

Análise de falha por fratura de eixo do sistema de rodado de um distribuidor de fertilizante orgânico líquido¹

Shaft fracture failure analysis of the wheelset system of a liquid organic fertilizer spreader

André Carlos Grotto²
Agenor Dias de Meira Junior³
Márcio Walber⁴

Resumo

Este trabalho apresenta uma avaliação de falha por fratura do eixo do sistema de rodado do implemento agrícola distribuidor de adubo orgânico líquido (DAOL). Ele apresenta uma avaliação da falha, do ponto de vista metalúrgico, através de avaliações macrográficas e micrográficas, determinação da composição química, dureza e microscopia eletrônica de varredura (MEV) do material do eixo. A avaliação da falha também é apresentada em uma perspectiva estrutural, através da análise da falha por fadiga, utilizando o método dos elementos finitos, determinando o coeficiente de segurança e a vida do eixo. A característica da fratura corresponde a de uma falha por fadiga, o ponto inicial da falha é identificado e a região áspera e polida da seção transversal fraturada é avaliada. Além disso, são apresentados o valor da vida útil do eixo em número de ciclos de carga máxima e o coeficiente de segurança para falha por fadiga.

Palavras-chave: Fadiga. Método dos elementos finitos. Micrografia/macrografia.

Abstract

This work presents an evaluation of failure due to shaft fracture of the wheelset system of an agricultural implement of liquid organic fertilizer spreader (LOFS). It presents an evaluation of a failure, from a metallurgical point of view, through macrographic and micrographic evaluations, determination of the chemical composition, hardness and scanning electron microscopy (SEM) of the shaft material. The failure evaluation is also presented in a structural perspective, through a fatigue failure analysis, using the finite element method, determining the safety coefficient and life of the shaft. The characteristic of the fracture corresponds to a failure due to fatigue, the starting point of the failure is identified and the rough and polished region of the fractured cross section is evaluated. In addition, the shaft life value in number of maximum load cycles and the safety coefficient for fatigue failure are presented.

Keywords: Fatigue. Finite element method. Micrograph/macrography.

¹ Este artigo é resultado da disciplina Mecânica da Fratura e da Fadiga dos Metais do PPG em Projeto e Processos de Fabricação na Universidade de Passo Fundo (UPF), RS, Brasil.

² Bacharel em Engenharia Mecânica e mestrando no PPG em Projeto e Processos de Fabricação na UPF. <https://orcid.org/0000-0003-2164-7084>. E-mail: 145084@upf.br

³ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS e mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, Brasil. Professor titular no Departamento de Engenharia Mecânica na UPF. <https://orcid.org/0000-0003-2722-5333>. E-mail: agenor@upf.br

⁴ Doutor em Engenharia Mecânica pela UFRGS e mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS. Professor titular no Departamento de Engenharia Mecânica na UPF. <https://orcid.org/0000-0002-4472-0937>. E-mail: mwalber@upf.br

1 Introdução e contextualização

O distribuidor de adubo orgânico líquido (DAOL) mostrado, na figura 1, é do modelo tipo Tandem, com capacidade de 6.000 litros e peso estimado pelo fabricante de 1.650 kg (peso aproximado do equipamento vazio). Executa as tarefas de sucção e distribuição de adubos, limpeza de fossa séptica, transporte de água e demais produtos viscosos, lavagem de máquinas e galpões, uso em pequenas irrigações, entre outras aplicações. Assim, esse implemento agrícola se tornou essencial para a agricultura, devido à grande gama de utilidades, por serem robustos, de fácil operação e baixo custo de manutenção (MEPEL, 2019).

Por se tratar de uma máquina agrícola que trabalha em condições adversas de terrenos, é comum a falha de componentes mecânicos nesses implementos. Segundo Zhao *et al.* (2019), para cada aplicação, a resistência estática e a durabilidade a longo prazo devem seguir as especificações, evitando muito peso adicional e, portanto, leva à falha de componentes.

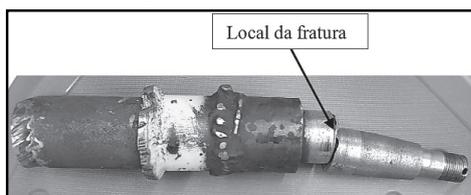
Figura 1 - Distribuidor de adubo orgânico líquido (DAOL)



Fonte: Os autores (2020).

Neste trabalho, é analisada a fratura de uma ponta de eixo do sistema de rodado de um DAOL, mostrada na figura 2. Observou-se que a trinca começou ao lado do raio de arredondamento, logo acima do mancal, onde há um rebaixo (diferença de diâmetro). As falhas dos eixos são causadas principalmente por concentrações de tensões e/ou soldas (CASANOVA, 2011). Em certas situações, o processo de soldagem é mais relevante do que as concentrações de tensão, devido à mudança de seção (AZEVEDO *et al.*, 2013).

Figura 2 - Eixo fraturado



Fonte: Os autores (2020).

O eixo (visto na figura 2) é projetado para vida infinita, sem planejamento de manutenção periódica. Também não existem dados do setor de pós-vendas que definam um histórico de falha desse tipo de componente. Porém, no caso descrito, houve uma falha em campo desse eixo e, por esse motivo, realizou-se o estudo envolvendo a análise metalúrgica e estrutural do mesmo.

Assim sendo, o objetivo específico deste estudo é analisar a falha por fratura de um eixo do rodado de um distribuidor de adubo orgânico líquido, com o intuito de detectar a possível causa da trinca que levou o componente à falha por fratura. Também é objetivo deste trabalho contribuir para o entendimento do fenômeno da falha por fadiga, fornecendo subsídios para a análise pela área industrial desse tipo de problema. A progressão de uma trinca por fadiga ocorre lentamente, no entanto, a ruptura da seção final remanescente é súbita, podendo produzir um acidente com danos materiais e humanos. Dessa forma, o artigo pretende contribuir para evitar falhas desse tipo.

A pesquisa realizada neste trabalho consiste em realizar a análise da falha, avaliar a fratura, sob ponto de vista metalúrgico e sob ponto de vista estrutural. O trabalho foi realizado nos laboratórios da Universidade de Passo Fundo (UPF) e está organizado da seguinte forma: introdução e contextualização, apresentação da base teórica, análise dos aspectos metalúrgicos da falha, incluindo composição química, medição da dureza do material, macrografia, micrografia e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Na sequência, apresenta-se a avaliação da falha, sob ponto de vista estrutural, através de uma análise, utilizando o método dos elementos finitos, determinando o coeficiente de segurança e vida para uma falha por fadiga. Finalmente, ocorrem as discussões e conclusões do estudo.

2 Base teórica

2.1 Falhas estruturais mecânicas: modos de falha independentes do tempo

Segundo Rosa (2002), uma falha é conceituada como sendo a incapacidade do componente responder à demanda que lhe é exigida. Ela pode ocorrer, devido ao tipo de carregamento, tipo de material, condições ambientais, tempo de vida, falta de manutenção, modos que não são influenciados pela idade do componente e tempo de aplicação do carregamento. Também se deriva de defeitos no material, que podem ocorrer desde o processo de fabricação ou surgir pela operação/serviço.

Segundo Strohaecker (2008), as falhas que ocorrem, independente do tempo, podem ser do modelo dúctil ou frágil. A fratura dúctil é caracterizada por uma apreciável deformação plástica na nucleação e na propagação da trinca, apresentando coalescência de microcavidades (vazios). Essa deformação plástica é encontrada em nível macroscópico na superfície da trinca. Pode-se ainda descrever que materiais dúcteis se rompem por cisalhamento ao longo do plano de máxima tensão de cisalhamento (ROSA, 2002; SILVA *et al.*, 2017).

A fratura frágil se caracteriza por uma grande velocidade de propagação da trinca, com pequena deformação plástica, mesmo em nível microscópico. O micromecanismo da fratura frágil é a clivagem transgranular. Esses materiais rompem-se em função das tensões de tração decorrentes, sendo o ângulo entre os dois planos de máxima tensão de 45 graus (direções longitudinais e transversais) (ROSA, 2002; SILVA *et al.*, 2017). Por outro lado, muitas falhas estruturais catastróficas, envolvendo perda de vidas, ocorreram como resultado de uma quebra repentina e fratura inesperada (GDOUTOS, 2005). A história da tecnologia está repleta de tais incidentes, um grande número de desastres, envolvendo falhas de pontes, tanques, canos, armas, navios, ferrovias e estruturas aeroespaciais.

A superfície de fratura de um corpo pode apresentar três regiões bastante distintas: zona fibrosa corresponde à propagação estável da trinca para cargas crescentes; zona radial corresponde à propagação instável de trinca; zona cisalhada que ocorre numa inclinação de 45° de eixo de tração em consequência do alívio de triaxialidade, devido à presença de uma superfície livre (STROHAECKER, 2008).

2.2 Falhas estruturais mecânicas: modos de falha dependentes do tempo

Segundo Branco, Fernandes e Castro (1999), fraturas podem ocorrer em situações de baixa tensão nominal em componentes sujeitos a cargas que variam ciclicamente, e que essas fraturas ocorrem usualmente numa mudança de seção ou na vizinhança de um entalhe. Segundo Norton (2013), os ciclos de tensão podem ser de três tipos: ciclo de tensões alternadas, quando a tensão alterna entre uma tensão máxima e uma tensão mínima de igual magnitude; ciclo de tensões repetidas, quando as tensões máximas e mínimas são assimétricas em relação ao nível zero de tensão; ciclo de tensões aleatórias, onde as tensões assumem quaisquer valores aleatórios em relação ao nível zero de tensões. Em relação às falhas dependentes do tempo, a que se destaca é a fadiga.

