

ANÁLISE DE FALHA DE SPREADER EM REACH STACKER COM APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FMEA E ANÁLISE METALOGRÁFICA

FAILURE ANALYSIS OF A SPREADER IN A REACH STACKER USING FMEA METHODOLOGY AND METALLOGRAPHIC ANALYSIS

Adriele Souza da Costa, Igor Gualberto Florippi, Luís Henrique Nascimento Barbosa, Rodrigo Santos de Carvalho Junior, Carlos Alberto Amaral Moino

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia de Produção e Mecânica

E-mail para contato: luis.deserto@hotmail.com

RESUMO – Este trabalho em andamento tem como objetivo analisar as causas da falha estrutural em uma viga caixão da ferramenta de acoplamento (spreader), componente crítico de um equipamento portuário para movimentação de container, sendo uma máquina essencial na logística portuária. A pesquisa integra metodologias de Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção, aplicando a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA), a Mecânica da Fratura (com foco em fadiga) e a Metalografia. O estudo considera o pior cenário de operação, envolvendo contêineres de 12 metros em peso máximo admissível, e busca identificar os modos de falha críticos, suas causas e efeitos, propondo ações preventivas e corretivas. Os resultados preliminares apontam evidências claras de falha por fadiga, com marcas de praia e catraca na fratura, reforçando a necessidade de inspeções preditivas e melhorias no plano de manutenção.

Palavras-chave: Análise de Falha; Fadiga; Reach Stacker; Viga Caixão; Metalografia; FMEA.

ABSTRACT – This ongoing work aims to analyze the causes of structural failure in a box girder of the coupling tool (spreader), a critical component of port equipment for container handling, which is an essential machine in port logistics. The research integrates methodologies from Mechanical Engineering and Production Engineering, applying Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Fracture Mechanics (with a focus on fatigue), and Metallography. The study considers the worst-case operating scenario, involving 12-meter containers at maximum allowable weight, and seeks to identify critical failure modes, their causes and effects, proposing preventive and corrective actions. Preliminary results show clear evidence of fatigue failure, with beach marks and ratchet marks on the fracture

surface, reinforcing the need for predictive inspections and improvements in the maintenance plan.

Keywords: Failure Analysis; Fatigue; Reach Stacker; Box Girder; Metallography; FMEA.

1 INTRODUÇÃO

O Porto de Santos, localizado no litoral paulista, é o maior porto da América Latina e desempenha um papel estratégico na economia brasileira, sendo responsável pelo escoamento e recebimento de milhões de toneladas de carga anualmente. Esse complexo portuário tem um impacto direto na globalização econômica, facilitando as trocas comerciais entre o Brasil e outros países (GUITARRARA, 2023). Para garantir a eficiência logística, o porto depende da confiabilidade e robustez de seus equipamentos operacionais, principalmente dos equipamentos responsáveis pela movimentação e empilhamento de contêineres, as *reach stackers*, como apresentado na Figura 1.

