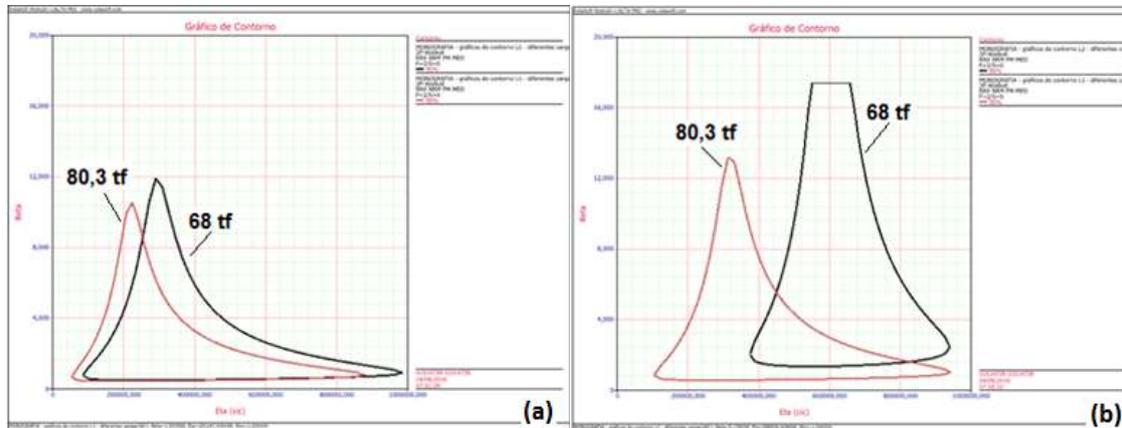


Figura 11: Gráficos de contorno para as laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b), para os ensaios com cargas verticais de 68 tf e 80,3 tf.

Após confirmar estatisticamente a boa representatividade dos ensaios para a vida em fadiga das laterais, as curvas de vida das laterais 1 e 2 na condição operacional (carga vertical de 50 tf) foram estimadas a partir dos dados de vida a 68 tf e 80,3 tf, com auxílio do software ALTA. A vida remanescente média das laterais tipo 1 foi calculada em 400.253 ciclos, enquanto que para as laterais tipo 2 a vida remanescente média foi de 1.671.801 ciclos (não foram considerados os intervalos de confiança da média, devido à pouca amostragem). As curvas da probabilidade de falha vs. quantidade de ciclos são apresentadas na Figura 12.

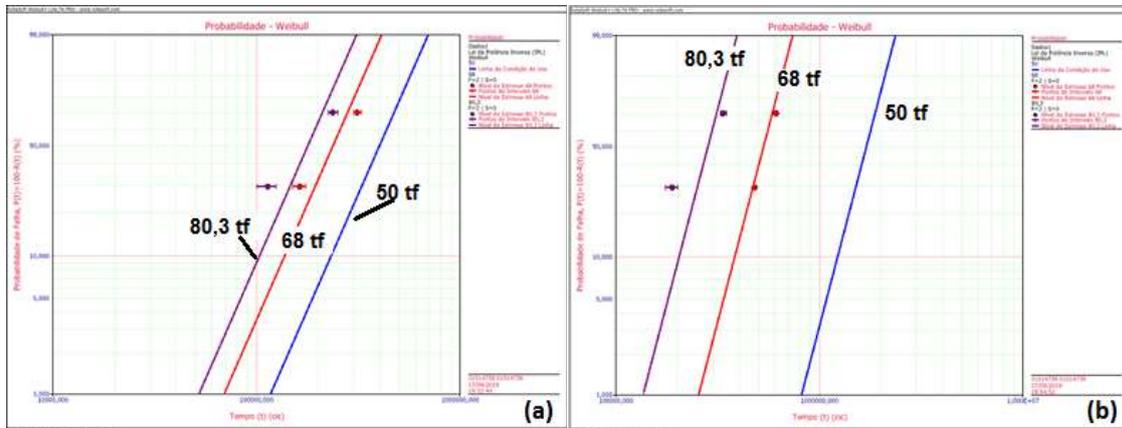


Figura 12: Curvas da probabilidade de falha vs. quantidade de ciclos para as laterais tipo 1 (a) e tipo 2 (b) sob cargas verticais de 50 tf (uso normal), 68 tf e 80,3 tf.

