Unisanta Science and Technology, 2023, 10, March
Published Online 2023 Vol. 12 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Avaliação Macrográfica e Analítica da Fratura de um Eixo de Tambor Esticador de Correia Transportadora de Fertilizantes

Willy Ank de Morais, Lorranny Borges Oliveira Cruz

UNISANTA– Universidade Santa Cecília – Faculdade de Engenharia – Pós-Graduação em Engenharia da Confiabilidade
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

E-mail: willyank@unisanta.br
Received September, 2022

Resumo: Este trabalho objetiva analisar uma fratura ocorrida em um eixo de tambor do conjunto de esticamento de uma correia transportadora de fertilizantes, localizada em uma instalação portuária. A análise conta com observações visuais da fratura, aspectos da estratégia de manutenção do ativo e determinação de tamanho crítico de trinca para esta aplicação específica, utilizando os princípios da Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE). Pode-se concluir que a existência de um raio de curvatura e a presença de corrosão superficial elevaram significativamente a concentração de tensão no ponto de ruptura, tornando o diâmetro do eixo uma variável crítica para o projeto. Percebe-se também a importância de mensurar o tamanho crítico de trinca, possibilitando tomadas de decisão mais assertivas para a paralisação imediata do transportador, baseado nos dados obtidos durante aplicação de metodologias de inspeção de varrimento de eixos, como o ultrassom.

Palavras-chave: Análise de falhas. Fratura por fadiga. Correia transportadora. Mecânica de fratura linear elástica. MFLE.

Macrographic and Analytical Evaluation of the Fracture of a Fertilizer Conveyor Belt Stretcher Drum Shaft

Abstract: This work aims to analyze the fracture occurred in a drum axle used as a stretching set of a fertilizer conveyor belt, located in a port facility. The analysis has visual observations of the fracture, aspects of the asset maintenance strategy and critical crack size determination for this specific application, using the principles of Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM). It can be concluded that the existence of a radius of curvature and surface corrosion condition significantly raised the stress concentration at the breaking point, making the shaft diameter a critical variable for the project. It is also noticed the importance of measuring the critical crack size, enabling more assertive decision making for the immediate stoppage of the conveyor, based on data obtained during the application of shaft scanning inspection methodologies, such as ultrasound.

Keywords: Failure analysis. Fatigue fracture. Conveyor belt. Linear elastic fracture mechanics. LEFM

1. Introdução

As correias transportadoras detêm uma posição dominante no transporte de materiais devido às suas inerentes vantagens, como economia e segurança de operação, confiabilidade, versatilidade e enorme gama de capacidades. Utilizadas nos mais diversos segmentos de mercado, as correias transportadoras possuem características técnicas que permitem sua aplicação em sistemas de transporte e elevação de materiais de pequeno, médio e grande porte, dependendo de sua adequada configuração (ZHANG e XIA, 2011; FERDORKO et al., 2013; ANDRIANOV e HORSSEN, 2008).

Este tipo de equipamento é utilizado em numerosos processos, em conexão com seu propósito normal de providenciar um fluxo contínuo de materiais entre operações. O sistema é basicamente formado por uma

Copyright © 2023 ISESC.

correia sem fim, a qual é estendida entre dois tambores (acionamento e de retorno) principais e roletes justapostos, sobre os quais a correia desliza, com baixo atrito, possibilitando a movimentação de cargas pesadas (FERDOKO e IVANCO, 2012).

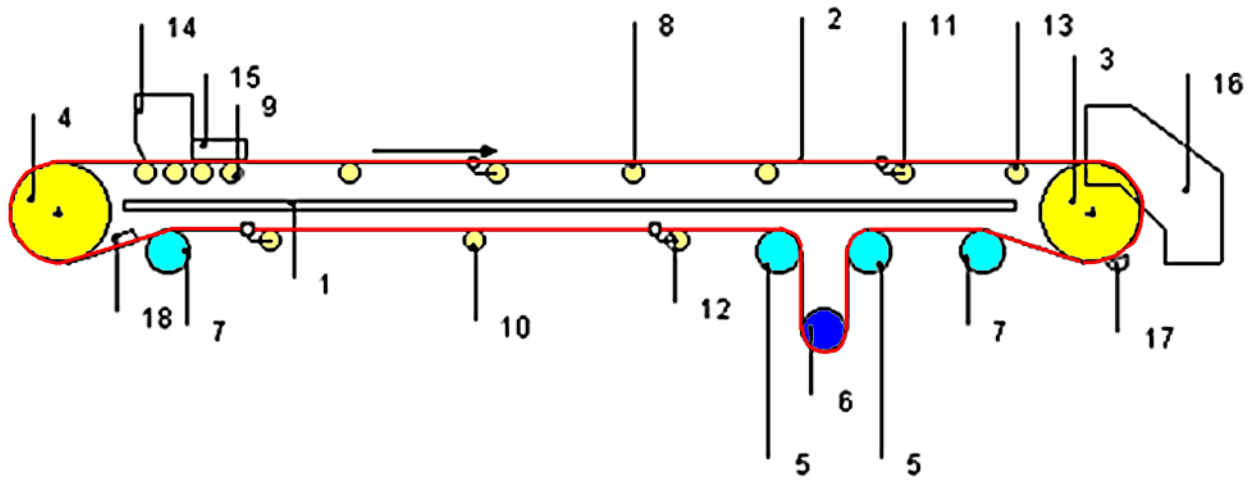
Os tambores são um dos principais componentes de um transportador de correia, e têm como função principal tracionar a correia para o funcionamento do transportador. Com a movimentação da correia movem-se também os demais componentes e o tambor movido, que promove o seu apoio. Os tambores possuem também outras funções no transportador, tais como a de efetuar desvios e dobras na correia.

Transportadores com sistema de esticamento do tipo gravitacional, possuem em sua composição tambores do tipo de desvio, responsáveis por desviar a correia para a área de tensionamento, e o tambor de esticamento responsável pela aplicação de tensão de esticamento, devido seu peso somado ao conjunto de contrapeso ligado à sua estrutura. A Figura 1 ilustra este tipo de sistema.

na segurança operacional e pessoal da unidade produtiva. Os tambores empregados em uma correia transportadora podem ser classificados da seguinte forma, conforme ilustrado na Fig. 1:

a) Acionamento: utilizado na transmissão de torque, pode estar localizado na cabeceira, no centro ou no retorno;
b) Retorno: efetua o retorno da correia a sua posição inicial e em alguns transportadores são responsáveis pelo tensionamento da correia. Está localizado na extremidade oposta ao tambor de acionamento;
c) Esticador: utilizado para manter a tensão ideal para o funcionamento do transportador;
d) Desvio ou dobra: empregado para desviar o curso da correia;
e) Encosto: atua aumentando o ângulo de contato com o tambor de acionamento.

Um esquema de montagem de um sistema esticador de



1) Estrutura
2) Correia transportadora
3) Tambor de acionamento
4) Tambor de retorno
5) Tambor de desvio
6) Tambor de esticamento
7) Tambor de encosto
8) Rolete de carga
9) Rolete de impacto
10) Rolete de retorno
11) Rolete autoalinhante de carga
12) Rolete autoalinhante de retorno
13) Rolete de transição
14) Chute de alimentação
15) Guias laterais
16) Chute de descarga
17) Raspador
18) Limpador

Figura 1. Esquema básico de um transportador de correia (Fonte: Autores).