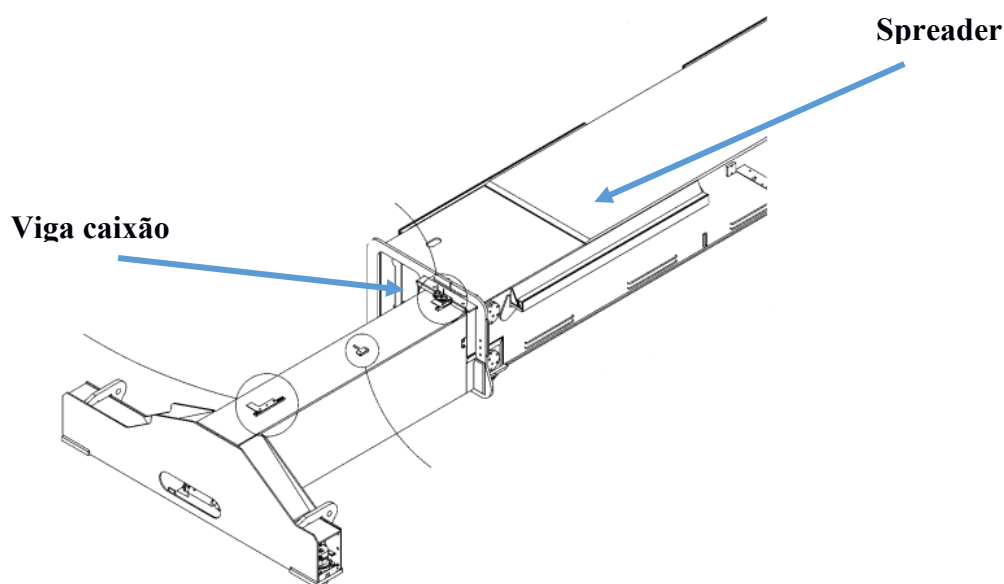
Figura 1 - Reach Stacker



Fonte - TEREX. Manual de manutenção TFC45: reach stacker: Terex, 2009. 27 p

Esses equipamentos, no entanto, operam em um ambiente severo, com sobrecargas constantes e esforços cíclicos, o que os torna suscetíveis a falhas estruturais recorrentes. Um dos principais pontos críticos de falha está na viga caixão do dispositivo de acoplamento de container, a *spreader*, conforme Figura 2. Este componente é essencial para a estabilidade e segurança das operações. Falhas nessa peça podem causar interrupções operacionais significativas e aumentar os custos de manutenção, além de representar riscos elevados à segurança no ambiente portuário, como apontado pelo informe da CEPAL (2024) sobre as disrupções nos portos latino-americanos.

Figura 2- Viga caixão e Spreader



Fonte - Adaptado de TEREX. TFC45h CUMMINS: reach stacker: Terex, 2017. 48 p

Nesse contexto, a análise de falha torna-se uma ferramenta essencial para garantir a continuidade operacional, a segurança e a redução de custos. A aplicação de metodologias como a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA), a Mecânica da Fratura e a Metalografia tem se mostrado eficaz na identificação de falhas e na proposição de soluções preventivas e corretivas (PIMENTA, 2023). O FMEA, por exemplo, é amplamente utilizado para avaliar riscos e planejar ações mitigadoras, como detalhado por Pimenta (2023) em seus estudos sobre a gestão de falhas em equipamentos.

Este artigo apresenta um estudo em andamento que busca investigar as causas-raiz das falhas estruturais na viga caixão da spreader de reach stackers, adotando uma abordagem multidisciplinar. O objetivo é analisar os mecanismos envolvidos nas falhas, identificar suas causas principais e propor medidas corretivas e preventivas. A metodologia inclui a análise visual e macroscópica da peça danificada, a avaliação dos riscos operacionais por meio do FMEA, a realização de ensaios laboratoriais como preparação metalográfica e teste de dureza, e, por fim, a proposição de soluções que visem aumentar a confiabilidade e a segurança dos equipamentos (COLPAERT, 2008).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada combinou três abordagens principais. Primeiramente, aplicou-se a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) para identificar e hierarquizar modos de falha a partir do cálculo do Número de Prioridade de Risco ($NPR = S \times O \times D$), destacando a concentração de tensões, soldas defeituosas e fadiga estrutural como fatores críticos. Em seguida, recorreu-se à Mecânica da Fratura, com foco na fadiga, mediante inspeções visuais e macroscópicas que buscaram evidências como marcas de praia e catraca, associadas à nucleação e propagação de trincas. Por fim, realizou-se a análise metalográfica e ensaio de dureza, com preparação de amostras e microscopia óptica, visando identificar microtrincas, inclusões e características microestruturais que pudessem acelerar o processo de fadiga.

Para a caracterização microestrutural do material, foram retiradas três amostras representativas da peça fraturada, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Amostras de peça fratura



Fonte - Autoria Própria a. (2025)

A primeira foi extraída da região superior, onde se observaram marcas de catraca, com o intuito de avaliar as características microestruturais associadas ao processo de nucleação e propagação da trinca. As duas demais foram retiradas das laterais, de modo a possibilitar a comparação entre a região crítica e áreas menos solicitadas mecanicamente, verificando a uniformidade microestrutural do componente.

