

Comportamento em fadiga do aço LNE500 em componentes de caminhões off-Highway: evidências de campo, simulação e diretrizes de projeto/processo

Everton Pereira Brandão¹; 0009-0004-9124-922X
Alexandre Alvarenga Palmeira^{1,2}; 0000-0002-9271-8858
Izabel de Oliveira da Mota¹; 0000-0001-6276-5381
Cirlene Fourquet Bandeira¹; 0000-0001-7034-2477
Leticia Alvim Dias²; 0009-0000-3586-0439

1 – UniFOA, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, RJ

2 – UERJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Tecnologia, Resende, RJ

evertonbrandaobm@gmail.com

Resumo: A ocorrência de trincas por fadiga em componentes de veículos comerciais off-Highway com aço LNE500 determinou uma avaliação integrada envolvendo dados de campo, simulação numérica e benchmarking de processo de corte/acabamento em fornecedores. Registros de falha em quatro veículos (aplicações: tritrens e bitrem madeireiro) indicaram nucleação recorrente na aba inferior do componente, com micro trincas evoluindo para trincas lineares. Hipóteses incluíram (i) ausência de especificação formal de acabamento de bordas, (ii) inexistência de reforços externos na região central do componente, e (iii) desalinhamento de furos para montagem de reforços internos. Um modelo off-Highway foi analisado por elementos finitos (ciclo de 3000 km off-Road) revelaram concentrações de dano por fadiga na região central dos componentes. As análises evidenciaram que o corte com melhor qualidade de borda e chanfro/lixamento eleva a classe de resistência à fadiga (FAT) em comparação a bordas provenientes apenas de slitter/guilhotina. Três intervenções foram consolidadas: (1) inclusão de acabamento superficial nas bordas dos componentes; (2) liberação de kit de reforços; (3) reposicionamento dos furos e adequações associadas (fundidos e reforços internos). As melhorias reduzem concentrações de tensão e aumentam a confiabilidade em fadiga.

Palavras-chave: Fadiga; aço LNE500. Acabamento de borda; reforços estruturais. Elementos finitos.

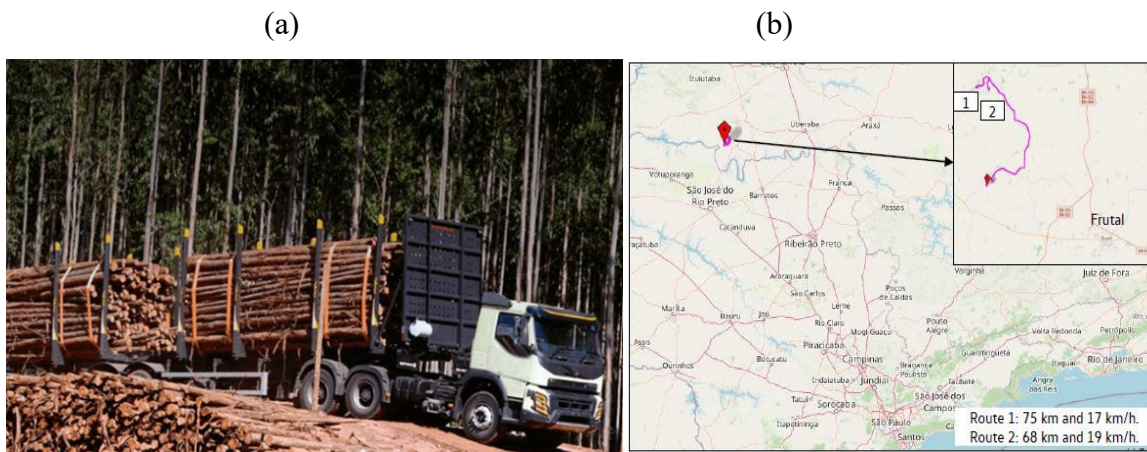


INTRODUÇÃO

Este estudo aborda ocorrências de falhas em veículos comerciais de segmento do agronegócio, com foco em veículos off-Highway submetidos a condições severas de carregamento e rodagem. A unidade de análise é a longarina do quadro de chassi em aço LNE500, elemento estrutural sujeito a rodagem em estradas irregulares, carregamentos máximo e interações suspensão–implemento. A Figura 1 representa um exemplo de condição utilizada para análise do estudo.

