Unisanta Science and Technology, **2022, 1, August**
Published Online 2022 Vol.11 Nº1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Análise da Confiabilidade de uma Engrenagem Empregada em uma Prensa de 1250 toneladas

Pablo Forlan Franco Martins[1], Willy Ank de Morais[1,2]

[1]**UNISANTA**– Universidade Santa Cecília – Pós-Graduação *latu sensu* em Engenharia da Confiabilidade
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

[2]**WILLY ANK - Soluções**
Rua Onze de Junho, 316 A.102 - Itararé, São Vicente-SP, Brasil, CEP: 11320-160

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

Resumo: A confiabilidade tem um papel fundamental no setor industrial. Para realizar um estudo aprofundado de máquinas e equipamentos, e consequentemente obter uma confiabilidade maior, é necessário conhecer o equipamento. Logo, será possível determinar os modos de causa das falhas e fazer uma análise mais criteriosa da causa raiz das quebras. Ao mesmo tempo, o estudo empregado em um equipamento específico pode ser usado para abranger outros equipamentos, o que potencializa o setor produtivo e cria uma confiabilidade maior para o produto e manutenção. O objetivo deste artigo é mostrar um estudo através de inspeção por líquidos penetrantes de como a confiabilidade tem papel fundamental em decisões complexas que engenheiros, principalmente os de manutenção, lidam no seu dia a dia, fazendo um estudo sobre o tempo de vida das engrenagens de uma prensa de 1250 T que apresenta trincas e fissuras nos seus dentes e estrutura.

Palavras chave: Confiabilidade de Equipamentos; Líquidos penetrantes; Análise de Falha; *MTTF; MTBF; MTTR*.

Reliability Analysis of a Gear Used in a 1250 ton Press

Abstract: Reliability plays a fundamental role in the industrial sector. To conduct an in-depth study of machines and equipment and consequently obtain greater reliability, it is necessary to know the equipment. Therefore, it will be possible to determine the causes of failures and carry out a more careful analysis of the root cause of failures. At the same time, the study used on specific equipment can cover other equipment, which enhances the production sector and creates greater reliability for the product and maintenance. The objective of this article is to show a study through liquid penetrant inspection of how reliability plays a fundamental role in complex decisions that engineers, especially maintenance engineers, deal with in their daily lives, surveying the lifespan of the gears of a 1250 T press that presents cracks and fissures in its teeth and structure.

Keywords: Equipment Reliability; Liquid penetrant; Failure analysis*; MTTF; MTBF; MTTR.*

1. Introdução

A manutenção centrada em confiabilidade deu seus primeiros passos na década de 1970, devido a uma necessidade de certificação do Boeing 747, pela FAA - *Federal Aviation Authority* nos Estados Unidos. Este avião tinha uma capacidade de transportar três vezes mais passageiros e um nível de automação bem avançada para época [1].

Portanto, em uma economia globalizada onde o processo de produção busca reduzir ao máximo as perdas, desperdícios e quebras, devido a competição no processo produtivo, faz-se necessário um estudo mais

Copyright © 2022 ISESC.

detalhado por parte de todas as áreas que compõem o universo de uma empresa em busca dos melhores resultados. Não é somente a manufatura que possui a necessidade de fabricação de um produto com um menor custo e maior qualidade. Atualmente, outras áreas como a manutenção também buscam maximizar seus processos buscando maior disponibilidade dos equipamentos versus menor custo possível de manutenção o que leva ao conceito de Engenharia da Confiabilidade [2-4]. Este ramo da engenharia pode ajudar as empresas no suporte à tomada de decisão nos seguintes segmentos [2]:

(1) desenvolvimento de novos produtos e
(2) uso de ativos.

No segundo caso, tais decisões devem trazer o menor impacto possível às ações tomadas pela equipe de manutenção e/ou projetos quando se faz necessário priorizar algum equipamento ou componente [3].