Já para as laterais tipo 3, como foi realizado apenas 1 ensaio válido em cada nível de estresse (carga vertical), não foi possível estimar a vida de forma direta. Então, consideraram-se as idades das laterais como o fator de estressamento, para cada condição de aplicação de carga. Como premissa foram adotadas as idades de 50, 15 e 1 ano, respectivamente para as laterais tipo 1, 2 e 3. Assim, foi possível obter os parâmetros β e η das curvas de vida estimadas para laterais novas (premissa de 1 ano de uso), considerando cargas de 68 tf e 80,3 tf. A partir desses parâmetros e com auxílio de simulação no software Weibull⁺⁺, foram gerados dados aleatórios de ensaios para a lateral tipo 3 sob as cargas de 68 tf e 80,3 tf. Com os dados simulados e uso do software ALTA, foi estimada então a curva de vida para a lateral tipo 3 sob condições normais de uso (carga de 50 tf). A vida média remanescente nesta condição foi calculada em 2.038.353 ciclos, também sem considerar os intervalos de confiança da média.

Ou seja, com as premissas adotadas, estima-se a vida remanescente esperada para uma lateral 6.1/2" x 9" nova, na condição de uso, é cerca de 5,09 vezes maior que a de uma lateral 6" x 11" (fabricada antes do ano 2000) com recuperação de trinca na zona crítica 1 e 1,22 vezes maior que uma lateral 6.1/2" x 9" (fabricada após o ano 2000) com recuperação de trinca na zona crítica 1. O gráfico com as curvas combinadas da confiabilidade vs. tempo (em ciclos) são apresentadas na Figuras 13.

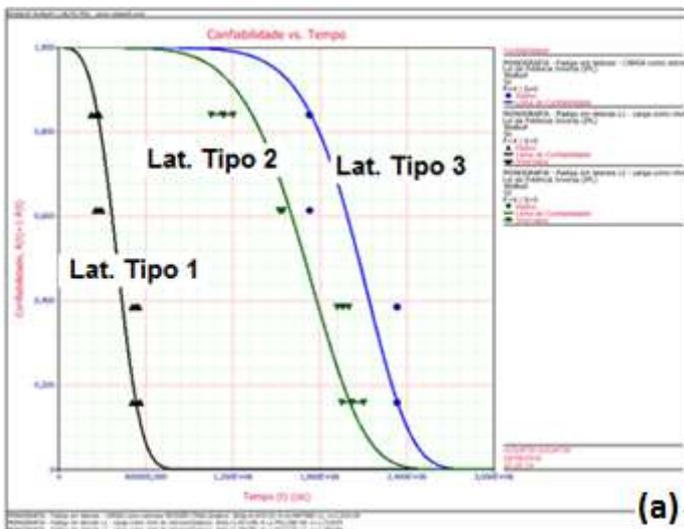


Figura 13: Curva de Confiabilidade vs. Tempo, em ciclos, para condição de uso

ANÁLISE DE RISCOS COM A RECUPERAÇÃO

Avaliação feita com base na capacidade de atendimento da oficina para futuras demandas recuperação de trincas em laterais. Premissas adotadas:

- Existência de 50.600 laterais na frota de 12.650 vagões de minério da EFVM;
- Capacidade de recuperação máxima anual de 2.920 laterais pela oficina de manutenção (4 laterais por turno, 2 turnos por dia, 365 dias no ano);

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



- Demanda anual linearizada de acordo com a vida útil remanescente calculada para as diferentes laterais.

Estudos de confiabilidade da manutenção de vagões da EFVM (acompanhamento histórico) estimam a vida de 57,5 anos para uma lateral nova (tipo 3) [11]. Considerando as vidas úteis estimadas em ciclos, calcula-se então que a lateral tipo 1 possui vida útil média remanescente de 11,29 anos. Com isso, estima-se que a demanda anual de recuperação de trincas no longo prazo seria de 4.482 laterais (50.600 laterais / 11,29 anos). Portanto, acima da capacidade máxima de recuperação da oficina. Assim, entende-se que a recuperação de trincas na zona crítica 1 de laterais 6'' x 11'', fabricadas antes do ano 2000, é inviável.