Os tambores são elementos essenciais a estrutura e funcionamento dos transportadores de correia. Devido a esta importância, estes componentes demandam atenção no desenvolvimento de estratégias de manutenção, de forma a não apresentarem falhas que levem a paralisação de todo o transportador e consequentemente impactos na produção,

um transportador de correia, por tensionamento do tipo gravitacional, está representado na Figura 2. Tal conjunto contém tambores de desvio e esticador, sendo que os componentes principais do sistema empregado para esticar a correia transportadora, conforme listados a seguir, estão apresentados na Figura 3:

Copyright © 2023 ISESC.

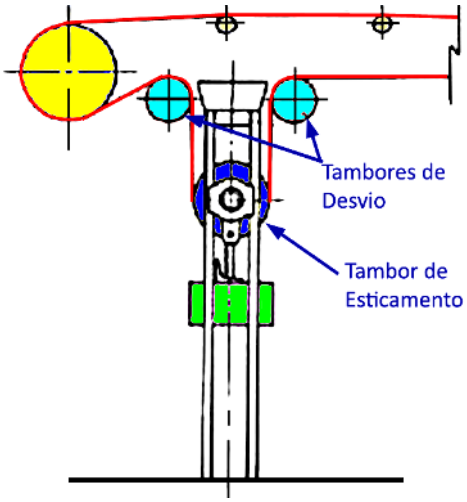


Figura 2. Sistema de esticamento de correia por peso (Fonte: Autores).

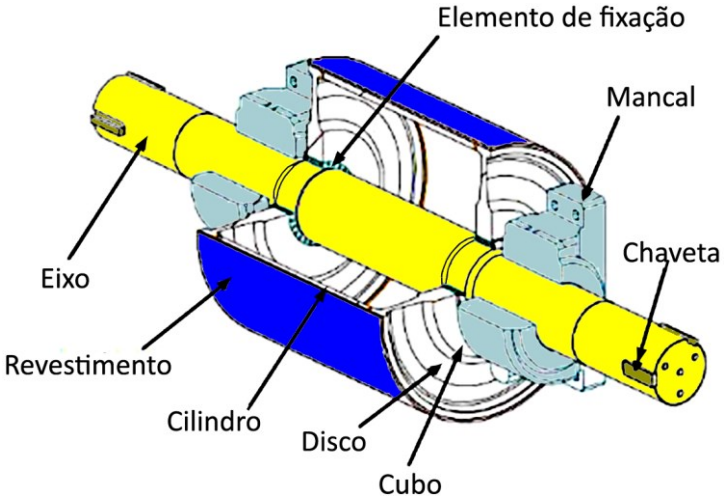


Figura 3. Partes constituintes de um tambor de esticamento de correias transportadoras (Fonte: Autores).

a) corpo,
b) discos laterais e centrais,
c) cubos,
d) elementos para transmissão de torque,
e) eixo,
f) mancais e
g) revestimento.

2. Fundamentação

2.1. Contextualização

O equipamento é empregado em um complexo portuário marítimo, que foi inaugurado na década de 1960 e que possui capacidade de movimentação de navios graneleiros de grande porte. As instalações possuem uma estrutura dedicada ao desembarque de fertilizantes que emprega guindastes móveis para a retirada do produto dos navios e transportadores de correia para fazer o encaminhamento para o armazenamento.

A Figura 4 ilustra os principais equipamentos empregados para a rota de desembarque de fertilizantes, que emprega um sistema misto, com componentes alocados em série e em paralelo. Na Fig. 4 é possível observar que os guindaste móveis 'GM03' e 'GM04', que são os primeiros a manipular a carga, e os transportadores de correias para o armazenamento final, 'TRFE03 e 'TRFE03A' estão ligados em paralelo. Já os demais ativos, descritos como 'ALFE07', 'TRFE01' e 'TRFE02'; estão ligados em série.

Em agosto de 2021, o primeiro transportador de correia da rota de desembarque de fertilizantes, 'TRFE01', sofreu uma paralisação, interrompendo o processo de descarregamento de um navio.

A falha foi causada pela fratura do eixo do tambor de desvio de saída deste transportador. Devido sua alocação na parte em série da rota (vide Fig. 4), a falha do transportador 'TRFE01' provoca a parada de todo o sistema, ficando a rota de desembarque de fertilizantes completamente inoperante.

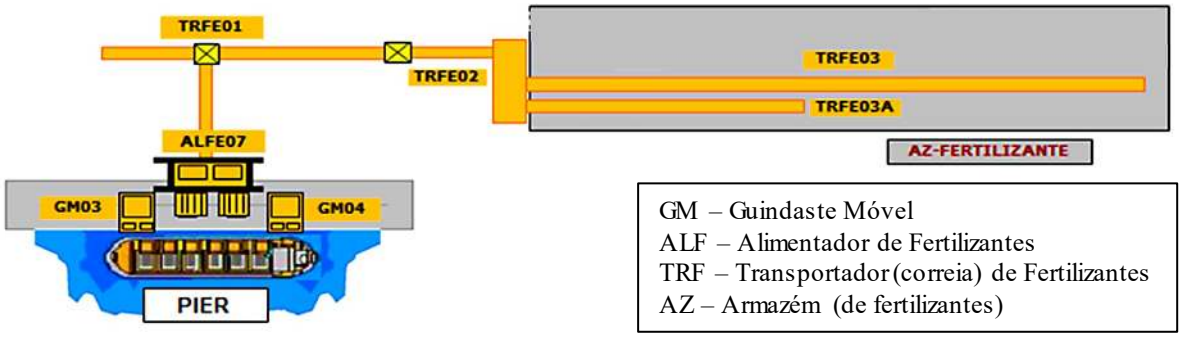


Figura 4. Rota de desembarque de fertilizantes e ativos principais (Fonte: Autores).

Copyright © 2020 ISESC

Devido à sua importância operacional, este ativo está cadastro no sistema de gerenciamento de manutenção das instalações com maior criticidade. A estratégia de manutenção para este ativo é composta por técnicas preventivas, preditivas, inspeções sensitivas e manutenções condicionais. Na data da ocorrência, a estratégia de manutenção específica para os tambores da 'TRFE01', englobava as seguintes atividades

- Inspeção sensitiva – Avaliação das condições estruturais e funcionais dos tambores, onde são observados ruídos, temperatura, desalinhamentos, deformações, pintura, fixação etc.;
- Inspeção preditiva – Análise de vibração: Aplicada para monitoramento de condição dos rolamentos, lubrificação dos mancais, folgas e desalinhamentos dos tambores;
- Inspeção preditiva – Ultrassom de eixos: Aplicada para detecção de descontinuidades, como trincas, nos eixos dos tambores;
- Manutenção preventiva – Anéis de fixação: Os anéis, que fixam a carcaça do tambor ao eixo, têm seus parafusos de fixação verificados, para caso apresentem rupturas ou perda de torque e
- Manutenção preventiva – Lubrificação: Os mancais dos tambores são lubrificados conforme boas práticas de lubrificação da engenharia local.