Esse modelo de falha gera a redução da capacidade de carga de componentes estruturais pela ruptura lenta do material, através do avanço quase infinitesimal da trinca a cada ciclo de carregamento. Ela ocorre em uma descontinuidade local, através de tensões que variam com o tempo e provocam deformações plásticas cíclicas localizadas. Essas deformações levam a uma deterioração do material e originam uma trinca de fadiga. Se o carregamento variável prosseguir, a trinca cresce até atingir o tamanho suficiente para produzir a ruptura final. Em relação às tensões, a mais importante para a propagação das trincas são as tensões de tração (ROSA, 2002; AZEVEDO, 2020).

A fadiga pode ser definida como sendo o processo com alteração estrutural progressivo, localizado e permanente, que ocorre em materiais submetidos a condições que produzem variações de tensão e deformações em um ou mais pontos do material e que possa culminar em trincas ou falhas completas, após um número suficiente de flutuações ou ciclos (GODEFROID; CÂNDIDO; MORAIS, 2011). O mecanismo da fadiga compreende as seguintes fases sucessivas (BRANCO; FERNANDES; CASTRO, 1999): nucleação ou iniciação da fissura de fadiga, propagação dessa fissura e ruptura final. A iniciação da fissura de fadiga ocorre normalmente à superfície do corpo. Uma vez iniciada, a propagação da fissura se dá em três fases: a fase I consiste num crescimento a 45° relativo à direção da sollicitação. Na fase II, a fissura tende a se propagar perpendicularmente à sollicitação externa, até que, finalmente, seja atingido um valor crítico de comprimento de trinca e ocorre a ruptura final.

O ponto de início e nucleação da falha está localizado em um local, onde o nível de sollicitação ultrapassou o nível de resistência. Nesses pontos ocorrem concentradores de tensões, devido principalmente a alterações de geometria, entalhes, alterações de propriedades elásticas e devido a cargas concentradas. Esses concentradores geram efeitos extremamente prejudiciais à falha por fadiga e na falha por fratura frágil, no entanto, causam poucos efeitos na falha por fratura dúctil (ROSA, 2002).

Em eixos, os concentradores de tensões ocorrem, principalmente, por mudança de diâmetro ou por rasgos de chavetas. Inclusões presentes no material também ajudam a acelerar a nucleação de trincas por fadiga, pois as inclusões reduzem a resistência. Aumentar a tenacidade por tratamento térmico, redução de tamanho de grão, limpeza, entre outros, aumentam a resistência à nucleação de trincas por fadiga em concentradores de tensão (ROSA, 2002; CASANOVA, 2011).

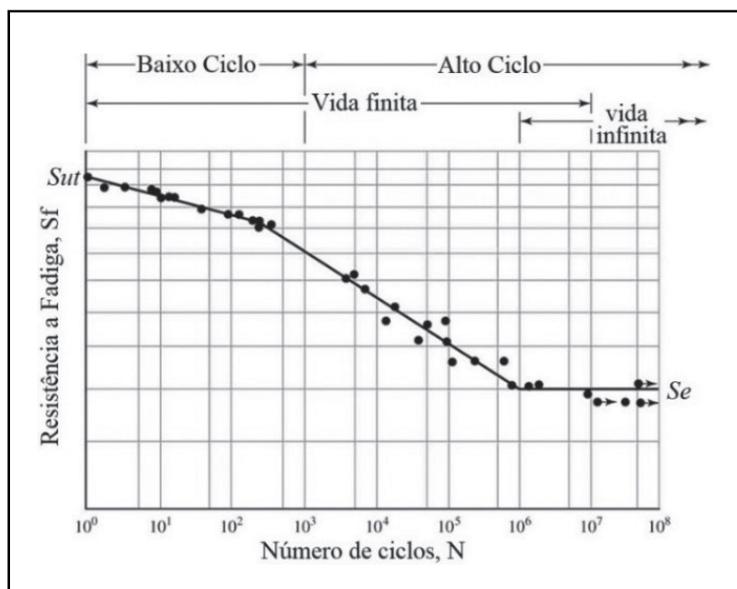
O efeito da fadiga gera redução gradual da capacidade de carga do componente, devido à ruptura lenta do material, consequência do avanço quase infinitesimal das fissuras que se formam no seu interior. O colapso se produz pela propagação de uma micro-trinca em forma lenta, até que a mesma atinja um tamanho crítico que acabe por produzir a falha por fratura do material. Em fadiga, têm-se três estágios: a iniciação da trinca; a propagação da trinca; a propagação instável, quando a trinca atinge seu tamanho crítico e o componente rompe por fratura frágil ou por colapso plástico ou ainda por uma interação dos dois mecanismos de ruptura (ROSA, 2002).

Para evitar a ocorrência da fadiga mecânica, deve-se tentar minimizar concentradores de tensões, selecionar materiais que possuam vida em fadiga suficiente para o serviço cíclico previsto, eliminar cantos vivos, minimizar marcas de esmerilhamento e entalhes na superfície dos componentes, evitar desalinhamento de soldas e minimizar defeitos de

soldagem e remover rebarbas ou marcas causadas por usinagem (ROSA, 2002).

Outro fator de grande importância, quando se deseja analisar um componente mecânico, é a vida finita do mesmo, ou seja, número de ciclos até a falha para uma dada amplitude ou faixa de tensões. As curvas S-N (Stress-Number of cycles), também conhecida como curva de Wöhler, caracterizam a magnitude da força aplicada sobre o componente pelo número de ciclos, com uma determinada carga até o rompimento. Através do levantamento da curva S-N (figura 3), pode-se demonstrar o comportamento do material, quanto a sua resistência à fadiga (SHIGLEY; BUDYNAS; NISBETT, 2011). O limite de resistência à fadiga de um material é determinado experimentalmente, através de um ensaio de flexão rotativa (HALL; HOLOWENKO; LAUGHLIN, 1961). Observar que o limite de resistência à fadiga para um aço permanece constante, a partir de um valor limite de tensão e um tempo de vida em torno de um milhão de ciclos de inversão de carga.

Figura 3 - Curva S-N



Fonte: Shigley, Budynas e Nisbett (2011).

Conforme demonstrado na figura 3, quanto ao número de ciclos, classifica-se a fadiga em fadiga de baixo ciclo, com número de até 10^3 ciclos ou fadiga de alto ciclo, com número de ciclos superior a 10^3 ciclos. Se considerarmos apenas a vida finita, Rosa (2002) descreve que o regime de vida finita se encontra entre 10^3 e 10^6 ciclos (figura 4).

A relação de tensões pode ser expressa em termos de S_{1000} e S_e , onde S_{1000} é a resistência à fadiga em 10^3

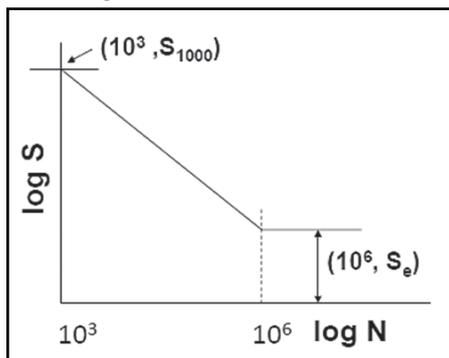
ciclos e S_e é o limite de resistência à fadiga em 10^6 ciclos. Considera-se S_{1000} igual a 0,9 vezes o limite de resistência à tração (S_{ut}), e S_e igual a 0,5 vezes o limite de resistência à tração (S_{ut}) (ROSA, 2002).

2.3 Análise metalográfica: macrografia e micrografia

Em relação às análises de falhas, a análise metalográfica mostra-se de grande importância, podendo ser macrográfica ou micrográfica (ROHDE, 2010). Na

macrográfica, é possível identificar condições e modos de carregamento e fornecer dados para análises quantitativas. Na micrográfica, é possível identificar micromecanismos de falha, identificar a presença de inclusões e auxiliar na identificação de condições ambientais (ROSA, 2002). A análise de metalografia procura controlar a qualidade estrutural de um produto metalúrgico. Ela busca relacionar a estrutura íntima do material com as suas propriedades físicas, com o processo de fabricação, com o desempenho de suas funções e outros.

Figura 4 - Curva vida finita



Fonte: Rosa (2002).

Conforme descrito por Rohde (2010), no ensaio macrográfico, examina-se o aspecto de uma superfície a olho nu ou com pouca ampliação (até 50X). Através dessa análise, tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, à natureza e à propagação da trinca e ao processo de fabricação. Rosa (2002) também descreve que a macrografia identifica possíveis condições de carregamento, possíveis modo de carregamento (torção, axial, flexão) e dados para análise quantitativa (tamanho do defeito crítico).

Segundo Rohde (2010), a etapa de micrografia consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com auxílio do microscópio, onde se observa as fases presentes e identifica-se a granulação do material (tamanho de grão), o teor de carbono, a natureza, a forma, a quantidade e a distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões. Rosa (2002) também descreve que a micrografia identifica micromecanismo de falha (dúctil, frágil, cíclico, intergranular, transgranular), identifica a presença de inclusões e auxilia na identificação de condições ambientais.