Figura 1 – Exemplo de rodagem em estrada irregular

Legenda: (a) caminhão na fazenda de extração de madeira; (b) percurso usado para transporte da madeira



Fonte: o autor

Do ponto de vista teórico, a fadiga é caracterizada como processo de dano progressivo sob tensões/deformações, resultando na nucleação e propagação de trincas até a fratura (ASME; Callister, 2008; Dieter, 1981). A nucleação é fortemente influenciada por concentrações de tensão e por condições superficiais (entalhes, rugosidade, rebarbas), sendo amplamente documentado que qualidade de borda e acabamento alteram a classe de resistência à fadiga e, conseqüentemente, a vida em serviço (Stephens et al., 2001; Shigley, 2005; Schijve, 2003). Em aços de alta resistência, diretrizes de manufatura indicam que rotas de corte com melhor qualidade (laser/plasma com remoção de rebarbas ou cisalhamento seguido de lixamento/chanfro) prolongam a vida em fadiga em relação a bordas apenas cisalhadas (SSAB, 2012). Além disso, sob carregamentos dinâmicos, a

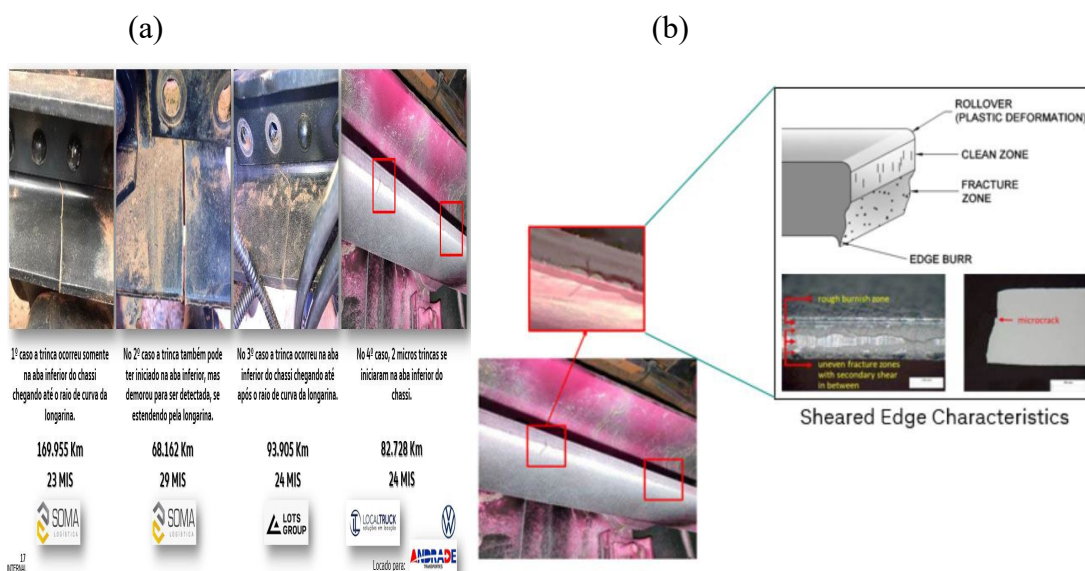


amplitude de tensão constitui parâmetro crítico para a vida em fadiga (SSAB, 2012; ASTM INTERNATIONAL, 2021; Stephens, 2001; Lipiainen et al., 2021).

A evidência levantada em campo revelou trincas recorrentes na aba inferior dos componentes em LNE500, com micro trincas evoluindo para trinca linear. Ao mesmo tempo, foram identificados (i) desalinhamentos de furos para montagem de suportes; (ii) ausência de reforços externos na região central do componente; e (iii) componentes sem acabamento de borda. A literatura clássica em fadiga sustenta que entalhes geométricos (furos, transições, raios) e condições de borda com baixa qualidade de acabamento intensificam tensões locais e antecipam a nucleação de trincas (Stephens et al., 2001; Shigley, 2005; Schijve, 2003), enquanto guias de projeto em aços de alta resistência indicam ganhos de vida com melhorias de acabamento (SSAB, 2012). A Figura 2 mostra o principal problema encontrado, demonstrando os pontos evidenciados.