A estratégia de manutenção específica dos tambores da 'TRFE01', na data da ocorrência, englobava as seguintes atividades. A distribuição de planos que assistia o transportador na data da ocorrência da falha está listada, por tipo, na Tabela 1.

Tabela 1. Estratégia de manutenção do transportador de correia 'TRFE01'.

Tipo de Plano	Quantidade de Planos
Inspeção sensitiva	11
Manutenção preventiva	9
Inspeção preditiva	6
Aferição/calibração	3

2.2. Histórico do Componente

O tambor que fraturou era empregado para o desvio da correia, conforme apresentado na Fig. 2, e foi instalado no transportador 'TRFE01' em abril de 2021. Este componente substituiu o anterior, que havia apresentado defeito na fixação do anel de expansão (vide Fig. 3). Anteriormente este tambor havia sido empregado em outro transportador de correia responsável pela movimentação de grãos (soja, milho e farelo), dentro da mesma unidade portuária, tendo passado por reparo externo antes de sua reutilização. A reforma ocorreu por empresa terceirizada, em local externo, e foi necessária após a ruptura do seu anel de expansão, associada a uma ruptura de uma significativa quantidade de parafusos de fixação. O reparo contemplou atividades de substituição de várias de suas partes, porém mantendo o eixo original, que não foi substituído.

Avaliando os desenhos de projeto do componente original do equipamento ('TRFE01') e do tambor fraturado é possível identificar que são projetos similares, incluindo dimensões, materiais e resistência. Desta forma, o tambor estava de forma geral apto para ser instalado no transportador 'TRFE01'.

Na semana anterior a fratura, foi realizada análise de ultrassom nos eixos dos tambores do transportador 'TRFE01' e não foi diagnosticada nenhuma anormalidade, tais como, presença de trincas ou descontinuidades. Porém, após 4 (quatro) meses de operação ocorreu a ruptura do eixo do tambor de desvio de saída do transportador.

O tambor instalado na TRFE01 anteriormente possuía um eixo com diâmetro 20 mm maior que o fraturado, porém, não há relatos de mudança de projeto ou estudo de engenharia que comprovasse esta substituição. Nominalmente, o tambor fraturado possuía um eixo com diâmetro de 80 mm e o anterior era baseado em um eixo com 100 mm de diâmetro. O outro tambor do sistema de desvio (no caso o de entrada) possui um eixo com diâmetro de 100 mm e não apresentou nenhuma fratura ou dano aparente no período do acompanhamento. A Figura 5 apresenta uma foto ilustrando a condição de operação dos dois tambores de desvio (Fig.2) e na qual está ilustrada a diferença nas dimensões dos eixos (entrada e saída).

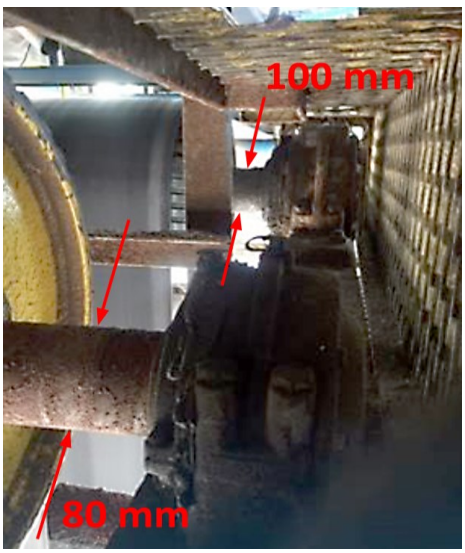


Figura 5. Tambores de desvio da 'TRFE01'.

Copyright © 2023 ISESC.

Não havia histórico de fabricação e manutenção do tambor fraturado antes de junho 2020, devido restrição de acesso a esses dados.

2.3. Fractografia

A fractografia é uma técnica muito empregada em análise de falhas e consiste em empregar o vínculo das características morfológicas de superfícies danificadas ou fraturadas de modo com os mecanismos atuantes para a causa desta falha (MORAIS et al., 2014a). As particularidades observáveis na região degradada podem oferecer informações sobre as condições nas quais a falha ocorreu, mesmo que esta tenha sido gerada por solicitações de origens diversas, tais como: mecânica, química, térmica, biológica e etc.

Durante muitos anos, a fractografia foi utilizada por razões puramente físicas, restringindo-se a aplicação de técnicas macrográficas, com o auxílio de lupas. A introdução de microscópios às análises, especialmente o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), permitiu o maior desenvolvimento da fractografia. De fato, o MEV com seu alto poder de resolução, elevada capacidade de ampliação e grande profundidade de campo, permitiu a caracterização mais precisa das faces de degradação. Esta observação é denominada microfractografia.

Porém, a microfractografia não substitui a macrofractografia, sendo que ambas são mutuamente complementares, de modo a se obter todas as informações relevantes sobre a ruptura. A análise macrofractográfica é realizada por meio de inspeção visual, com ferramentas simples como a olho nu, lupa e lentes estereoscópicas. O objetivo é observar com maior atenção o aspecto geral da peça e de sua descontinuidade, possibilitando determinar o tipo de falha (presença ou ausência de distorções plásticas, aspecto das superfícies de fratura: brilhante, fosca, lisa, granular, rugosa, com linhas, etc.), determinar o modo de solicitação ao qual a peça foi submetida e localizar a região que iniciou a fratura (por meio da convergência de linhas, presença de defeitos ou oxidação).

As informações da macrofractografia também possuem o nobre objetivo de estimar quais são as técnicas necessárias para investigar o componente falhado, inclusive orientando posições de amostragem e ensaios a serem realizados, poupando tempo e recursos para executar a análise (MORAIS et al., 2005), com o ilustra. Dentre os exames que podem ser executados, pode-se destacar: microscopia eletrônica de varredura (MEV), exames metalúrgicos para avaliação da sanidade interna e microestrutura, ensaios mecânicos, análises químicas, entre outros (POKORNY & POKORNY, 2002). É importante ressaltar que não existe uma única ferramenta de análise que garantirá a resolução de qualquer caso de falha, portanto sendo necessária a utilização de mais de uma técnica (MORAIS et al., 2014b).

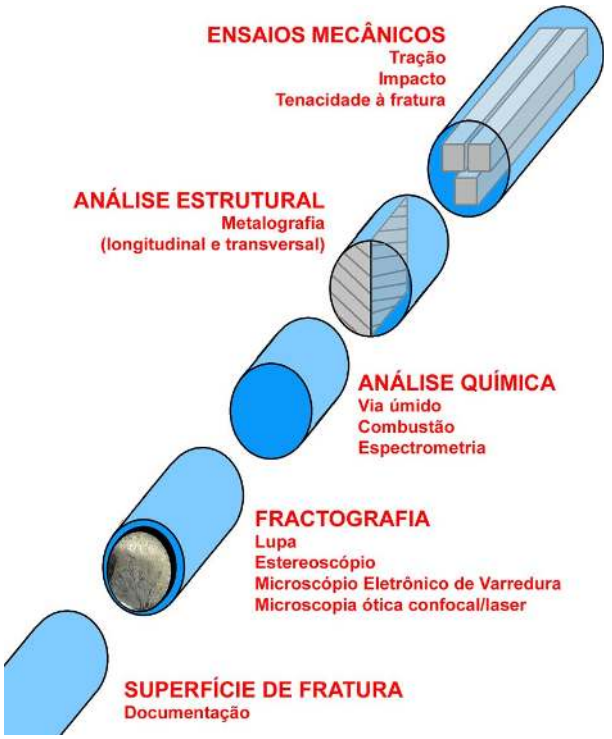


Figura 6. Possível sequência de amostragem e ensaios mecânicos, químicos e estruturais planejados a partir da fratura de um eixo de aço, adaptado de Colangelo e Heiser (1987).