Ainda, segundo Rohde (2010), o corte longitudinal permite verificar se a peça é fundida, forjada ou laminada (processo de fabricação), se a peça foi estampada ou torneada, qualidade da solda, a extensão de tratamentos térmicos superficiais, etc. Já o corte transversal permite verificar a natureza do material,

a homogeneidade, segregação, a forma de dimensões das dendritas, a profundidade de têmperas, presença de defeitos, entre outros.

2.4 Método dos elementos finitos

Segundo Rao (2004), a idéia básica do método dos elementos finitos é encontrar a solução de problemas complicados, através da substituição do mesmo, por problemas mais simples, encontrando-se, a partir do problema mais simples, soluções aproximadas. As ferramentas matemáticas existentes não são suficientes para encontrar soluções exatas (às vezes, mesmo soluções aproximadas) para muitos dos problemas práticos. Dessa forma, na ausência de outro método conveniente para aproximar uma solução para problemas práticos e reais, utiliza-se o método dos elementos finitos. No método dos elementos finitos, a região de interesse é construída, através de sub-regiões pequenas e interconectadas, chamadas de elementos finitos (COOK; MALKUS; PLESHA, 1988). Uma geometria de forma complexa, para a qual é muito difícil encontrar uma resposta exata (em termos de deslocamentos e tensões), sob condições de contorno especificadas (vínculos e carregamentos), é aproximada, dividindo-a em muitas partes pequenas (elementos), num modelo de elementos finitos. Para cada peça ou elemento, uma solução aproximada é assumida e as condições de equilíbrio da estrutura são obtidas. A satisfação dessas condições produz uma solução aproximada para deslocamentos e tensões. Através de um processo de síntese, une-se as soluções de cada parte, obtendo-se a solução do todo (global).

A simulação numérica para análise de causas de falhas tem-se mostrado uma ferramenta poderosa que permite a operação virtual de um sistema em condições controladas e auxilia na observação de causas de falhas muito próximas às condições reais (AZEVEDO, 2020).

O método dos elementos finitos (MEF) é um método aproximado de cálculos de sistemas contínuos, ou seja, um método de solução de equações diferenciais. A estrutura avaliada é subdividida (discretizada) em números finitos de partes (os elementos), conectadas entre si por pontos que são conhecidos como nós, formando assim, uma malha. Na análise estrutural, os parâmetros são os deslocamentos nodais, os quais são as incógnitas do problema. Em elementos sólidos de geométrica tridimensional (projeto mecânico), a geração da malha é um dos fatores mais importantes e é gerada, sob o volume do modelo sólido geométrico, construído previamente (ALVES FILHO, 2011).

Alves Filho (2011) descreve que a malha de elementos finitos é uma das características principais do

modelo de MEF. Em relação à realização da análise, existe uma sequência básica de etapas de aplicação que abrange o pré-processamento, o processamento e o pós-processamento. O pré-processamento é feito, antes da realização de qualquer cálculo computacional e é subdividido em problema estrutural, planejamento do modelo em elementos finitos, elaboração da malha de elementos finitos e condições de contorno. No processamento, onde são efetuados os cálculos matriciais, são geradas soluções. Já no pós-processamento, são interpretados e verificados os resultados, podendo ser também analisados pelo uso de recursos gráficos, que permitem visualizar as variações de tensões nos componentes do objeto, através da associação de uma escala de cores (ALVES FILHO, 2011).

Um cuidado que se deve ter é em relação à singularidade de tensão, decorrente de pontos próximos de restrições, arestas e cantos vivos. Quando o modelo é discretizado, para cálculo dos deslocamentos, os cantos vivos acabam por gerar arestas com áreas muito próximas de zero e, conseqüentemente, a tensão se eleva e tende ao infinito. Os principais pontos de singularidade de tensões são nos carregamentos ou apoios concentrados, em locais com mudança

brusca de geometria (cantos vivos), descontinuidade de apoios e em apoios paralelos à fronteira do canto vivo. Nos pontos de singularidade, as tensões são elevadíssimas e não fazem sentido para a análise que está sendo realizada. Para solucionar isso, deve-se levar em consideração o princípio de St Venant que afirma que o efeito da descontinuidade local não afeta a distribuição de tensão em uma certa distância a esse ponto. Ou seja, esse princípio permite que os pontos de singularidade de tensão sejam desconsiderados (AMUCHASTEGUI, 2016).

3 Análise dos aspectos metalúrgicos da falha

3.1 Composição química do material

Para a realização da análise de composição química, utilizou-se o espectrômetro de emissão ótica da marca FOUNDRY-MASTER Xline, Série 59R0180, conectado ao programa FE 100. Na análise realizada, utilizou-se um gás argônio para gerar o ambiente inerte para análise. Dessa forma, através da queima do material, foi possível observar a composição química do mesmo, a composição resultante pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química obtida na análise em % por peso

Grau	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
Peso (%)	97,8000	0,4810	0,2610	0,8400	0,0374	0,0304	0,0958	0,0136	0,0495	0,0683
Grau	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn	B	Ca
Peso (%)	0,0042	0,0338	0,0184	0,0051	0,0099	0,0492	0,0142	0,0194	0,0036	0,0005

Fonte: Os autores (2020).

A partir da avaliação da composição química, pode-se afirmar que o material da ponta de eixo é o Aço SAE 1045. Isso pode ser comprovado, comparando a composição química encontrada para o material analisado e a composição química especificada para o Aço SAE 1045 (tabela 2), onde se verifica que todos os percentuais dos componentes químicos ficaram dentro da faixa especificada para

esse aço. Segundo a NBR 172/2000, o aço SAE 1045 é classificado como aço para construção mecânica com teor de carbono médio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2000). Na tabela 3, apresenta-se um resumo das principais propriedades mecânicas desse material, as quais serão utilizadas nas análises seguintes (SHIGLEY; BUDYNAS; NISBETT, 2011).

Tabela 2 - Composição química especificada e encontrada para o componente em % por peso

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
Especificado SAE 1045	0,42 – 0,50	0,15 – 0,35	0,60 – 0,90	máx 0,04	máx 0,05
Encontrada	0,481	0,261	0,840	0,0374	0,0304

Fonte: AÇOESPECIAL (2019).

Tabela 3 - Propriedades do Aço SAE 1045

Material	Processamento	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao escoamento (MPa)	Alongamento em 2 in (%)	Redução em área (%)	Dureza Brinell
SAE 1045	HR	570	310	16	40	163
	CD	630	530	12	35	179

Fonte: Shigley; Budynas; Nisbett (2011).

3.2 Dureza do material

Examinou-se a dureza do material na seção transversal e na seção longitudinal. Essa análise ocorreu,

através do ensaio de microdureza, realizado com carga de 200 gramas na escala Vickers (HV), onde houve uma amostragem de cinco medições em cada seção. Os resultados são apresentados na tabela 4.

Tabela 4 - Resultado da microdureza

Medições	1	2	3	4	5	Média
Transversal	249	235	234	222	234	234,8±9,57
Longitudinal	231	244	215	211	208	221,8±15,25

Fonte: Os autores (2020).

Comparando os resultados de dureza do material (tabela 4) com a dureza listada para o aço SAE 1045 (tabela 3), observa-se que os valores encontrados estão acima dos valores típicos do aço SAE 1045, observando que a conversão da dureza Vickers para a Brinnell é direta. Como o aço SAE 1045 não tem controle rigoroso de produção, que somente é feita para aços ligas, pode-se ter uma variação maior, em relação aos valores típicos.

3.3 Análise macrográfica

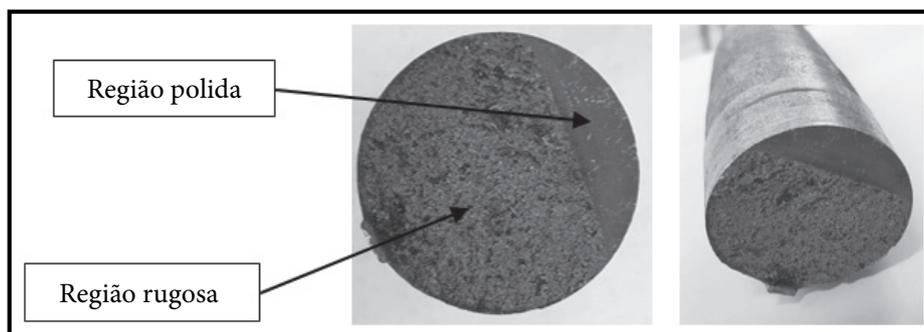
Nessa etapa, inspecionou-se a olho nu e com um estereomicroscópio a superfície da peça, onde ocorreu a ruptura. A análise foi realizada com um estereomicroscópio marca Zeiss, com uma ampliação da superfície de até 50X, possibilitando avaliar com mais clareza, o aspecto geral da fratura.

Na figura 5, está demonstrada a peça em escala real. Após a análise a olho nu, realizou-se uma varredura na sessão na fratura com estereomicroscópio podendo ser vista na figura 6 (A, B, C, D e E), com o objetivo de se detectar algum possível ponto de início da trinca.