Figura 2 – Imagem da longarina trincada

Legenda: (a) veículo da Figura 1 mostrando a trinca da parte inferior da longarina; (b) produto “checa-trinca” para deixar as trincas mais aparentes



Fonte: o autor

Embora a literatura forneça fundamentos sólidos sobre mecanismos de fadiga e efeitos de entalhes/qualidade de borda (ASME; Callister, 2008; Dieter, 1981; Stephens et al., 2001; Schijve, 2003; Shigley, 2005; SSAB, 2012), existe carência de estudos aplicados que integrem, no contexto de longarinas de caminhões off-Highway em LNE500, (a) ciclos de



trabalhos representativos mapeados de modelos; (b) avaliação comparativa de corte/acabamento e seus efeitos em classes FAT; e (c) intervenções de projeto (reforços locais e reposicionamento/realinhamento de furos) analisadas de forma conjunta.

Portanto, surge a necessidade de um estudo de engenharia que associe evidências de campo, simulação e diretrizes de manufatura para mitigar trincas na vida útil do produto. A persistência de trincas implica paradas não programadas, custos de garantia e risco operacional em aplicações severas, exigindo respostas rápidas, tecnicamente fundamentadas e auditáveis.

O objetivo desse trabalho foi avaliar formas de eliminar trincas por fadiga em componentes LNE500 em veículos pesados utilizados em rotas off-road. Consolidar evidências de campo e refletir seus efeitos para mitigar possíveis falhas.

MÉTODOS

Foram analisados quatro casos em veículos off-road, quilometragens entre 68.162 km e 169.955 km, em aplicações “bitrens” e “tritrens” madeireiro. Em todos, a trinca localizou-se no lado direito (LD) próximo ao tanque de combustível, iniciando na aba inferior e avançando em direção ao raio de dobra do componente.

As figuras 3 e 4 apresentam partições de massa e suspensões foram representadas em um modelo completo para distribuição de eixos, totalizando 55 t. A simulação adotou ciclo de missão de 300 km de aplicação off-road. Resultantes inerciais e reações de suspensão foram mapeadas para um modelo de elementos finitos, a fim de obter amplitudes de tensão e fatores de concentração em regiões críticas (furos, bordas e transições geométricas).

Figura 3 - Modelo completo de veículo com distribuição de carga por eixo de 7,3t, 12,3t, 11,8t e 8t (3x), totalizando 55 toneladas.

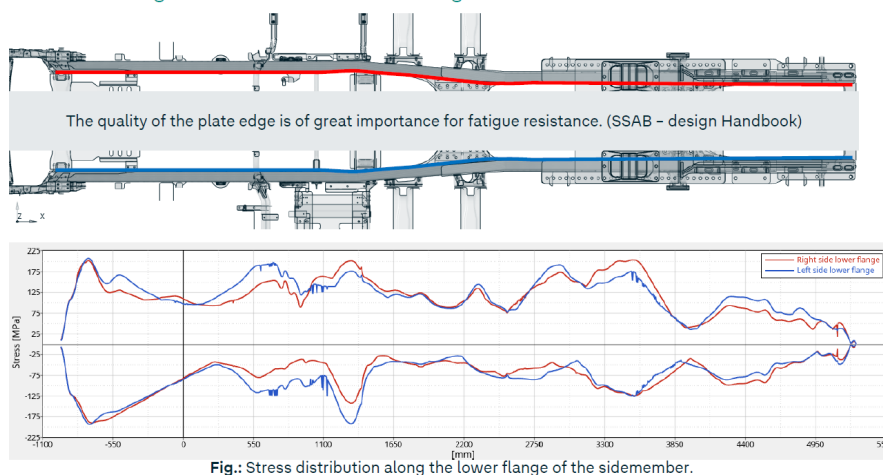




Fonte: o autor

Figura 4 – Comportamento do carregamento de cargas no modelo através de elementos finitos – Amplitudes de Stress