A preparação das amostras seguiu a metodologia de Buehler, reconhecida como referência para análise metalográfica, abrangendo as etapas de corte, embutimento, lixamento, polimento, ataque químico e observação microscópica. O corte foi realizado em cortadeira metalográfica com refrigeração, a fim de evitar o superaquecimento localizado e alterações microestruturais indesejadas. Posteriormente, as amostras foram embutidas utilizando baquelite, o que garantiu maior facilidade de manuseio e preservação das bordas durante as etapas subsequentes.

O lixamento foi conduzido de forma progressiva, utilizando lixas de carvão de silício com granulometria decrescente, desde #240 até #2000, com alternância no sentido de desgaste a cada troca de lixa para assegurar a remoção dos riscos da etapa anterior. Em seguida, realizou-

se o polimento em panos metalográficos, empregando suspensões de óxido de alumínio e, posteriormente, pasta de diamante de 1 μm , até que a superfície apresentasse aspecto especular adequado para análise microscópica.

Após o polimento, as amostras foram submetidas a ataque químico com solução de Nital a 2%, aplicado por imersão rápida, suficiente para revelar os contornos de grão e os constituintes microestruturais. Concluídas as etapas de preparação, as superfícies foram analisadas em microscópio óptico metalográfico em diferentes ampliações, registrando-se micrografias das regiões representativas. Esse procedimento permitiu identificar os constituintes predominantes e verificar se havia diferenças significativas entre a região associada à falha e as laterais da peça.

O estudo de investigação considerou suposições estruturais e avaliou o pior cenário de operação, envolvendo contêineres de 40 pés em peso máximo admissível. Dessa forma, a metodologia integra técnicas qualitativas e quantitativas, descritas de modo a permitir replicabilidade e justificadas pela adequação em responder à questão central do estudo.

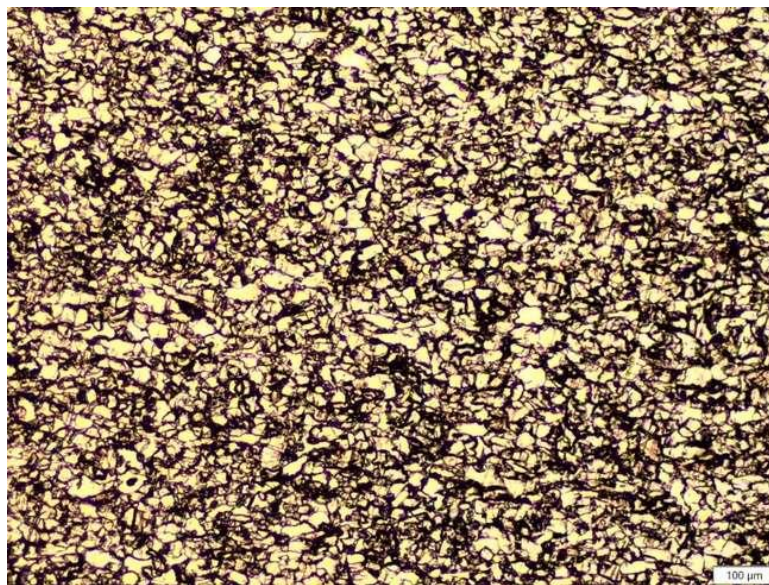
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da aplicação do FMEA foi possível identificar os modos de falha críticos. O maior NPR (392) esteve associado à falha da viga caixão, conforme Anexo A, relacionada a concentrações de tensão de forma heterogêneas que geram danos a peça e a estrutura do equipamento, provenientes de uma carga de um container de 12,192 metros em sua máxima capacidade.

Com a realização da análise metalográfica, foi possível evidenciar que o material apresenta uma microestrutura típica de aço de baixo carbono, composta por ferrita e perlita. Esse resultado é compatível com um aço da classe SAE 1020, amplamente utilizado em estruturas metálicas e componentes sujeitos a esforços moderados. A predominância de ferrita garante boa ductilidade, enquanto a fração perlítica contribui para resistência mecânica. Não foram observadas fases endurecidas, como martensita, o que indica que o material provavelmente não passou por tratamentos térmicos severos e foi empregado em condição

normalizada ou laminada a quente. Essas observações são possíveis de inferir conforme Figura 4.