Com base nas imagens obtidas na macrografia, pode-se observar dois aspectos na superfície, onde ocorreu a ruptura. A região polida, observada na figura 5 e figura 6 (B), trata-se da região, onde a trinca iniciou e subsequentemente progrediu. Já na figura 5 e figura 6 (A), 6 (C), 6 (D) e 6 (E), observa-se a região rugosa, representando o local final da falha. Isso também pode ser comprovado, devido à rebarba na extremidade da região rugosa, vista na figura 5, região rugosa, e figura 6 (A), a qual está na extremidade oposta a região polida e representa o ponto final de ruptura do eixo, onde ocorreu uma plastificação na ruptura final, decorrente do estado plano de tensões.

Ou seja, a região polida demonstra o local de propagação e crescimento estável da trinca, não deixando claro o ponto de início da mesma, devido à região apresentar linhas paralelas. Já a região rugosa demonstra região final de ruptura, onde ocorreu uma propagação instável da trinca e conseqüentemente uma ruptura súbita. Dessa forma, essas duas regiões demonstram características típicas e evidentes de que o colapso da peça ocorreu, devido a uma falha por fadiga.

Figura 5 - Imagens da região da peça fraturada em escala real

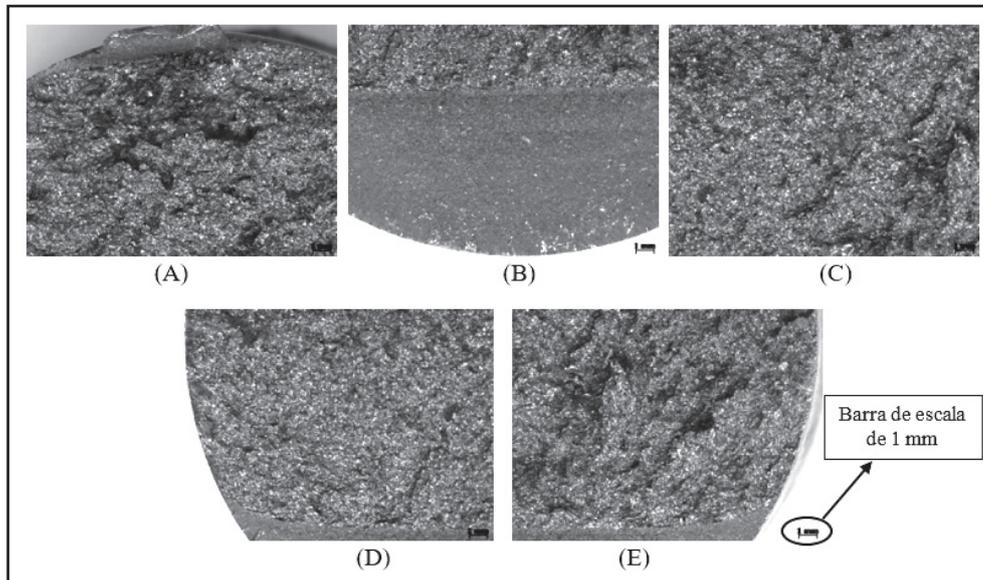


Fonte: Os autores (2020).

A análise macrográfica também detectou algumas regiões com maiores chances de serem as responsáveis

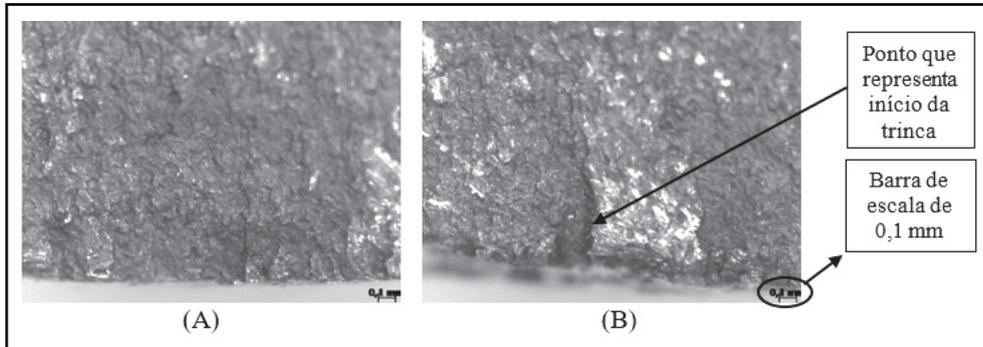
pelo início da trinca e, posteriormente, a fratura, as quais são apresentadas na figura 7 (A) e (B).

Figura 6 - Imagens obtidas com o auxílio do estereomicroscópio com aproximação 6,5X. (A) apresenta a região final da trinca; (B) apresenta a região polida de início da trinca; (C), (D) e (E) apresenta locais diferentes da região rugosa da fratura



Fonte: Os autores (2020).

Figura 7 - Imagens obtidas com o estereomicroscópio, com aproximação em 50X. (A) apresenta uma região da superfície; (B) apresenta uma segunda região da superfície com identificação de imperfeição



Fonte: Os autores (2020).

Por fim, pode-se afirmar que nas macrografias não se observou a presença de microcavidades na região rugosa, mas sim, uma região de fratura com característica de fratura frágil, o que é característica de uma fratura, por fadiga, com ruptura final, com propagação instável de trinca. Na região polida, foi possível identificar os pontos de início da trinca (figura 7). Esse ponto de início da trinca ficará mais evidente na análise por microscópio eletrônico de varredura, que será apresentado na sequência. Outro ponto a destacar é que, mesmo o material do eixo, sendo um material dúctil, não se observou a presença de grandes deformações.

3.4 Análise micrográfica

A análise micrográfica foi realizada, a partir de corpos de prova de uma amostra da seção da peça, onde ocorreu a trinca. Foram preparadas duas amostras, uma do corte na seção transversal e a outra na seção longitudinal.

Para a confecção do corpo de prova, realizou-se um corte na seção do eixo, onde ocorreu a ruptura, para a extração da amostra. Esse corte foi realizado por um disco abrasivo em uma máquina policorte, intensamente refrigerado, para evitar deformações e alterações microestruturais, devido ao aquecimento.

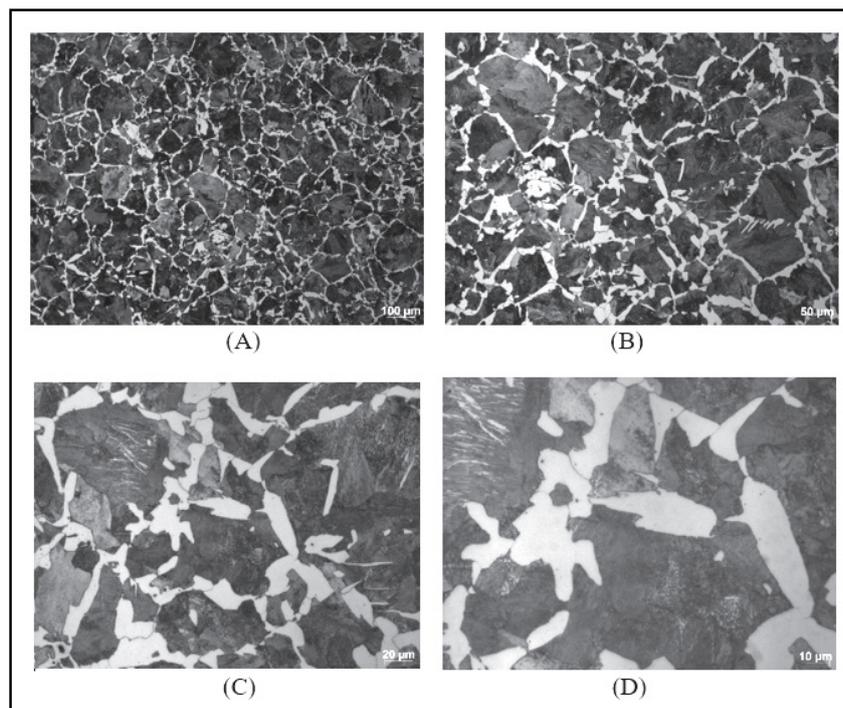
Primeiramente, foi retirada uma seção da peça no local, onde ocorreu a fratura. Em seguida, retirou-se uma nova seção e, através da mesma, foi gerado um corte longitudinal e um corte transversal. Como o corte da seção transversal e da seção longitudinal, resultou em amostras pequenas de material, realizou-se o embutimento a quente nessas amostras, com a finalidade de facilitar o manuseio das mesmas. Esse embutimento foi realizado em uma embutidora Panambra Struers, modelo TempoPress, com a seção de análise voltada para baixo.

Posteriormente, ao embutimento, foi realizado um lixamento sequencial em uma bancada, utilizando uma lixa de granulometria 220, 400, 600 e 1200 μm . Após o lixamento, foi executada

a operação de polimento, através de uma politriz, marca Panambra Struers. Essa operação visa um acabamento superficial polido, isento de marcas e em perfeitas condições para a realização da análise metalográfica. O processo de polimento foi realizado manualmente, onde se utilizou água destilada e abrasivo de alumina de granulometria 1 μm . Com a amostra polida, o próximo passo é a realização do ataque químico. O reagente ácido Nital (2%) foi colocado em contato com a superfície da peça, por tempo suficiente, para revelar a microestrutura.