Amplitude stress along the lower sidemember's flange



Fonte: o autor

Foram inspecionadas longarinas de referência: (i) sem chanfro (faces cortadas), (ii) corte por slitter e por guilhotina, e (iii) acabamento com lixamento/chanfro. O efeito na resistência à fadiga foi comparado a curvas de classe FAT típicas de bordas boas (e.g., corte a laser/plasma com rebarba removida) versus bordas cisalhadas sem acabamento adicional. Baseado nos resultados do CAE, evidenciando picos tensões elevadas em pontos críticos quando o veículo estava submetido ao peso bruto total e realizando curvas, foram adotados a inclusão do corte a laser nos componentes e a realização de acabamento nas bordas. Evitando o surgimento de micro trincas no processo de fabricação. Redução das tensões nominais e dos fatores de concentração; migração da classe equivalente para uma FAT superior em função do acabamento.

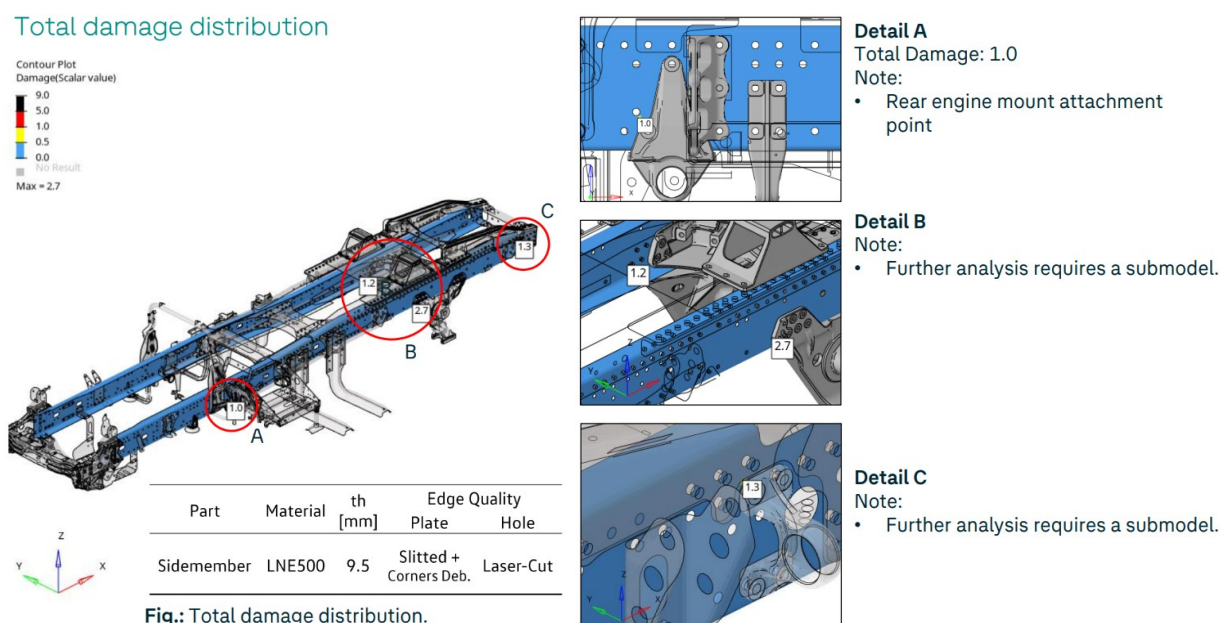
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os quatro casos exibiram padrão consistente de nucleação em borda/aba inferior, com trinca linear longitudinal. A coincidência com furos de montagem e com a região central do componente corrobora o papel de entalhes e da distribuição de esforços no gatilho de fadiga.



Foi utilizado CAE, figura 5, para mapeamento de amplitude de tensão na zona dianteira, central e traseira do componente, com intensificação ao redor de furos desalinhados e bordas sem chanfro. A distribuição de dano acumulado reproduziu o padrão observado em campo, validando o ciclo de missão e os carregamentos do modelo. A inclusão de corte a laser seguido de acabamento e reforços externos redistribuiu fluxo de esforços, reduzindo picos de tensão na aba inferior e no raio de dobra.