De maneira análoga, estima-se uma vida útil média remanescente de 47,16 anos para a lateral tipo 2, o que significa uma demanda anual de recuperação no longo prazo de 1.073 laterais - abaixo da capacidade máxima de recuperação da oficina. Assim, entende-se que a recuperação de trincas na zona crítica 1 de laterais 6.1/2'' x 9'', fabricadas após o ano 2000, é viável.

CONCLUSÕES

Nenhuma das laterais ensaiadas a 68 tf de carga vertical falhou com menos de 125.000 ciclos, que é o valor médio esperado para laterais de grau B+ no ensaio da norma AAR [2] – mínimo esperado é de 75.000 ciclos. O que comprova que o procedimento de recuperação de trincas está adequado.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



A recuperação de trincas é inviável para as laterais 6" x 11", fabricadas antes do ano 2000, devido à incapacidade futura de atender à demanda de. Já para as laterais 6.1/2" x 9", fabricadas após o ano 2000, a recuperação é viável.

Atualmente, a demanda de recuperação de trincas na zona crítica 1 na EFVM está em aproximadamente 200 laterais tipo 2 por ano. Considerando o custo de uma lateral nova, a proximidade da vida útil remanescente dessa lateral para uma nova e o fato de que a recuperação interna de trincas tem custo mínimo, estima-se uma redução de custo da ordem de grandeza de R\$1.000.000,00 por ano.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos parceiros que tivemos na realização deste trabalho, desde o desenvolvimento do procedimento de recuperação de trincas (ÉTICA Empreendimentos Tecnológicos LTDA), passando pelas análises de falhas e das recuperações realizadas (LAMEF, MIB e Institutos LACTEC) e culminando na realização dos ensaios acelerados de fadiga em escala real (LAEDE).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AAR – Manual of standards and recommended practices. **Section S: CASTING DETAILS [Specification M-201: Castings, steel]**, 2005.
- [2] AAR – Manual of standards and recommended practices. **Section S: CASTING DETAILS [Specification M-210: Side frame and bolsters, AAR approved – purchase and acceptance]**, 2009.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



- [3] LAMEF – Laboratório de Metalurgia Física. **Relatório de Análise de Falha em Truck de Vagão Ferroviário.** Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.
- [4] MIB – Materials Institute of Brazil. **Certificado nº MIB-0516-13:** Análise de falha. São Carlos-SP, 2013.
- [5] ÉTICA Empreendimentos Tecnológicos LTDA. **Desenvolvimento de processos de soldagem:** reparo das laterais e travessas de vagões. Relatório técnico nº 2665/14. Ribeirão Preto-SP, 2014.
- [6] MIB – Materials Institute of Brazil. **Certificado nº MIB-0298-15:** Caracterização metalúrgica do material. São Carlos-SP, 2015.
- [7] MIB – Materials Institute of Brazil. **Certificado nº MIB-0063-16:** Caracterização metalúrgica do material. São Carlos-SP, 2016.
- [8] Institutos LACTEC. **Ensaio em laterais de truques ferroviários.** Relatório REL DVSM 6637/2016 – Rev03. Curitiba-PR, 2016.
- [9] AAR – Manual of standards and recommended practices. **Section S: CASTING DETAILS [Specification M-203: Truck side frames, cast steel – design and testing],** 2005.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade.** Rio de Janeiro, 1994.

26ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
7º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



[11] ALMEIDA, Leandro Prates Ferreira de. **Ensaios acelerados para estudo de vida em fadiga de laterais ferroviárias.** 2019. 78 folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

[12] AAR – Manual of standards and recommended practices. **Section G: WHEELS AND AXLES [Specification S-660: Wheel designs, locomotive and freight car – analytic evaluation]**, 2009.

[13] LAEDE – Laboratório de Acústica e Ensaios Dinâmicos e Estáticos. **Ensaio dinâmico de fadiga em laterais de truque** – Até 6.293.552 de ciclos. Relatório de Ensaio: RE-1552-ED-003, IEME BRASIL – Engenharia Consultiva. São Paulo-SP, 2019.