Para a análise micrográfica, utilizou-se um Microscópio Óptico Zeiss axio modelo Scope A1. As imagens da seção transversal, obtidas através do microscópio óptico, estão apresentadas na figura 8 (A) a (D).

Figura 8 - Microestrutura perlítica e ferrítica da seção transversal. (A) apresenta uma aproximação de 100X; (B) aproximação de 200X; (C) aproximação de 500X; (D) aproximação de 1000X

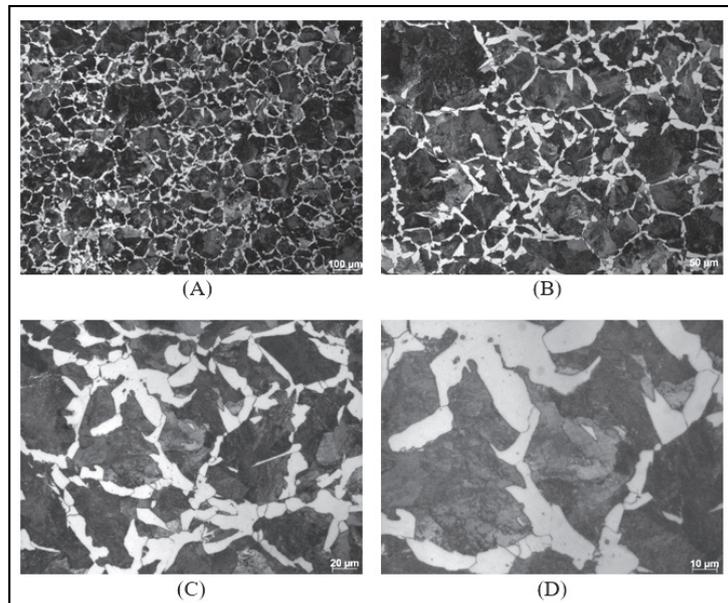


Fonte: Os autores (2020).

Através da figura 8, pode-se observar a microestrutura do material e avaliar que ele possui regiões claras, que demonstram a presença de ferrita e regiões escuras, que representam a presença de estrutura lamelar de perlita. Já as imagens da seção longitudinal, obtidas através do microscópio óptico, podem ser vistas na figura 9 (A) a (D).

Nas figuras 8 e 9, observa-se a presença de ferrita e perlita. Devido ao não alinhamento da microestrutura dos grãos, na amostra da seção longitudinal, foi assumido o material como sendo laminado a quente e sem efeito de encruamento e, também, não foi observado nem um aspecto que comprovasse a realização de algum tratamento superficial no eixo.

Figura 9 - Microestrutura perlítica e ferrítica da seção longitudinal. (A) apresenta uma aproximação de 100X; (B) aproximação de 200X; (C) aproximação de 500X; (D) aproximação de 1000X



Fonte: Os autores (2020).

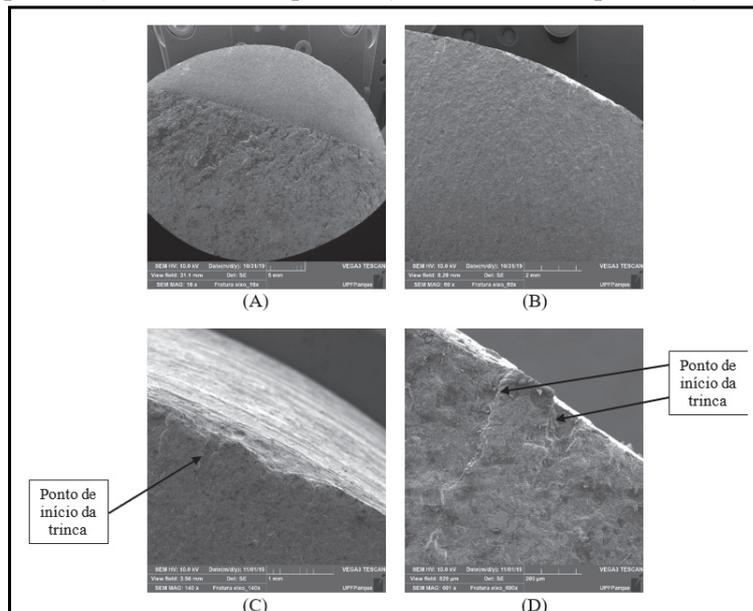
Por fim, comparando a análise química com a quantidade de ferrita e perlita observadas nessa etapa da análise macrográfica, observa-se que as proporções são características de um Aço SAE 1045.

3.5 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As amostras foram analisadas em um microscópio

eletrônico de varredura. O MEV utilizado é da marca Tescan, modelo Vega3, para análise da superfície de fratura. Após a seção da ruptura ser limpa com acetona e ultrassom, realizou-se a análise. As imagens da região de iniciação da falha estão apresentadas na figura 10.

Figura 10 - Análise no MEV da seção da ruptura. (A) apresenta aproximação de 16X; (B) aproximação de 60X; (C) aproximação de 140X; (D) aproximação de 600X



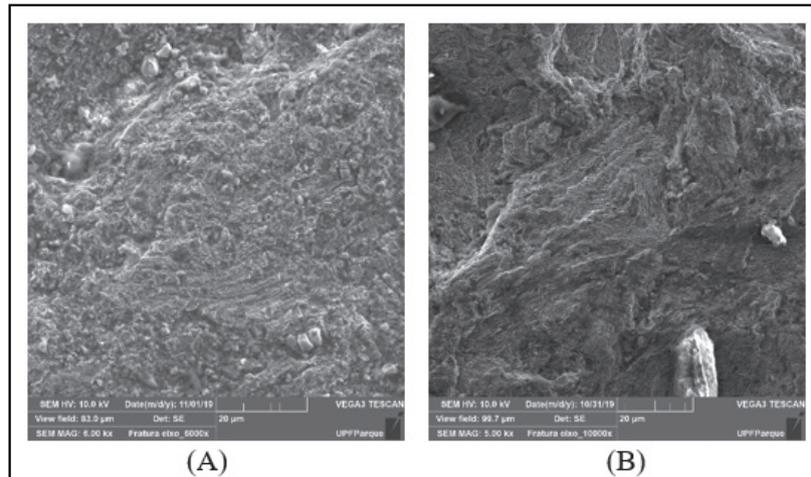
Fonte: Os autores (2020).

Na figura 10 (A), se observa uma região polida e outro rugosa, como havia sido descrito anteriormente. Nas figuras 10 (A, B, C e D), é possível ver, com uma aproximação crescente, o local de início da trinca. A figura 10 (D) demonstra nitidamente uma imperfeição na borda da região superficial, a qual foi a causadora do início da trinca.

A figura 11 demonstra com mais aproximação a região rugosa da fratura.

Através da avaliação da figura 11 (A e B), pode-se observar, novamente, uma fratura com característica de estrutura frágil, com aspecto plano, com facetas lisas de fratura.

Figura 11 - Ampliações da região da fratura no MEV.
(A) apresenta aproximação de 6000X; (B) aproximação de 10000X



Fonte: Os autores (2020).

3.6 Síntese da avaliação da fratura, sob ponto de vista metalúrgico

A avaliação da falha, sob ponto de vista metalúrgico, leva-se a afirmar que a falha ocorreu por fadiga do material. Pela avaliação macrográfica, não se observou a presença de microcavidades na região rugosa, mas sim, uma região de fratura com característica de fratura frágil, o que ocorre na ruptura final da seção com propagação instável de trinca. Na região polida, foi possível identificar os pontos de início da trinca, confirmados pela Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). A análise micrográfica mostra que o material tem uma microestrutura compatível com a de um aço SAE 1045, o que também é demonstrado pela análise química. Já, em relação a tratamentos térmicos, com a análise microscópica e MEV, não se identificou nem um tratamento térmico superficial no eixo.

4 Análise por método dos elementos finitos

Apresenta-se a análise de uma ponta de eixo do sistema de rodado de um DAOL do modelo Tandem (figura 1). O modelo Tandem apresenta a característica de possuir dois rodados traseiros interligados e,

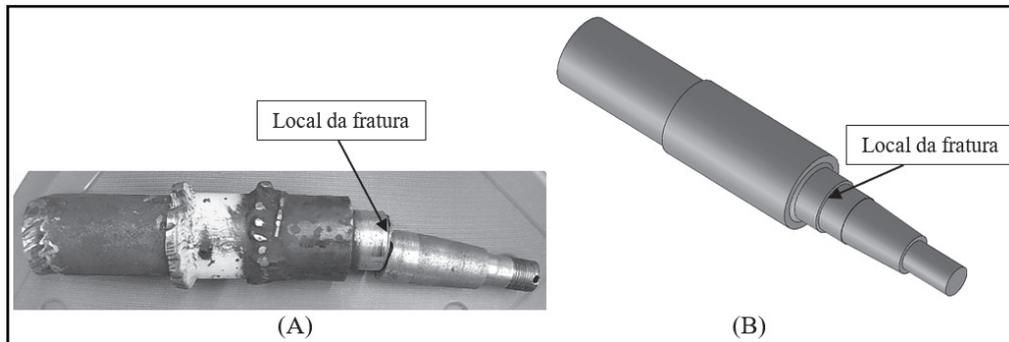
na parte frontal, ser apoiado pelo cabeçalho sobre a barra de tração do trator agrícola.