Figura 5 – Mapeamento de tensões em pontos específicos



Fonte: o autor

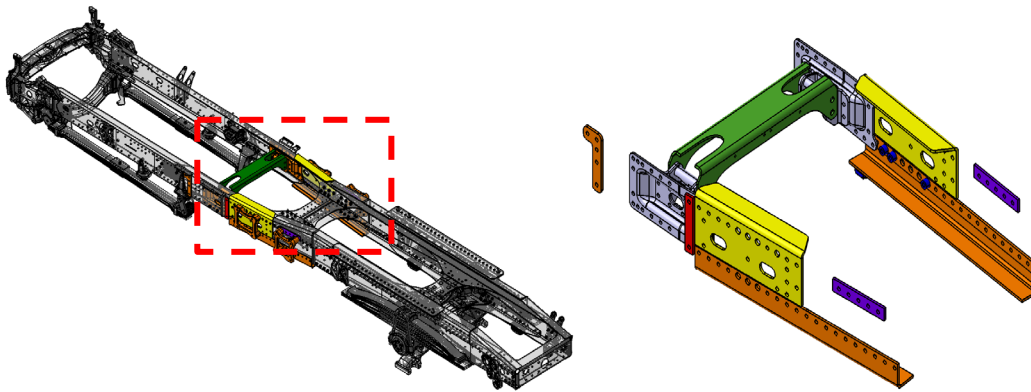
A comparação, entre bordas cortadas por slitter/guilhotina sem chanfro versus bordas lixadas com chanfro (ou equivalentes ao acabamento de corte térmico com remoção de rebarba) indicou maiores resistências e, conseqüentemente, redução de danos por ciclo. Do ponto de vista físico, o chanfro/lixamento mitiga entalhes micro geométricos, remove micro trincas iniciais e diminui a densidade de discordâncias superficiais nas quais a nucleação se favorece.

(a) Projeto: padronizar a inclusão de acabamento de borda nos componentes; adotar reforços externos centrais, figura 6; reposicionar furos críticos. (b) Processo: priorizar corte com melhor qualidade de borda (laser/plasma com rebarba removida ou cisalhamento



seguido de lixamento e chanfro); inspecionar micro trincas e rugosidade de borda em 100% dos lotes críticos. (c) Validação: atualizar os dados recolhidos em veículos durante a rodagem nas aplicações e reexecutar a simulação de durabilidade; pilotar veículos instrumentados; monitorar frota através de revisões agendadas.

Figura 6 – Adição de reforços na longarina



Fonte: o autor

CONCLUSÕES

As trincas observadas em campo na parte inferior do componente de aço LNE500 estão associadas a combinação de falhas em processo de produção (cortes com acabamentos irregulares) e concentração de esforços na região central do componente. A simulação de CAE reproduziu as regiões críticas, apoiando o diagnóstico e a priorização de contramedidas. Acabamentos de borda de melhor qualidade, com lixamento e chanfro, elevam a classe de resistência à fadiga e reduzem o dano por ciclo.

A adoção de kit de reforços externos centrais (para modelos Off-Highway), juntamente com o reposicionamento dos furos dos suportes e reforços, compõe um conjunto eficaz de ações de curto prazo para mitigação do risco de trinca. Recomenda-se consolidar a correlação em campo por meio de monitoramento de frota e ajustes finos dos veículos em paradas programadas para revisões e manutenções (quando os veículos estão disponíveis para avaliações detalhadas).

REFERÊNCIAS

- ASME. Boiler and Pressure Vessel Code: Section VIII – Rules for Construction of Pressure Vessels. Division 2 – Alternative Rules. New York: ASME, 2010.
- ASTM INTERNATIONAL. E466-21: Standard practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.
- CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. 7. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- DIETER, G. E. Engineering Design: A Materials and Processing Approach. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1983.
- LIPIÄINEN, K.; KAIJALAINEN, A.; AHOLA, A.; BJÖRK, T. Fatigue strength assessment of cut edges considering material strength and cutting quality. International Journal of Fatigue, v. 149, p. 106263, 2021.
- NORTON, R. L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. Porto Alegre: Bookman, 2004.
- SCHIJVE, J. Fatigue of Structures and Materials. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHE, C. R.; BUDYNAS, R. G. Mechanical Engineering Design. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.
- SSAB. Design handbook: structural design and manufacturing in high-strength steel. Nyköping: SSAB, 2012.
- STEPHENS, R. I. et al. Metal Fatigue in Engineering. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001.