2.4. Fratura por Fadiga

A fadiga pode ser definida como o processo de alteração e danificação estrutural progressivo, localizado e permanente. Tal processo ocorre em um material submetido a condições que produzem variações de tensões e deformações em um ou mais pontos e que pode culminar em trincas ou na fratura completa após um número suficiente de flutuações ou ciclos (GODEFROID et al., 2011). A fratura por fadiga pode ser dividida em três estágios, conforme ilustrado na Figura 7 (DIETER, 1981):

- Estágio I: Corresponde à nucleação de trincas em descontinuidades já inicialmente presentes no material, ou durante a clivagem, em intrusões ou extrusões, ao longo de inclusões, em contornos de grãos e maclas;
- Estágio II: Corresponde ao crescimento da trinca num plano perpendicular à direção da tensão aplicada. Em algumas ligas metálicas é caracterizada por estrias de fadiga e
- Estágio III: Corresponde à fratura brusca final, quando a trinca atinge o tamanho crítico para propagação instável.

Copyright © 2020 ISESC



Figura 7. Estágios de propagação de trinca por fadiga (autores).

Segundo Dieter (1981), a taxa de propagação de trinca durante o estágio I é geralmente muito pequena, da ordem de angstrons (10^{-10} m) por ciclo, quando comparada com a taxa de propagação do estágio II, da ordem de mícrons por ciclo (10^{-6} m). A superfície de fratura do estágio I não apresenta morfologia característica, em contraste com a fratura do estágio II, que pode ter características marcantes tais como as estrias de fadiga.

As estrias surgem em superfícies de fratura por fadiga de diversos materiais, tais como os metálicos de estruturas CCC, CFC e HC e muitos materiais poliméricos, e se formam perpendicularmente ao avanço da frente da trinca. A distância entre duas estrias está relacionada com a velocidade de propagação da trinca e varia com a história de carregamento (DIETER, 1981).

As estrias são as evidências mais características da fratura por fadiga, embora elas nem sempre estejam presentes nas superfícies fraturadas, por uma variedade de razões. Uma delas, por exemplo, em metais duros, com dureza superior à 50 HRC desenvolvem muito pouco ou nenhuma estria pela ausência de ductilidade.

A Figura 8 ilustra este comportamento, de uma análise recente de um dos autores em uma liga Nb-48Ti muito dúctil. Na Fig. 8 está ilustrada uma superfície de fratura por fadiga formada pelo encontro de duas trincas, uma maior (vinda do lado esquerdo) e outra menor (vinda do lado direito). A trinca maior possui um campo de tensões mais intenso, que gera estrias maiores (lado esquerdo na Fig. 8) enquanto que uma trinca menor gera um campo de tensões menor na sua ponta, deixando um 'rastro' de estrias mais curtas (lado direito na Fig. 8).

Uma vez atingida a tenacidade do material durante o crescimento da trinca, passa-se ao estágio III de propagação de trinca por fadiga (DIETER, 1981). Estes estágios são afetados por diferentes variáveis. Por exemplo, a presença de tensões residuais influencia significativamente na nucleação da trinca, mas não na propagação (DIETER, 1981).

O estágio de propagação da trinca por fadiga ocorre por um mecanismo de embotamento e afinamento repetitivo da ponta da trinca, conforme sequência mostrada na Figura 9 (MEYERS e CHAWLA, 1999):

- Fig. 9A - No início do carregamento cíclico a ponta da trinca é aguda.
- Fig. 9B - À medida que o esforço de tração é aplicado, o pequeno entalhe duplo na ponta da trinca concentra o deslizamento ao longo dos planos que fazem 45° com a superfície da trinca
- Fig. 9C - Conforme a trinca se alarga para a sua extensão máxima, ela avança por cisalhamento plástico ao mesmo tempo em que sua ponta se torna rombuda (arredondada).

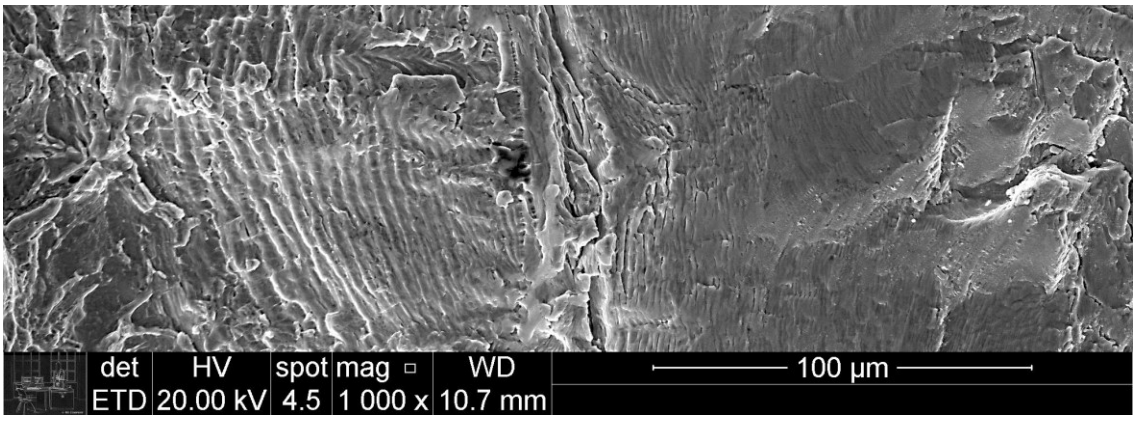


Figura 8. Exemplo da ocorrência de estrias de fadiga em um material metálico dúctil (autores).

Copyright © 2023 ISESC.

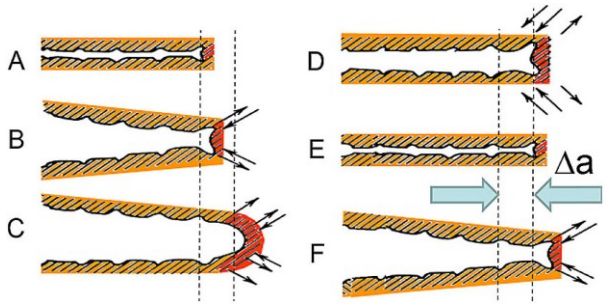


Figura 9. Dinâmica da propagação de trincas por fadiga em um metal dúctil (MORAIS et al. 2014b). A região vermelha em frente à ponta da trinca representa o tamanho desta zona plástica.

- Fig. 9D - Quando a carga muda para compressão, as direções de deslizamento na extremidade são invertidas.
- Fig. 9E - As faces da trinca são compactadas.
- Fig. 9F - A nova superfície da trinca, criada na tração, é forçada para o plano da trinca em que é parcialmente dobrada por flambagem formando uma ponta de trinca novamente aguda e já pronta para avançar e seguir para o próximo ciclo.