Para a construção do modelo, tanto do eixo quanto do sistema Tandem como um todo, foi realizado um levantamento geométrico da peça de um implemento agrícola similar, e todas as dimensões foram obtidas, através de medição ou pelo catálogo do fabricante. Assim, isso possibilitou uma representação mais próxima possível da realidade. O modelamento 3D foi gerado, através do *software* SolidWorks.

A figura 12 (A) demonstra a real peça, com ruptura total da seção, e a figura 12 (B) representa o modelo sólido do eixo.

O eixo é de grande importância, por gerar a ligação entre o implemento e os rodados, e é responsável por sustentar todo o peso do DAOL. Além disso, o eixo desempenha a função de manter a posição das rodas uma em relação a outra e ao corpo do implemento. Ao analisá-lo, observou-se que a falha ocorreu no local, onde havia um rebaixo, devido a uma mudança de diâmetro, o que acabou por gerar concentradores de tensões. Esse rebaixo é utilizado para a fixação do rolamento (encosto) que conecta o eixo com o rodado (pneu).

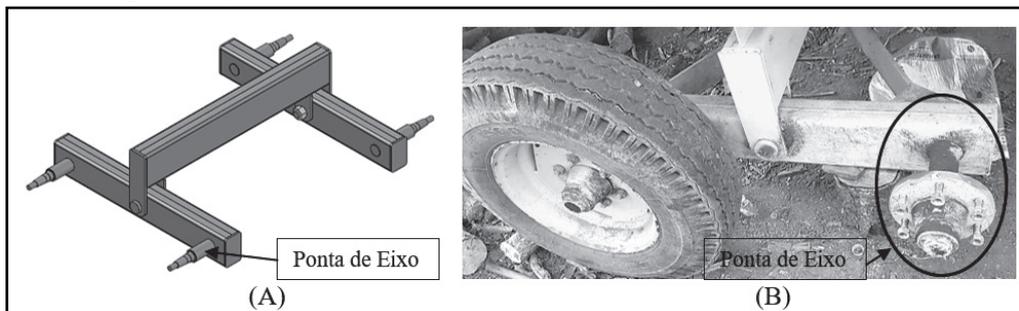
Figura 12 - Peça real fraturada (A) e representação esquemática (B)



Fonte: Os autores (2020).

Na figura 13 (A), é possível ver o modelo sólido do sistema Tandem. Já, na figura 13 (B), mostra-se o local no implemento, onde o eixo analisado se encontra.

Figura 13 - Representação sistema Tandem (A) e local do implemento, onde o eixo se encontra (B)



Fonte: Os autores (2020).

Após a geração da geometria, através do *software* CAD, o próximo passo foi importar a geometria para o *Software Ansys Workbench*, o qual é responsável por executar a análise por MEF. Para uma simplificação do DAOL e para um menor custo computacional, modelou-se apenas os componentes de interesse para a avaliação das tensões geradas no local da ruptura do eixo.

A malha foi gerada com sólidos tetraédricos e quadriláteros com 3 graus de liberdade em cada nó. O tamanho dos elementos variou, conforme a geometria e

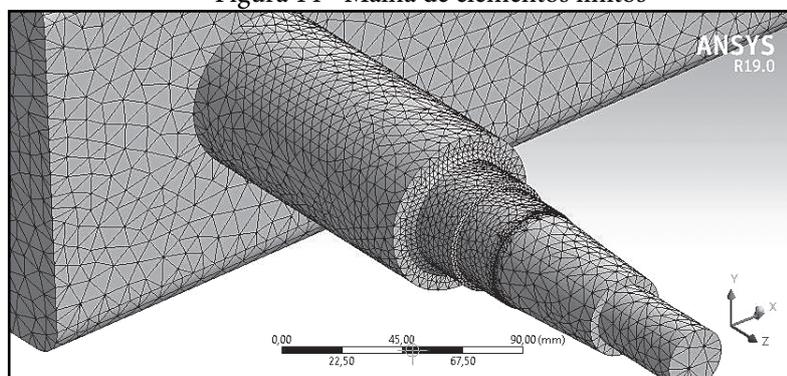
as dimensões de cada componente e, refinada em pontos com geometria mais complexa. A tabela 5 apresenta a quantidade de elementos e nós utilizados na simulação, e a malha no eixo pode ser vista na figura 14.

Tabela 5 - Quantidade de elementos e nós para a análise

Quantidade de elementos	Quantidade de nós
47.2127	89.1386

Fonte: Os autores (2020).

Figura 14 - Malha de elementos finitos



Fonte: Os autores (2020).

O DAOL possui um peso estimado, quando está vazio, de 1.650 kg, e sua capacidade máxima é de 6.000 litros. Considerou-se o equipamento como estando completamente cheio de água, com um carregamento aproximado de 6.000 kg. Considerando a pior condição possível, o carregamento máximo aplicado será de 7.650 kg (soma da massa do equipamento e a massa dos 6.000 litros de água).

O DAOL é tracionado por um trator agrícola, através de um engate tipo reboque. Para o cálculo dessa força, utilizou-se o princípio de força de D'Alembert (equação 1).

$$F = \left[\frac{W}{g} \right] \times A_x \quad (1)$$

Onde F é a força de tração (N); W é a peso (N); g é a aceleração gravitacional (m/s^2) e A_x é a aceleração na direção do movimento (m/s^2). A_x pode ser calculado, através da equação 2.

$$A_x = \left(\frac{g}{W} \right) \times \left(\frac{P}{v} \right) \quad (2)$$

Onde P é a potência para tração (Watts) e v é a velocidade de movimento (m/s). Considera-se que o equipamento será tracionado por um trator de 132 cv (97086 W), e o deslocamento ocorrerá em uma

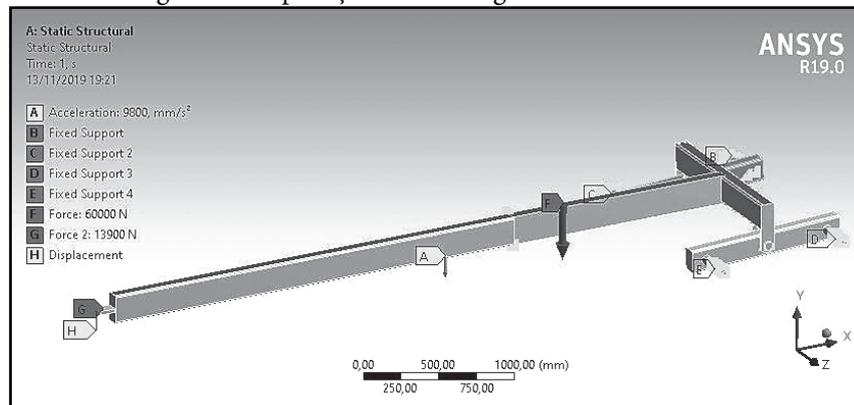
velocidade de 25 km/h (6,94 m/s). Juntando a equação 1 e a equação 2, obtém-se a equação 3.

$$F = \left[\frac{W}{g} \right] \times \left(\frac{g}{W} \right) \times \left(\frac{P}{v} \right) = \frac{P}{v} \quad (3)$$

As condições de contorno são apresentadas na figura 15. Foram aplicadas as condições máximas de carregamento, para assim, simular a pior condição de trabalho do DAOL. O carregamento de 60.000 N foi distribuído sobre toda a estrutura e corresponde ao valor da capacidade máxima de carga do implemento.

A força de tração de 13.989 N foi aplicada no local do engate tipo reboque, onde ocorre a união do implemento com o trator agrícola. As vinculações (restrição de movimento no eixo Y) foram aplicadas nos quatro eixos nas superfícies de encaixe dos rolamentos e na superfície interna do furo do engate do trator agrícola. Para possibilitar a representação do apoio e tração no pino de engate (ponto H e G), necessitou-se representar uma barra longitudinal como ligação elástica, a qual tem por função substituir o tanque do implemento e, conseqüentemente diminuir a complexidade do modelo analisado. Também foi ativada a aceleração gravitacional, para simular os esforços gerados, devido ao peso da estrutura.

Figura 15 - Aplicações dos carregamentos na estrutura



Fonte: Os autores (2020).

Na análise por fadiga, considera-se carga repetida *Zero-Based*, sendo uma carga repetida, variando de zero ao valor máximo. As curvas de tensões aplicadas são apresentadas na figura 16. O critério de falha adotado foi o DE-Goodman.