É possível avaliar à confiabilidade de um equipamento ou componente através de algumas possíveis formas de análise, sejam elas realizadas em laboratório ou em campo: análises químicas, termográficas, ultrassom, teste de vibração, metalográficos, mecânicos e em suas várias formas e procedimentos de ensaios que ajudem à engenharia a tomar importantes decisões.

Apesar da importância que a confiabilidade possui em vários setores da engenharia [1-3], existem pouca padronização no uso de ferramentas da Engenharia da Confiabilidade para tomadas de decisão, especialmente em situações de dificuldades extremas. Cada empresa possui uma tratativa diferente para cenários complexos.

Dentro deste contexto, o presente trabalho ilustra um caso real de uma aplicação de líquidos penetrantes na análise de uma engrenagem de uma prensa de 1250 ton (12,56 MN), cujas engrenagens apresentaram trincas ($\geq$ 3 mm) e fissuras ($<$ 3 mm). O objetivo é utilizar as ferramentas da confiabilidade, ilustrando resumidamente como seu emprego pode ser benéfico para a indústria, contribuindo para uma maior durabilidade de máquinas e componentes. Com este maior tempo, obtêm-se uma redução de custo de manutenção e dos equipamentos, garantindo a disponibilidade máxima do mesmo para a linha produtiva.

2. Confiabilidade e Prensas

Segundo Gnedenko e Ushakov [4] a confiabilidade é um tema que pertence ao século XX. Este tópico tornou-se necessário devido a necessidade dos equipamentos produzirem em sua capacidade máxima, ao longo do maior tempo possível, apresentando segurança e, consequentemente, o menor custo de manutenção agregado [3].

A teoria da confiabilidade surgiu da necessidade demandada pela indústria eletroeletrônica de manter equipamentos complexos em plena utilização, diminuindo custos operacionais. Tais sistemas eletrônicos, quando analisados separadamente, possuem dispositivos de elevada confiabilidade, porém, com a junção de diversos destes dispositivos em equipamentos mais complexos, por exemplo, placas eletrônicas, torna a confiabilidade do mesmo baixa. Deste modo, surge a necessidade de se obter um equipamento que apresente um desempenho elevado, com menor impacto possível de falhas, ou seja, de alta confiabilidade. Tal condição pode ser estendida para todos os tipos de equipamentos e segmentos.

Fogliato e Ribeiro [5] mostram que a confiabilidade está relacionada à capacidade que um equipamento ou sistema tem de realizar uma ação bem-sucedida. Portanto, a confiabilidade de um sistema está diretamente ligada relacionada à capacidade que o mesmo tem de, por um determinado período de tempo o item em questão tem que desempenhar satisfatoriamente a função requerida, sob condições de trabalho estabelecidas previamente, por um determinado período de tempo.

2.1. Principais Conceitos da Confiabilidade na Engenharia de Manutenção

A Engenharia da Confiabilidade emprega informações e indicadores para fazer a análise e avaliação de ativos. Neste sentido, os principais conceitos e indicadores empregados na análise da Confiabilidade são [5]:

- Qualidade: pode ser definida como o cumprimento de ações dentro de uma especificação de projeto e manufatura com o mínimo de variação possível dentro do processo produtivo.
- Segurança: é a ausência de atividades ou condições que possam colocar em risco os equipamentos e operadores, eliminando condições que possam trazer danos físicos ou ocupacionais.
- Manutenção preditiva: atividade que se utiliza de técnicas para monitorar os equipamentos de modo que se possa prever alguma falha que exista uma eminência para acontecer.
- Manutenção preventiva: manutenção planejada para prevenir a ocorrência de falhas, por exemplo, uma vibração em um motor elétrico.
- Manutenção corretiva: atividade que consiste em retomar a condição básica de uso do equipamento de modo que alguma falha possa ser corrigida de forma a trazer o menor impacto possível.