2.5. Mecânica de Fratura Linear Elástica (MFLE)

Sob certas condições de serviço, um defeito, mesmo de dimensões muito pequenas, pode levar a falhas catastróficas. Tais defeitos são inevitáveis nas estruturas. Por mais controlada que seja a fabricação dos componentes, defeitos aparecem de formas variadas, adicionalmente àqueles inerentes ao próprio material. As dimensões críticas de defeitos, que dependendo da sua posição provocam rupturas catastróficas sob as condições de tensões, são determinadas em função da resistência à fratura do material.

O fator de concentração de tensões K_t quantifica o efeito da geometria do entalhe nas tensões lineares elásticas que atuam na sua extremidade. Em uma primeira análise, significa que os entalhes, se presentes, devem ser mantidos com a menor influência o possível, sendo que quanto maior o raio de curvatura de um entalhe/descontinuidade, menor a severidade relativa da concentração de tensões. Variações de geometria também levam a concentrações de tensões localizadas, devido a redistribuição de tensões ocorridas no local. Desta forma, ao se analisar defeitos e fraturas originadas em regiões de peças que apresentam variações de geometria, também devem ser consideradas as concentrações de tensão causadas por esse fator.

Em tambores de transportador de correia usualmente vê-se variações de geometria ao longo do eixo, com a presença de raios de curvatura. Este é um fator muito relevante para a iniciação e propagação de trincas em peças para essa aplicação.

Segundo Castro (2009), as trincas são entalhes afiados cujo raio da ponta tem uma dimensão que tende a zero, muito comuns em estruturas. As trincas são descontinuidades que podem ser geradas durante a fabricação do material, na confecção ou na montagem da peça, por dano em uso ou por determinadas características operacionais. Os conceitos tradicionais de resistência dos materiais baseados em propriedades como resistência ao escoamento ou resistência à ruptura não levam em conta a resistência à propagação de uma trinca no material.

A Mecânica de fratura Linear Elástica (MFLE) resolve as limitações dos conceitos tradicionais de resistência dos materiais quanto à presença de descontinuidades, particularmente as trincas, em estruturas relativamente frágeis. De uma forma geral, a MFLE avalia os mecanismos de fratura dos materiais frágeis ou quase-frágeis, através dos conceitos da teoria da elasticidade linear.

Embora todo componente metálico trincado sob carregamento apresente uma região sujeita à deformação plástica na ponta da trinca, pode-se, sob certas condições, negligenciar a existência desta zona plástica e estudar o fenômeno da fratura através da MFLE. Isso ocorre nos casos nos quais o volume de deformação plástica é pequeno quando comparado às dimensões da peça (GODEFROID et al. 2011), conforme será visto posteriormente. As bases da MFLE foram introduzidas por Griffith (1920), que considerou um critério energético para a propagação e, consequentemente, fratura de um material trincado. Em um desenvolvimento posterior, proposto por Irwin (1957), considera-se que uma trinca, por exemplo sob carregamento em tração, se propaga quando a intensidade do campo de tensões presente na sua ponta (caracterizado por K_I) atinge um valor crítico, denominado de tenacidade à fratura (K_{Ic}).

Genericamente, o fator K, que caracteriza a intensidade do campo de tensões na ponta de uma trica, pode ser determinado através da Equação (1), e depende do fator vinculado à geometria do componente trincado (Y), da tensão aplicada (σ) e do tamanho da trinca (a) (CALLISTER, 2002):

$$K = Y.\sigma.\sqrt{\pi.a} \qquad (1)$$

Uma trinca pode ser aberta em tração (modo I), em cisalhamento perpendicular à sua linha (modo II) ou paralelo (modo III). Tipicamente o modo I é o mais comum, por isso é normal o uso do valor crítico para abertura de trinca por tração nas condições de elasticidade linear do componente ou K_{Ic}. Pela importância deste parâmetro e pela facilidade e disponibilidade de resultados de propriedades mecânicas medidas em tração (por exemplo o S_{LE}, limite de escoamento) e em ensaios de

Copyright © 2020 ISESC

tenacidade ao impacto Charpy (E_C), foram desenvolvidas equações empíricas que correlacionam estas propriedades. As Equações (2) e (3) são exemplos de equações disponíveis em normas, tais como o API 579 ou na literatura técnica (ASM, 2000), e que visam fazer essa correlação, ainda baseadas em ajustes de dados numéricos reais e aplicáveis para os aços:

$$K_{Ic} = S_{LE}\sqrt{0{,}646\left(\frac{E_c}{S_{LE}} - 0{,}01\right)} \quad (2)$$

$$K_{Ic} = S_{LE}\sqrt{\left[0{,}177\left(\frac{E_c}{S_{LE}}\right)\right] - 0{,}0011} \quad (3)$$

Nestas equações: E_C é a Energia Charpy (J); S_{LE} é o Limite de Escoamento (MPa); E é o módulo de rigidez ou de Young (GPa) e K_{Ic} é a tenacidade à fratura (MPa·√m). Obs.: As equações foram alteradas em relação à sua fonte original (ASM, 2000) para abranger tais unidades do SI.

A MFLE se aplica às trincas ideais com uma ponta de raio nulo. Isso significa que todos os defeitos possíveis no componente são tratados como trincas agudas. Além disso, possuir uma trinca aguda é um dos requisitos para um corpo de prova ser adequado para determinação de K_{Ic}. Outra limitação provém da consideração de comportamento linear elástico, inclusive na região em torno da ponta da trinca. Dessa forma, a análise de tensões é precisa na medida em que a zona plástica permanece pequena e é circundada por uma grande região elástica. De acordo com a norma ASTM E1820 (2020), a determinação de K_{IC} deve obedecer ao critério da Equação (4):

$$a, B, (W - a) \geq 2{,}5.\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}}\right)^2 \quad (4)$$

Na qual: B é a espessura do material, a é o tamanho da trinca e $(W - a)$ é o ligamento remanescente do corpo de prova. Assegura-se através da Eq. (4) que o tamanho da zona plástica deva ser menor ou igual a aproximadamente 1/50 vezes as dimensões do componente. Procura-se assim garantir um estado de tensões tipicamente de deformação plana (DP) e, consequentemente, um valor de tenacidade à fratura que seja independente da espessura (K_{IC}).