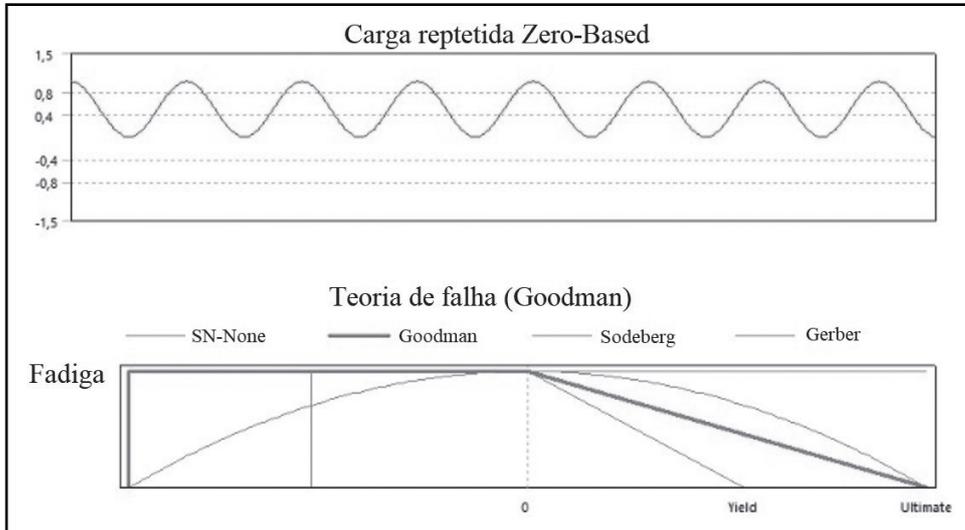
O gráfico tensão x número de ciclos de vida, para análise de vida finita, é apresentado na figura 17. O valor de S_{1000} (resistência à fadiga para 1.000 ciclos) e S_e (limite de resistência à fadiga) são calculados, a partir do limite de resistência à tração de 570 MPa (tabela 3). Assim, encontrou-se S_{1000} igual a 513 MPa

($S_{1000} = 0,9 \times 570$ MPa) e S_e igual a 285 MPa ($S_e = 0,5 \times 570$ MPa). Não se considerou nem um fator de redução da resistência à fadiga (fator superficial, tamanho e confiabilidade) para a geração da curva ($S \times N$).

O resultado encontrado para a análise de tensões está apresentado na figura 18. O critério de falha, utilizada para a análise de tensões, foi o critério de falha de DE Goodman. O critério DE (Distortion Energy), ou seja, Teoria de Energia de Distorção é também conhecida como teoria de Von-Mises. Segundo Shigley, Budynas e Nisbett (2011), a falha por escoamento de

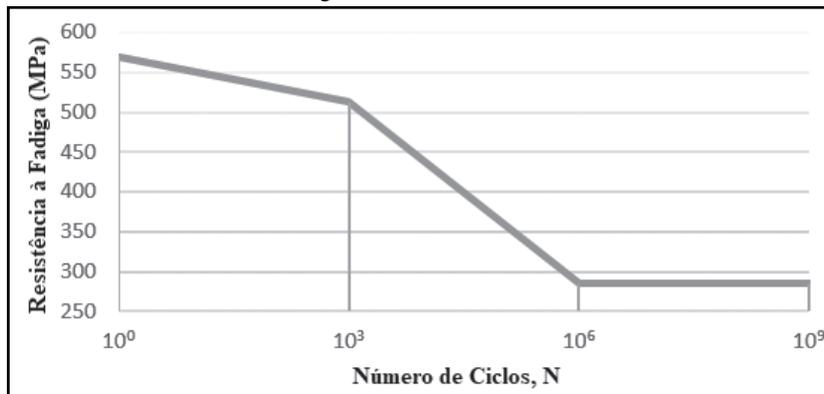
um material ocorre, quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede a energia de deformação por unidade de volume no escoamento, sob tração ou compressão simples.

Figura 16 - Carga repetida e Teoria de Falha (Goodman)



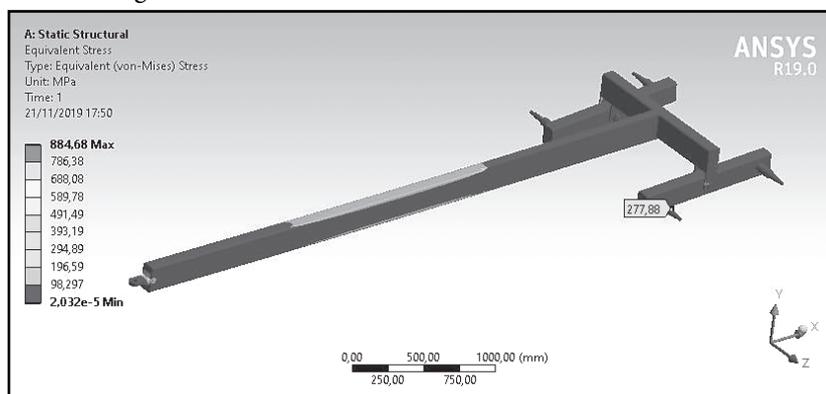
Fonte: Os autores (2020).

Figura 17 - Curva S-N



Fonte: Os autores (2020).

Figura 18 - Resultado da análise de tensões na estrutura

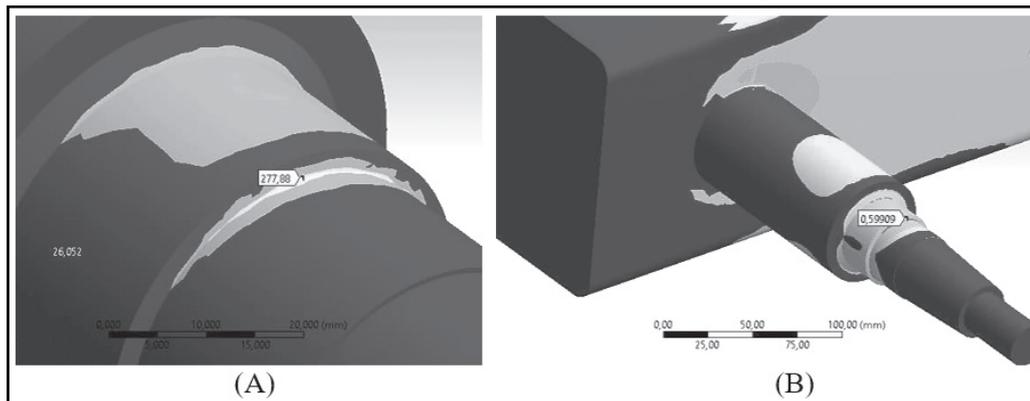


Fonte: Os autores (2020).

A maior tensão de Von-Mises apresentada foi de 884,68 MPa, porém, analisando-se os resultados, pode-se desconsiderar a mesma por encontrar-se em regiões de singularidade, onde ocorre o surgimento de concentradores de tensões. No entanto, como o objetivo do trabalho é analisar apenas o eixo, por se tratar do local, onde ocorreu a falha, o restante

dos componentes foi desconsiderado na análise de tensões. A figura 19 (A) apresenta as tensões equivalentes de Von-Mises, encontradas no eixo para o carregamento aplicado (277,88 MPa), e a figura 19 (B) apresenta os valores do coeficiente de segurança, para a falha por fadiga (0,59909), valores que estão em destaque no rótulo de dados.

Figura 19 - Resultado da análise de tensões no eixo (A) e coeficiente de segurança encontrado no eixo (B)

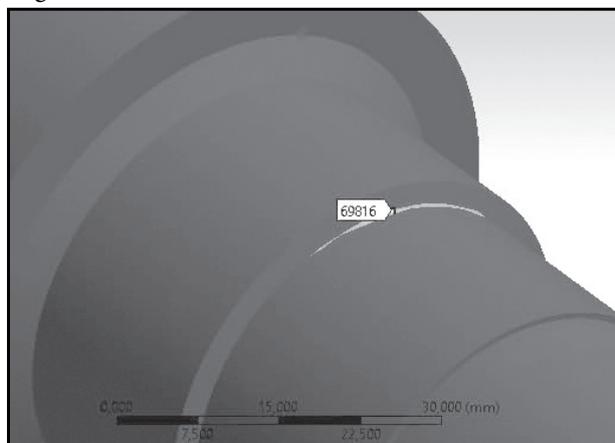


Fonte: Os autores (2020).

A região, onde apresentou a tensão máxima de 277,88 MPa, possui uma diferença de diâmetro (ocasionando um rebaixo), gerado através de usinagem. Foi nessa região que ocorreu a ruptura por fadiga. O eixo é fabricado com aço SAE 1045 que possui limite de escoamento de 310 MPa. Como a tensão máxima (277,88 MPa), é menor que a tensão de escoamento do material, não ocorre falha estática por escoamento.

Com relação ao critério de falha por fadiga, no ponto de maior solicitação da ponta de eixo, o menor valor encontrado de coeficiente de segurança é 0,599, inferior ao exigido pela norma NBR 14768 de 1,25, ocorrendo a falha.

Figura 20 - Resultado da análise de vida finita do eixo



Fonte: Os autores (2020).

Na região do eixo que sofre maior tensão, a vida em ciclos apresentada ficou entre a área de vida finita (entre 10^3 e 10^6 ciclos), o que representa que o eixo, quando alcançar 69.816 ciclos, entrará em colapso devido à fadiga (figura 20). Um exemplo para melhor entendimento: se esse implemento agrícola trabalha 5 dias por semana e 4 horas por dia, em um ano, ele trabalhará aproximadamente 1.000 horas. Se, em cada hora, ele sofrer 15 ciclos de carregamento máximo, em um ano, ele sofrerá 15000 ciclos e, se dividir 69.816 por 15.000, obtém-se um valor de 4,6 anos, ou seja, esse eixo resistirá por 4,6 anos, antes de vir a falhar por fadiga. Essa é apenas uma estimativa de vida, considerando ciclos de carga máxima, para se ter uma estimativa mais real de tempo, com o eixo trabalhando na pior condição.

No entanto, as análises foram geradas, considerando o carregamento máximo. Dessa forma, o número de ciclos que gerará a ruptura do eixo será de 69.816 ciclos no carregamento máximo. Como o implemento não trabalhará sempre nessas condições, pois, conforme ele executa a atividade, a carga aplicada diminui, devido à diminuição do líquido no reservatório, a vida em ciclos certamente será maior do que a encontrada.