Copyright © 2022 ISESC

- *MTTF* (*mean time to failure*): indicador utilizado para medir o tempo médio entre falhas de componentes não reparáveis.
- *MTBF* (*mean time between failures*): indicador utilizado para medir o tempo médio entre as falhas de equipamentos que podem ser reparados.
- *MTTR* (*mean time to repair*): indicador que mede o tempo médio de uma manutenção em determinado equipamento.
- Disponibilidade: indica o índice em que o equipamento estará em condições para iniciar seu desempenho, quando este for solicitado. Este índice é obtido através da Equação (1):

$$D = \frac{MTTF}{MTBF + MTTR} \quad (1)$$

2.2. Perfis de Falha de um Ativo

Freitas e Colosimo [6] sugerem a utilização de um método quantitativo para a definição tanto do tipo de manutenção, quanto do intervalo que essas manutenções devem acontecer. Após a coleta de tempos até a falha é feita a determinação de um modelo de distribuição, *f(t)*, que apresente o melhor ajuste dos dados obtidos. A partir deste modelo torna-se possível estabelecer a probabilidade de falha de um componente, *F(t)*, descrita ao longo de um intervalo de tempo (t; t+Δt), através de testes estatísticos [4, 7]. Considerando uma variável *T* distribuída continuamente, a probabilidade de falha pode ser obtida conforme descrito pela Equação (2):

$$F(T) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^{T} f(t)dt \quad (2)$$

A probabilidade de falha pode assumir valores discretos ao se estipular um nível crítico de tolerância para a ocorrência de falha, $F_{crit.}$. Neste caso, quando o resultado da Equação (2) der abaixo deste nível crítico, considera-se que não há falha, $F(T) = 0$, senão assume-se falha ou $F(T) = 1$. Com este tipo de análise, pode-se classificar o ativo analisado em um dos seguintes perfis de falha, com base nos valores de T necessários para que a Equação (2) atinja $F_{crit.}$:

- mortalidade infantil (*T* baixos), situação na qual é recomendável a adoção de manutenção corretiva emergencial;
- maturidade (*T* intermediários), recomendam-se estratégias de manutenção preditiva e corretiva;
- desgaste (*T* altos), sugere-se a utilização de manutenção preventiva e preditiva.

Porém este tipo de análise quantitativa e qualitativa no cenário industrial está diretamente conectada a dificuldade de transformar os dados coletados em informações valiosas [7, 8]. Logo, se a empresa não possui um monitoramento ativo para criar um banco de dados, haverá uma limitação importante nos eventuais dados coletados, que provavelmente não servirão para analisar o ativo em particular.

Para avaliar o uso operacional de um ativo, por exemplo, um equipamento complexo empregado em processos de fabricação, deve-se considerar que este sofre influências de *n* fatores variáveis, tais como, matéria prima, mão de obra, ritmo de produção, condições operacionais (ambiente), etc [7]. Muitos gestores de manutenção são instigados a trabalhar com orçamentos cada vez mais limitados de modo que o uso de informações assertivas, tais como as aqui discutidas, ajudam na realocação mais efetiva dos recursos disponíveis de forma a garantir a melhor confiabilidade dos ativos em função da disponibilidade destes recursos [8]. Além disso, com tais informações é possível fazer uma projeção do nível de confiabilidade que pode ser obtida com base no orçamento disponível [4, 6].

2.3. Prensas

A utilização de prensas faz parte do processo produtivo de muitos segmentos, por exemplo: automobilístico, compressores, estamparia, etc. As prensas são utilizadas para diversos fins: dobra, repuxo, extrusão, calibragem, dobra e muito outros processos [9, 10]. Estas podem ser divididas em dois grupos [11, 12] pela sua constituição (mecânicas e hidráulicas) e são esses grupos que determinarão a capacidade de força que a prensa possui e o processo indicado para cada uma delas. Entretanto, é possível ter uma prensa que possui esses dois grupos combinados.