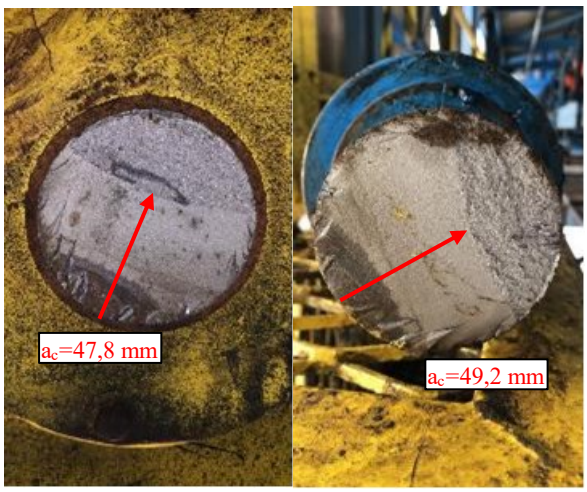
Considerando a aplicação da Eq. (1) na condição limite em que há a aplicação de máxima tensão ($\sigma_{máx}$) sobre o componente com uma trinca crítica (a_c), ou seja, prestes a se propagar e causar a fratura, pode-se obter através da Equação (5) este tamanho crítico de trinca (a_c), a partir do qual haverá falha da peça:

$$a_c = \frac{\left(\frac{K_{Ic}}{Y\cdot\sigma_{máx}}\right)^2}{\pi} \quad (5)$$

3. Resultados da Análise

3.1. Análise Macrofractográfica

A fratura ocorrida no eixo, constituído do aço SAE J403 grau 1045, ocorreu entre um dos mancais de apoio e o tambor (vide Fig. 3) e resultou na necessidade de substituição do tambor que foi danificado no evento. A peça fraturada foi segregada logo em seguida, de forma a permitir uma avaliação visual da fratura e um possível diagnóstico inicial sobre as causas do incidente (falha). As 2 superfícies da fratura foram previamente limpas e então fotografadas. Os registros fotográficos dessas faces estão apresentados na Figura 10, assim com o tamanho das trincas presentes, como vistas em cada uma das faces: 47,8 (Fig. 10.a) e 49,2 mm (Fig. 10.b).



(a) (b)

Figura 10. Registro fotográfico da superfície de fratura do eixo: (a) lado tambor e (b) lado do mancal.

Analisando os aspectos macrográficos da fratura ocorrida, como ilustrados na Fig. 10, é possível observar:

- a fratura foi típica de fadiga, evidenciada pela presença de marcas de catraca observadas na Fig. 10 na parte inferior à esquerda, que caracterizam o início da trinca por fadiga principal, e marcas de praia;
- a fratura final é do tipo dúctil, apesar da superfície apresentar-se brilhosa e sem deformações;
- a presença de uma mancha escura (na região de início da fadiga) indica uma possível contaminação por lubrificante, o que se espera ter ocorrido há mais de uma semana, de modo que o contaminante tenha permanecido tempo suficiente no interior da peça para causar o seu escurecimento local)

Copyright © 2023 ISESC.

- a concentração das marcas de catraca indica o ponto de nucleação da trinca (início da fratura) na região de 8 horas do eixo, observada na Fig. 10;
- cerca de 33% da superfície é de fratura final, indicando um avanço rápido no processo final da fratura;
- a ruptura ocorreu em uma região de raio de curvatura (mudança de dimensão do eixo), onde há uma certa concentração de tensão ($K_t > 1$).

Ao analisar mais de perto a superfície do eixo fraturado, como apresentado na Figura 11, foi possível observar a presença de corrosão superficial muito significativa, também sugerida pela Fig. 5. Esta degradação por corrosão pode ser, em grande parte, associada ao ambiente que o equipamento está exposto por se tratar de transporte de fertilizantes. Tal degradação compromete a qualidade superficial e desenvolve *pittings*, notórios pontos de nucleação de trincas (GODEFROID et al. 2011).



Figura 11. Registro fotográfico em detalhe da lateral da superfície de fratura do eixo indicando corrosão acentuada (parte superior), a mancha por graxa na região de início de trinca e a fratura final (região rugosa abaixo).

3.2. Análise matemática pela MFLE

Após a inspeção visual da peça, também foram realizadas análises de resistência ligadas as condições de projeto e utilização do tambor. A primeira verificação realizada foi o projeto do transportador de correia e do tambor, cujo desenho está ilustrado na Figura 12. Identificou-se que que a fratura ocorreu próximo ao ponto do raio de curvatura, na mudança de dimensões do eixo de 80 mm para 90 mm, distanciando-se a aproximadamente 260 mm do ponto central de apoio do mancal (local da força de reação de apoio F/2).

Através dos equacionamentos de mecânica de fratura e conhecimentos do projeto do transportador 'TRFE01', foi possível avaliar matematicamente as tensões aplicadas sobre o eixo, os fatores de segurança e as condições de intensidade de tensões que favoreceram a propagação da trinca.

Utilizando o software Autodesk FORCEEFFECT, aplicado as dimensões do eixo (Fig. 12) e cargas sobre o tambor (4,5 ton.), compatíveis com o mostrado na Fig. 12, obteve-se o Diagrama de força de cisalhamento e de momento fletor, conforme apresentado na Figura 13. O fator de concentração de tensão (K_t) na região onde ocorreu a fratura, devido presença de raio de curvatura, pode ser obtido através do gráfico de concentração de tensão apresentado na Figura 14. Através do ábaco da Fig. 14, e considerando os valores das relações dimensionais necessárias para a análise dos eixos (Fig. 12), determina-se o fator de concentração de tensão (K_t), como a seguir:

- $\rho = 5{,}0$ mm,
- $d_1 = 80{,}0$ mm,
- $d_2 = 90{,}0$ mm,
- $\rho / d_1 = 0{,}0625$,
- $d_2 / d_1 = 1{,}125$ e
- $K_t = 1{,}7$.

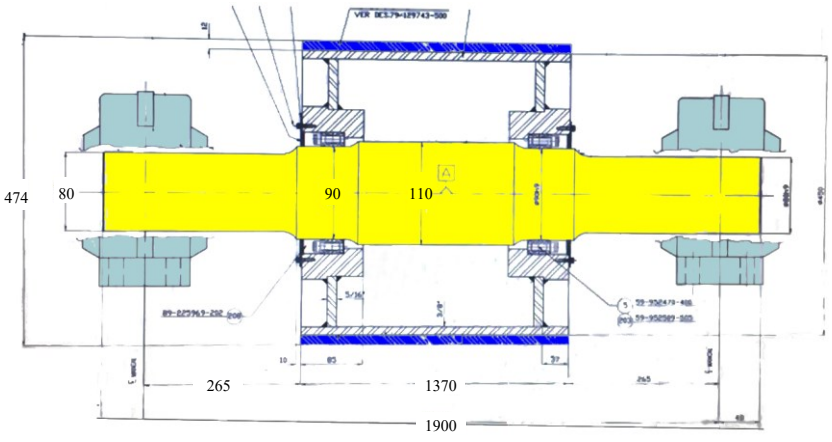


Figura 12. Projeto do tambor – Detalhe das principais dimensões (em mm).

Copyright © 2020 ISESC

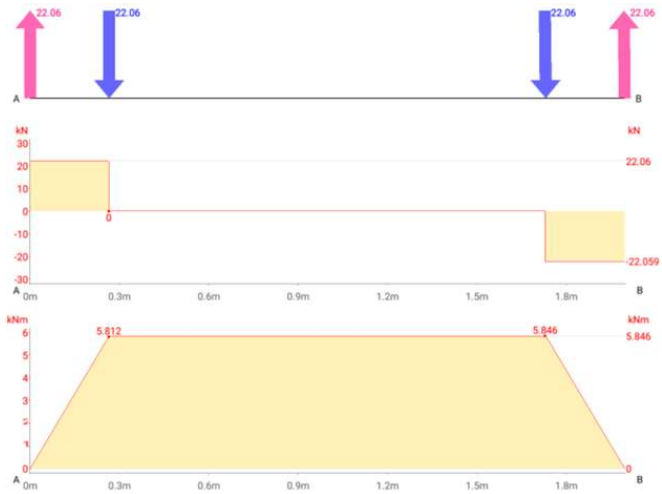


Figura 13. Diagrama de força de cisalhamento e momento do tambor - Autodesk FORCEEFFECT.