Figura 4 - Imagem obtida em 100 μ m



Fonte 1 - Autoria própria b (2025)

O ensaio de dureza corroborou essa análise, apresentando valores médios de aproximadamente 83 HRB, equivalentes a cerca de 170–180 HB. Esses números estão dentro da faixa esperada para aços de baixo carbono em condição bruta de laminação, reforçando a hipótese de que se trata de um SAE 1020. A variação observada entre as medições (cerca de 10 HRB) pode estar associada a pequenas heterogeneidades microestruturais, mas não compromete a consistência do resultado.

Nos cálculos estruturais, adotando o modelo de viga engastada submetida a carga concentrada na extremidade, a seção transversal foi modelada como um caixão retangular de dimensões externas 400 × 670 mm e espessura 12,5 mm. O módulo resistente obtido foi de aproximadamente $4,9 \times 10^6 \text{ mm}^3$. Considerando a carga de 30 t (294 kN) aplicada a um vão de 3,2 m, o momento fletor máximo resultante foi de $941 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{mm}$, gerando uma tensão por flexão de cerca de 192 MPa.

Esse valor é relevante quando comparado às propriedades mecânicas típicas do aço SAE 1020. Embora esteja abaixo do limite de escoamento estimado de aproximadamente 305 MPa, encontra-se muito próximo ao limite de resistência à fadiga. Segundo critérios empíricos, a

resistência à fadiga de aços carbono é aproximadamente $0,4 \times \sigma_u$, o que, considerando uma resistência à tração média de 466 MPa para o SAE 1020, resulta em um limite de fadiga da ordem de 186 MPa. Dessa forma, mesmo em condições de carregamento nominal de 30 toneladas, a peça já trabalha em níveis de tensão equivalentes ou superiores ao limite de fadiga.

Portanto, os resultados preliminares indicam que a falha não ocorreu por defeitos metalúrgicos ou inadequação do material em si, mas sim por uma combinação entre tensões próximas ao limite de fadiga e variações de carregamento no serviço. A peça operou dentro de margens aceitáveis de resistência estática, mas sem a devida segurança para solicitações cíclicas de longo prazo. Isso reforça a necessidade de adoção de fatores de segurança mais conservadores em projetos desse tipo de componente e de inspeções periódicas para detecção precoce de trincas por fadiga.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos indicam que o material corresponde a um aço SAE 1020, confirmado pelas análises de microestrutura, dureza e ensaio de tração. Os ensaios confirmam que a falha da viga caixão foi progressiva e cíclica, causada principalmente por fadiga estrutural sob carregamento excessivo. A integração entre FMEA, Mecânica da Fratura e Metalografia mostrou-se eficaz para identificar causas-raiz e propor medidas preventivas. Os próximos passos incluem o ensaio de tração e o estudo da carga de impacto para estudo de fadiga e a finalização e consolidação dos resultados para recomendações robustas de manutenção e projeto. Desta forma, espera-se encontrar alternativas para aumentar a vida útil da *spreader*, reduzir custos e mitigar riscos operacionais em terminais portuários.

5 REFERÊNCIAS

GUITARRARA, Paloma. Globalização econômica. Brasil Escola. 2023. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/geografia/globalizacao-economica.htm>. Acesso em: 25 abr. 2025

CEPAL – COMISSÃO ECONÔMICA PARA A AMÉRICA LATINA E O CARIBE. Informe portuario 2023-2024: señales mixtas en el comercio y puertos ante nuevas disrupciones.

Santiago: CEPAL, 2024. Disponível em: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/81386-informe-portuario-2023-2024-senalesmixtas-comercio-puertos-nuevas-disrupciones>. Acesso em: 25 abr. 2025.

PIMENTA, Jorge. Matriz FMEA: Análise de Falhas e Efeitos. DocNix, 2 ago. 2023. Disponível em: <https://docnix.com.br/ferramentas-metodos/fmea-na-gestaoda-qualidade/#:~:text=Qual%20a%20hist%C3%B3ria%20do%20FMEA,equipamentos%20utilizados%20nas%20for%C3%A7as%20armadas>. Acesso em: 23 abr. 2005.

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 5ª ed. Rio de Janeiro: ABM, 2008.

TEREX. Manual de manutenção TFC45: reach stacker. [S.l.]: Terex, 2009. 27 p.

TEREX. TFC45h CUMMINS: reach stacker. [S.l.]: Terex, 2017. 48 p.