As prensas mecânicas são classificadas quanto à sua cinemática: excêntricas, de joelho, de joelho com dupla ação e freio e ficção. Particularmente, este tipo de prensa pode trabalhar de duas formas [12]:

- regime contínuo se dá em prensas que possuem um sistema de alimentação automático de alimentação, onde a cinemática é engatada juntamente com o sistema de alimentação, permanecendo um longo período engatado.
- regime intermitente se dá quando a máquina necessita estar parada para acontecer à alimentação e descarga, engata-se a máquina, faz-se a operação, freia-se a máquina e assim por diante durante o turno de trabalho.

A decisão de qual modelo de prensa será usada dependerá das áreas envolvidas no projeto de aquisição

Copyright © 2022 ISESC

da prensa. O estudo em questão apresenta uma prensa de regime contínuo, uma vez que devido ao alto preço de aquisição e a dificuldade de importação deste tipo de prensa, os equipamentos existentes são submetidos a um regime de trabalho mais intenso. Sob regime contínuo, o equipamento atinge 100% de uso semanal (7 dias de 24 h), o que geralmente ocorre em seu pico máximo de produção.

3. Metodologia

Este trabalho abordou uma prensa mecânica da fabricante Manzoni, conforme ilustrada na Figura 1. Tal equipamento possui uma capacidade de 1.250 toneladas e vem sendo empregada há 20 anos para a produção de autopeças. Por melhor que seja projetada, é natural depois de um certo tempo, que ocorra um desgaste natural das peças que compõem o equipamento levando a um aumento da taxa de falhas.

Particularmente a prensa em questão tem apresentado o aparecimento de descontinuidades pequenas (fissuras com até 3 mm de tamanho) e trincas (tamanhos maiores que 3 mm) nas suas principais engrenagens de acionamento, cujo posicionamento está ilustrado na Figura 2. A análise das engrenagens do equipamento foi realizada através de líquidos penetrantes (LP), realizada com o procedimento e ajustes adequados para inspecionar *in loco* as engrenagens deste equipamento.



Figura 1. Foto Geral da Prensa Manzoni de 1.250 toneladas avaliada neste estudo.

A Figura 3 ilustra algumas das engrenagens analisadas por LP do equipamento. As marcações ilustradas são usadas para determinar um ponto de partida, a partir do qual as medições serão realizadas, até completar uma revolução na engrenagem. Todas as engrenagens, nomeadas de "A" a "G", seguiram o mesmo padrão de inspeção.

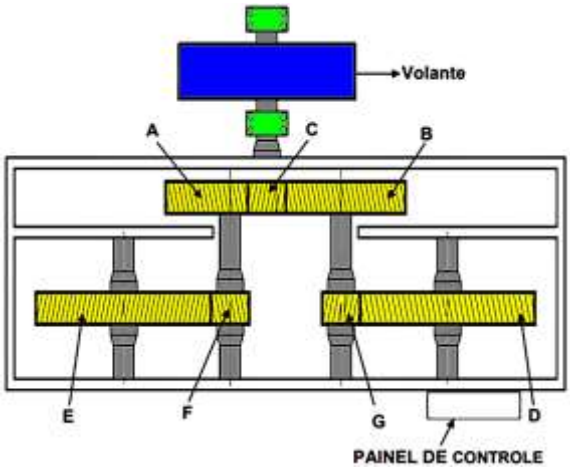


Figura 2. Diagrama mecânico do tracionamento e identificação das engrenagens da Prensa avaliada neste estudo.

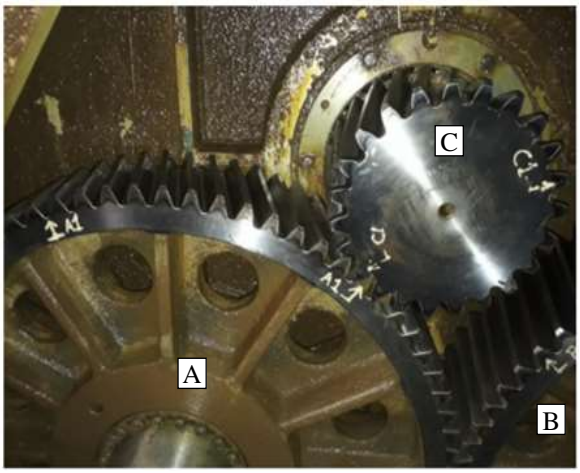


Figura 3. Visão das engrenagens "A", "C" e "B" (vide Fig. 2) da Prensa avaliada neste estudo.