5 Discussões

Neste trabalho, foi realizada uma análise de falha do eixo do sistema de rodado de um distribuidor de

adubo orgânico líquido. Os resultados foram interpretados com cautela, do ponto de vista qualitativo e quantitativo. Alguns dados, devido à carência de informações na literatura, precisam ser determinados empiricamente, com aproximações da realidade. A principal causa da falha está associada à concentração de tensão ao longo do raio de arredondamento, gerado pelo rebaixo para fixação do rolamento. Essa concentração de tensão ocorre pela excessiva carga de trabalho externa.

Inicialmente, construiu-se a geometria da peça com o auxílio do *Software Solid Works*, onde as dimensões foram obtidas, através de catálogo de fabricante e por medições realizadas. A partir disso, determinou-se, através de espectrofotômetro, que a ponta de eixo em avaliação é de Aço SAE 1045 e, em seguida, calculou-se as forças máximas aplicadas no DAOL, resultando em carregamento de 76500 N e força de tração 13.900 N.

Na sequência, realizou-se a avaliação metalográfica, onde, através da macrografia, foi possível observar duas regiões distintas no local da fratura, sendo uma região polida (início da trinca) e outra região rugosa (fim da trinca). Também, através de uma maior aproximação, foi possível detectar pontos que ocasionaram o início da trinca, onde o nível de sollicitação ultrapassou o nível de resistência. Já, na micrografia, após as amostras passarem por uma etapa de preparação, com a análise do corte transversal, detectou-se regiões claras que demonstram a presença de ferrita e regiões escuras que demonstram a presença da estrutura laminar de perlita. Analisando o corte longitudinal, observou-se novamente a presença de ferrita e perlita e, devido ao não alinhamento de grãos, foi assumido o material como sendo laminado a quente. Por fim, comparando a análise química com a quantidade de ferrita e perlita, comprova-se que o material se trata de um Aço SAE 1045 e, consequentemente, é um material dúctil.

Para confirmar os dados da metalografia e avaliar com mais clareza aspectos da seção da fratura, realizou-se uma análise, através de microscópio eletrônico de varredura. Esse procedimento permitiu que se observasse com exatidão que a trinca teve início em uma imperfeição do material, a qual, certamente, é decorrente do processo de produção. Também não foi identificado nem um tratamento térmico superficial no eixo.

A geometria do componente também possibilitou a construção do modelo de elementos finitos. Posteriormente, com os dados encontrados na literatura, com as condições de contorno atribuídas, com os tipos de contatos e conexões definidas e com a malha

devidamente gerada e refinada, através do *Software Ansys*, determinou-se o nível de tensões atuantes na peça, principalmente na parte onde ocorreu a trinca. Por todos os dados fornecidos serem reais, é possível considerar que os resultados obtidos estejam próximos da realidade e sejam confiáveis.

Como o objetivo era determinar as tensões atuantes na ponta de eixo, não se analisou o restante da estrutura, enfatizando-se apenas a análise nas tensões que ocorreram no eixo, já que foi nesse componente que ocorreu a falha. As tensões máximas encontradas ficaram na ordem de 277,88 MPa, e o coeficiente de segurança, baseado no limite de resistência à fadiga, ficou na ordem de 0,599. Em relação à falha por escoamento, o material apresenta limite de escoamento de 310 MPa e, como esse valor é maior que a tensão máxima encontrada, o eixo não falha por escoamento. Porém o coeficiente de segurança é baixo e não garante a integridade do componente. Já em relação à falha por fadiga, conclui-se que o material é propício a esse modo de falha, já que o coeficiente de segurança encontrado (0,599), é inferior a 1.

Também deve-se ressaltar que a análise por MEF considerou a pior condição em que o eixo estará submetido. Em relação à falha, assume-se que a mesma acontece, quando a trinca atinge um tamanho crítico e se propaga de forma instável. Assim, em função dessa hipótese, verificou-se que o componente suporta cerca de 69.816 ciclos, no carregamento máximo, antes de vir a se romper. Dessa forma, pelo valor de ciclos encontrado estar entre o intervalo de 10^3 a 10^6 , o componente falha por fadiga de altos ciclos.

A probabilidade da ocorrência de trinca nas condições avaliadas é extremamente alta, devido a tensões elevadas na região da falha. Salienta-se que não foram consideradas as tensões residuais existentes na peça, provocadas por tratamentos térmicos mecânicos, nem os efeitos de acabamento superficial. Outro fator de importância que deve ser ressaltado é que a fratura por fadiga de um material dúctil, pode se apresentar na forma de fratura frágil, quando ocorre a ruptura com propagação instável de trinca. Isso acaba por explicar alguns aspectos encontrados na análise.

Alternativas para evitar novas ocorrências de trincas, similares a essas, seria aumentar ou embutir o raio de concordância, desviar o fluxo de tensões do ponto crítico, fazendo com que a sollicitação nominal nesse ponto seja mais baixa, diminuir a rigidez da peça na região de fim de contato ou, até mesmo, suavizar a transição de forma do conjunto pelo uso de contornos curvos, entre outras.

6 Conclusão

Este estudo foi realizado para analisar a falha de um eixo do sistema de rodado de um distribuidor de adubo orgânico líquido que fraturou, durante a operação do equipamento. Esse trabalho possui o intuito de detectar a possível causa da trinca que levou o componente à falha por fratura. A partir de todas as etapas desenvolvidas e descritas, pode-se concluir que a tensão no local da ruptura apresenta valores elevados e que a ponta de eixo apresenta uma vida finita, estando sujeita ao colapso exatamente da região, onde ocorreu a ruptura real.

A trinca inciou e nucleou-se no raio de arredondamento próximo ao eixo. A simulação numérica foi capaz de apresentar que o raio de arredondamento atuou como um concentrador de tensão e promoveu a falha do eixo. Através das análises na seção da fratura e da análise por MEF, concluiu-se que a ruptura ocorreu, devido à falha por fadiga de alto ciclo, onde a cada ciclo essa falha se propagou, até chegar num limite que possibilitou o colapso total. Imperfeição no material e concentradores de tensões, os quais acarretam uma tensão superior à tensão de limite do material, podem ser destacados como os principais causadores dessa falha.

Referências

- AÇOESPECIAL. **Aço SAE 1045**. 2019. Disponível em: <https://www.acoespecial.com.br/aco-sae-1045>. Acesso em: 2 nov. 2019.
- ALVES FILHO, A. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. 5. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- AMUCHASTEGUI, J. G. **Elementos finitos**: singularidade de tensão. 2016. Disponível em: <http://ensur.com.br/elementos-finitos-singularidade-de-tensao-o-que-fazer/>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 172:2000**: critérios de classificação dos aços. São Paulo, 2000.
- AZEVEDO, T. F. *et al.* Failure analysis of a sugarcane loader rear shaft. **Engineering Failure Analysis**, v. 109, p. 304-326, 2020. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104326.
- AZEVEDO, T. F. *et al.* Failure analysis of the repair procedure of na ore compactor roll. **Engineering Failure Analysis**, v. 31, p. 195-202, 2013.
- BRANCO, C. M.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P. M. S. T. **Fadiga de estruturas soldadas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1999.
- CASANOVA, F. Failure analysis and redesign of a wagon shaft for sufar cane transport. **Dyna**, v. 78, n. 166, p. 48-54, 2011.
- COOK, D. R.; MALKUS, D. S.; PLESHA, E. M. **Concepts and applications of finite element analysis**. New Jersey: John Wiley& Sons, 1988.
- GDOUTOS, E. E. **Fracture mechanics**: an introduction. Netherlands: Springer, 2005.
- GODEFROID, L. B.; CÂNDIDO, L. C.; MORAIS, W. A. **Curso**: análise de falhas. São Paulo, ABM, 2011.
- HALL, A. S.; HOLOWENKO, A. R.; LAUGHLIN, H. G. **Machine design**. New York: McGraw-Hill, 1961.
- MEPEL. **Linha agrícola**. 2019. Disponível em: <https://mepel.ind.br/linha/linha-agricola/>. Acesso em: 15 out. 2019.
- NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- RAO, S. S. **The finite element method in engineering**. 4th ed. Burlington: Elsevier, 2004.
- ROHDE, R. A. **Metalografia preparação de amostras**. Santo Ângelo: URI, 2010.
- ROSA, E. **Análise de resistência mecânica**: mecânica da fratura e fadiga. Florianópolis: UFSC, 2002. 407 p.
- SHIGLEY, J. E.; BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de máquinas de Shigley**: projeto de engenharia mecânica. 8. ed. São Paulo: AGH, 2011. 1073 p.
- SILVA, H. G. A. *et al.* Caracterização de fraturas frágil e dúctil em microscopia eletrônica de varredura (MEV). **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, v. 34, n. 3, p. 5-7, 2017.
- STROHAECKER, T. R. **Mecânica da fratura**: notas de aula de engenharia mecânica. Porto Alegre: UFRGS, 2008. 99 p.
- ZHAO, L. H. *et al.* Failure and root cause analysis of vehicle drive shaft. **Engineering Failure Analysis**, v. 99, p. 234-255, 2019. DOI:10.1016/J.ENGFAILANAL.2019.02.025.