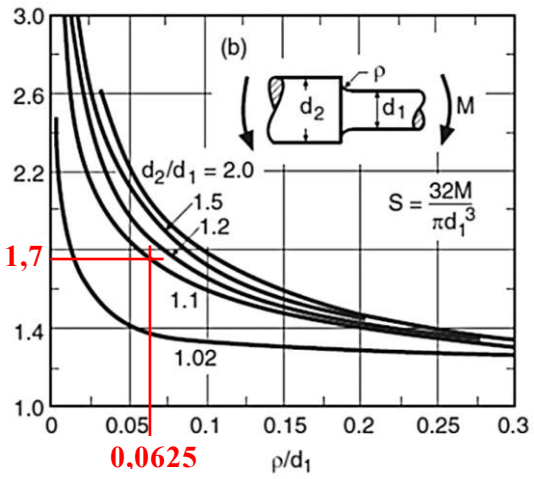


Figura 14. Fatores de concentração de tensão elástica para casos de eixos cilíndricos com raios de curvatura (PETERSON, 1974).

Realizando os equacionamentos através da ferramenta Excel, para as duas condições de eixo (80 e 100mm), tem-se os resultados comparativos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Comparativo de tensões e fatores de segurança entre eixos de diâmetros diferentes.

Item	Dmaior	Dmenor
Diâmetro, D [mm]	100	80
Área, A [mm^2]	7.854,0	5.027,0
Momento de Inércia, I [mm^4]	4.908.740	2.010.620
Momento fletor resultante, M [kN·m]	5,8	5,8
Tensão resultante, σ [MPa]	59,2	115,6
Fator de concentração de tensão, K_t	1,7	1,7
Tensão máxima na região de fratura, $\sigma_{Máx}$ [MPa]	100,6	196,6
Limite de escoamento SAE 1045*, S_{LE} [MPa]	415	415
Energia Charpy SAE 1045*, E_C [J]	40	40
Limite de vida em Fadiga SAE1045*, σ_{Fad} [MPa]	336,3	336,3
Fator de segurança quanto ao escoamento, fs_{esc}	4,1	2,1
Fator de segurança quanto à fadiga, fs_{Fad}	3,3	1,7

(*) Conforme GEM 2002 (2001).

Comparando as duas dimensões de eixo do estudo, é possível identificar o quanto o diâmetro (D) deste componente é crítico na redução do fator de segurança (fs), mesmo quando não se consideram trincas, apenas a tensão (Fig. 13) e concentração de tensão (Fig. 14) presentes.

Com a presença de trincas, torna-se necessário verificar a aplicabilidade da MFLE, Eq. (4), e a análise pelo K_{Ic}, estimado pela Eq. (2) e Eq. (3) a partir do limite de escoamento (S_{LE}) e energia Charpy (E_C). Os valores calculados, com base nos dados da Tab. 2 ofereceram:

- K_{Ic} = 98,0 MPa·√m, para Eq. (2),
- K_{Ic} = 52,4 MPa·√m, para Eq. (3) e
- K_{Ic} = 75,2 MPa·√m na média.

Neste caso, o resultado da Eq. (4) oferece uma média de 90 mm, portanto viabilizando a aplicabilidade da MFLE ao eixo com 80 mm de diâmetro. Com isso, avalia-se o tamanho crítico da trinca (a_c), que levaria o eixo à ruptura. Esta determinação é feita considerando o valor da tensão máxima, oferecida pela Tab. 2 ($\sigma_{máx}$ = 100,6 e 196,6 MPa para D=100 e 80 mm, respectivamente), o resultado médio da tenacidade à fratura (K_{Ic} = 75,2 MPa·√m) oriundo da Eq. (2) e o fator geométrico, Y = f(a/D), conforme as fórmulas oferecidas pela USAF (2002).

Como o fator geométrico, Y, depende do tamanho da trinca, a, tornou-se necessário empregar um método de cálculo numérico assistido (via Microsoft Excel) para determinar o tamanho de trinca crítico, a_c:

- para o caso do eixo de D = 80mm este valor deu a_c = 43 mm e

Copyright © 2023 ISESC.

- para o eixo com D = 100 mm o tamanho de trinca crítico deu a_c = 65,4 mm.

Nota-se que o resultado para a trinca crítica, que causaria fratura do eixo com D = 80 mm, ficou de 10 a 13% menor do que o valor real, documentando na análise fractográfica (a_c = 47,8 e 49,2 mm, na Fig. 10). Este conservadorismo nos resultados do cálculo provavelmente está associado às considerações feitas para a determinação do valor de K_{Ic} do aço do eixo, baseado em dados de literatura (www.matweb.com), na média de valores entre a Eq. (2) e a Eq. (3) e no valor do fator geométrico Y, que considera uma trinca de frente côncava sendo que a trinca possuía uma frente convexa.

3.3. Discussão dos Resultados

Devido seu elevado grau de importância para o funcionamento de transportadores de correia, os tambores demandam estratégias de manutenção específicas que permitam o monitoramento de suas características durante o período em que estiver instalado sem a ocorrência de falhas.

Além de uma estratégia de manutenção adequada, a fase de projeto também deve ser sensibilizada pelas variáveis relacionadas a aplicação do tambor, especificamente ao processo que o mesmo estará inserido. O dimensionamento de equipamentos considerando as cargas que estarão expostos, facilidades de acesso e condições operacionais são os fatores padrões para os projetos, porém, a agressividade do ambiente que pode levar ao aparecimento de corrosões reduzirá a resistência do componente e poderá levá-lo a falha.

Neste sentido, é importante acrescentar a análise do ambiente para determinação de fatores de concentração de tensão mais próximos da aplicação futura do equipamento. Aumentos de diâmetro com o objetivo de elevar os momentos de resistência e de inércia do item podem ser uma solução aplicável para estes casos, porém, resultará em componentes com maior quantidade de material, mais pesados e mais caros. A aplicação de proteções contra corrosões e a manutenção dessas ao longo da vida do componente são também soluções para este problema, e apesar de representaram um custo adicional, não representarão um acréscimo de peso ao componente e estruturas em geral.

A análise macrofractográfica identificou a presença de marcas de catraca e praia permitindo afirmar que a fratura ocorrida foi do tipo fadiga (Fig. 10). O tempo de evolução da trinca para a fratura também pode ser estimada qualitativamente, devido a presença de uma mancha escura na superfície fraturada (Fig. 11), que sugere uma contaminação por lubrificante que penetrou na peça através da nucleação da trinca na superfície. A origem da trinca teve a localização estimada pela concentração das marcas de catraca, reforçando a conclusão de nucleação através da superfície que deu entrada ao contaminante responsável pela mancha escura na face da fratura. O desenvolvimento da trinca em fase final é estimado como um avanço rápido devido grande região (cerca de 33% da área de superfície fraturada) com aparência granulosa.