A inspeção por líquidos penetrantes visa demarcar e melhorar a visualização e localização das trincas e fissuras presentes em cada uma das engrenagens, de modo que uma avaliação dimensional possa ser feita com maior precisão e com a documentação da presença e posição destas descontinuidades.

Trata-se de uma técnica tipicamente empregada, junto com ultrassonografia, termografia e outras técnicas não destrutivas, durante o início de um trabalho de análise de falhas ou na avaliação da integridade de equipamentos, para oferecer uma melhor visão da

Copyright © 2022 ISESC

condição do componente sendo analisado [13]. No presente caso, as engrenagens mais críticas "A", "B" e "C", ilustradas na Figura 3 apresentaram descontinuidades.

O exame por LP começou com uma limpeza profunda do local, para retirar todo óleo de lubrificação presente. Apesar deste óleo poder ser empregado como meio acoplante para uma inspeção ultrassônica, a presença deste inviabiliza uma inspeção por LP, que é tipicamente feita antes da ultrassônica. A Figura 4 ilustra o resultado da aplicação da inspeção por LP.

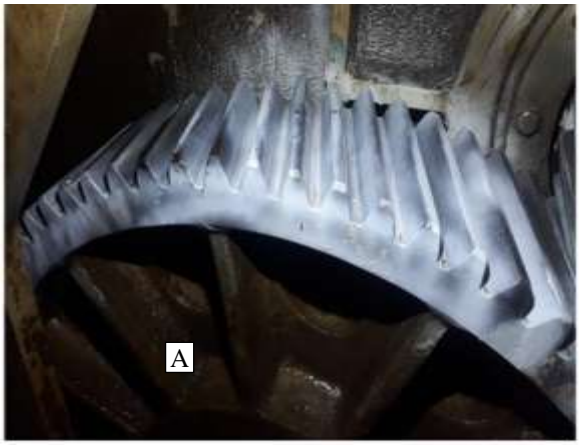


Figura 4. Exemplo da inspeção por líquidos penetrantes na engrenagem "A".

4. Resultados e Discussão

Através da inspeção por LP verificou-se que a engrenagem "A" apresentava duas fissuras e uma trinca ascendente em um dos dentes deste componente, conforme ilustrado na Figura 5.a. Esta trinca é uma consequência de um desgaste natural da engrenagem devido aos 20 anos de uso.

A Figura 5.b apresenta um detalhe da engrenagem "A" em uma região na qual é possível verificar o comprometimento da confiabilidade ocasionado pela presença de fissuras, por estas estarem associadas a regiões de cisalhamento. Isto é perigoso, pois um dente quebrado gera a presença de material estranho no engrenamento, potencializando o esforço mecânico presente em todos os dentes. Além disso, as pequenas partículas oriundas de um cisalhamento podem se aderir ao próprio componente sob condições de trabalho tornando-se pontos de heterogeneidade geométrica ou concentradores de tensão, prejudicando o desempenho futuro do componente [14].

A Figura 5.c ilustra com uma maior resolução a trinca no dente da engrenagem "A". É possível verificar a aderência de material e deformação que esta partícula causa, devido às condições presentes de temperatura e, principalmente, pressão de contato. A tendência natural é que maior o desprendimento de material, maior o aumento gradativo da trinca, até que ocorra o cisalhamento por completo do dente da engrenagem.