A localização da fratura, em área de mudança de diâmetro com raio de curvatura, e o elevado grau de corrosão superficial são os fatores de concentração de tensão mais significativos para a falha ocorrida. Considerando-os o dimensionamento do eixo também se torna fator crucial para o sucesso do projeto.

Matematicamente comprovou-se que o aumento de 20 mm no diâmetro do eixo (de 80 para 100 mm), resulta em momentos de inércia e de resistência 2,0 vezes maiores (Tab. 2). Em uma relação diretamente proporcional, os fatores de segurança para o escoamento e para fadiga também dobram ao se comparar o eixo de 100 mm com o de 80 mm. Alinhado a presença de corrosão superficial severa, é possível compreender o motivo da fratura ter ocorrido apenas no eixo do tambor de saída, que possuía menor diâmetro (Fig. 5, na parte da frente) e não observado no tambor de entrada do sistema de esticamento (Fig. 5, na parte de trás), uma vez que ambos sofrem a mesma solicitação de carga do transportador.

Pelos conceitos da mecânica da fratura linear elástica (MFLE), o cálculo do fator concentração de tensão (K_t), devido a presença do raio de curvatura, chegou a um valor de 1,7 indicando que apenas esta questão dimensional é responsável por uma concentração de tensão localizada de quase 2 vezes.

Um complemento sugerido é determinar e tabelar o número de ciclos que o tambor poderá trabalhar até atingir o tamanho crítico de trinca, a partir de um tamanho arbitrário de descontinuidade que poderá ser detectado na análise de ultrassom. Assim, ainda que o tamanho crítico, com fator de segurança, não tenha sido atingido no momento da varredura de ultrassom, será possível prever quanto tempo o transportador ainda poderá trabalhar com este tambor até que a trinca se propague e atinja o tamanho crítico, e se este evento ocorrerá antes da realização da próxima análise preditiva.

4. Conclusões

O tamanho crítico da trinca para o eixo objeto da discussão (diâmetro igual a 80 mm) foi determinado como sendo ligeiramente menor do que o observado na fratura (43 versus 48 mm ou 11% de conservadorismo). Apesar de que tal estimativa poderia ser melhorada com os dados das propriedades mecânicas exatas do metal do eixo, esta pode ser empregada para se estabelecer a estratégia de manutenção de tambores.

A determinação do tamanho crítico de trincas pela metodologia da mecânica de fratura, tal como feito neste

Copyright © 2020 ISESC

trabalho, é crucial para a otimização e o sucesso das análises destes tipos de componentes por métodos não destrutivos, por exemplo, por ultrassom. Desta forma, trincas detectadas que apresentarem comprimento maior ou similares ao tamanho crítico calculado, indicarão a necessidade de paralisação imediata do transportador e a substituição do eixo danificado, evitando evento de fratura total do componente.

Um possível refinamento desta análise é através do cálculo da vida residual. Esta avaliação poderia ser feita ao se detectar trincas subcríticas no componente ($a<<a_c$), através de métodos não destrutivos. A Mecânica de Fratura tem ferramental analítico que pode ser empregado nesta situação, apesar de não ter sido abordada no presente trabalho.

Referências

1 AFRL-VA-WP-TR-2003-3002. **USAF Damage Tolerant Design Handbook: Gidelines for the Analysis and Design of Damage Tolerant Aircraft Structures**. 2002.

2 API 579. **Fitness-For-Service**. 3td Edition. Washington: American Petroleum Institute, Sep., 2016.

3 ASM International. **Fracture Toughness and Fracture Mechanics**. ASM Handbook: Mechanical Testing and Evaluation. ASM International. Materials Park, v.8, p. 1270-1570, 2000.

4 ASTM E1820-20, **Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness**, Last Updated: Nov 11, 2021. West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org.

5 ANDRIANOV, I. V., HORSSEN, W. T. On the transversal vibrations of a conveyor belt: applicability of simplified models, **Journal of Sound and Vibration**, v. 313, p. 822–829, 2008.

6 CALLISTER Jr., WILLIAM D., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**, 1ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2002.

7 CASTRO, J. T. P. Meggiolaro M.A. **Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço: Volume II - Propagação de Trincas, Efeitos Térmicos e Estocásticos**, ISBN 1449514707, CreateSpace2009.

8 COLANGELO, V.J.; HEISER, F.A., **Analysis of metallurgical failures**, Wiley, London, 1987.

9 DIETER, G.E., **Mechanical Metallugy**, McGraw-Hill, New York, N.Y., 1981.

10 DOWLING, N. E.; **Comportamento Mecânico dos Materiais: análises de engenharia aplicadas a deformação, fratura e fadiga**. Tradução e Revisão Técnica: Willy Ank de Morais. 4ª Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

11 FEDORKO, G., IVANCO, V. Analysis of force ratios in conveyor belt of classic belt conveyor, **Procedia Engineering**, v. 48, p. 123 – 128, 2012.

12 FORTE, M. S.; **Análise e Interpretação de Falhas Mecânicas**, 2010.

13 GEM 2002. **Guide to Engineering Materials** (ASM – International). Advanced Materials and Processes. V. 159, N. 12, 2001.

14 GODEFROID, L.B.; CÂNDIDO, L.C.; MORAIS, W.A. **Curso: Análise de Falhas**, p. 533-548, 2011.

15 GRIFFITH, A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids, **Philosophical Transactions Series A**, v.221, p.163-198, 1920.

16 IRWIN, G. R. Analysis of stresses and strains near the end of a crack transversing a plate, **Journal of Applied Mechanics** v.24, p.361-370, 1957.

17 MEYERS, M.A.; CHAWLA, K. K. **Mechanical Behavior of Materials**, 1999.

18 MORAIS, W. A.; GODEFROID, Leonardo Barbosa; CÂNDIDO, Luiz Cláudio. **A análise de falhas como uma ferramenta de convergência dos conhecimentos metalúrgicos: revisão e exemplos de casos**. In: 60º Congresso Anual da ABM - Seminário: Mecânica de Fratura e Integridade Estrutural, 2005, Belo Horizonte. CD-ROM do 60º Congresso Anual da ABM. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005

19 MORAIS, W. A; LACERDA, W. D. V. ; VILELA, F. H. ; FARIAS, E. S. A Análise da falhas: Parte 2 - Morfologias básicas das superfícies de fratura. **Siderurgia Brasil**, v. 15, p. 20-22, 2014a.

20 MORAIS, W. A; TAVARES, M. M. ; FARIAS, E. S. . A Análise de falhas - Parte 5: Obtenção e avaliação de resultados experimentais. **Siderurgia Brasil**, v. 15, p. 20-25, 2014b.

21 PETERSON, R.E., 1974, **Stress Concentration Factor**, John Wiley & Sons, Inc., New York.

22 POKORNY, A. & POKORNY, J. (2002), 'Fractographie. morphologie des cassures', **Techniques de l'ingénieur. Matériaux métalliques** (M4121), M4121–1.

23 SAE J 403. **Chemical compositions of SAE carbon steel**. SAE International, 2009a.

24 ZHANG S., XIA, X. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors, **Applied Energy**, v. 88, p. 3061–3071, 2011.

Copyright © 2023 ISESC.