O procedimento de análise da engrenagem "B" seguiu o mesmo procedimento. A Figura 6.a apresenta uma visão geral deste componente após o procedimento realizado de inspeção por líquidos penetrantes. A engrenagem "B" apresenta uma trinca bem acentuada em um dos seus dentes, apresentada na Figura 6.b.

As engrenagens "A" e "B" são críticas, pois ambas fazem a transmissão do torque de acionamento da prensa, armazenado no volante do equipamento, para as partes internas móveis da prensa, conforme ilustrado na Figura 2, portanto, apresentando maior vulnerabilidade e tendência de falhas. Por consequência da trinca acentuada detectada na engrenagem "B", mostrada em maior detalhe na Figura 6.c, tornou-se necessário uma análise mais profunda deste componente com o objetivo de quantificar seu tempo de vida útil.

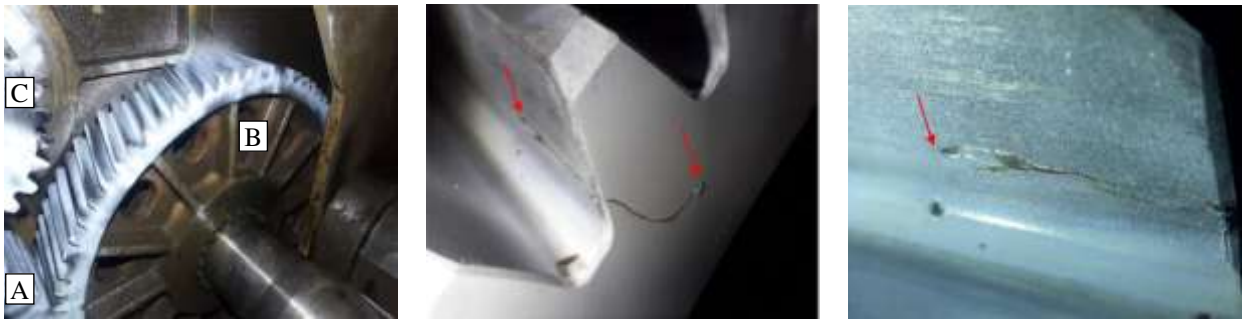
A mesma lógica foi adotada para avaliar a engrenagem "C". Contudo, é importante analisar que esta



(a) **(b)** **(c)**

Figura 5. Análise por líquidos penetrantes nos dentes da engrenagem "A": (a) registro de uma trinca com aprox. 7 mm de comprimento (indicada), (b) presença de cisalhamento de um dos dentes ao lado de uma fissura parcialmente isolada por duas perfurações (indicadas) e (c) presença de uma pequena fissura e de uma partícula aderida (indicadas).

Copyright © 2022 ISESC



(a) **(b)** **(c)**

Figura 6. Análise por líquidos penetrantes na engrenagem "B": (a) registro geral, (b) vista frontal de uma trinca isolada por uma perfuração lateral (indicada) e (c) visão da trinca sob a superfície do dente (indicada) e presença de

engrenagem tem contato com as engrenagens "A" (direto) e "B" (indireto), conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3. Portanto, este componente necessita de uma análise mais aprofundada a respeito de seu mal funcionamento.

Conforme ilustrado na Figura 7.a, a engrenagem "C" apresentou uma trinca (ainda) não muito acentuada no seu dente, porém ela que faz a transmissão do movimento do volante para as engrenagens "A" e "B" de modo a movimentar a prensa. Qualquer esforço mais acentuado na prensa este conjunto acaba sofrendo um esforço não planejado. Quando um dente é afetado em "A" ou "B" a engrenagem "C" acaba sofrendo em conjunto, propaga-se o prejuízo para as outras engrenagens.

Desta forma, toda vez que esta engrenagem apresentar desprendimento de material deveria ser avaliado de uma forma mais crítica a necessidade trocar apenas a engrenagem "C" para preservar a engrenagem "A" e "B", por conta do valor agregado. Qualquer fala eminente da engrenagem "C" compromete o funcionamento da máquina, podendo levar a uma parada de vários turnos.

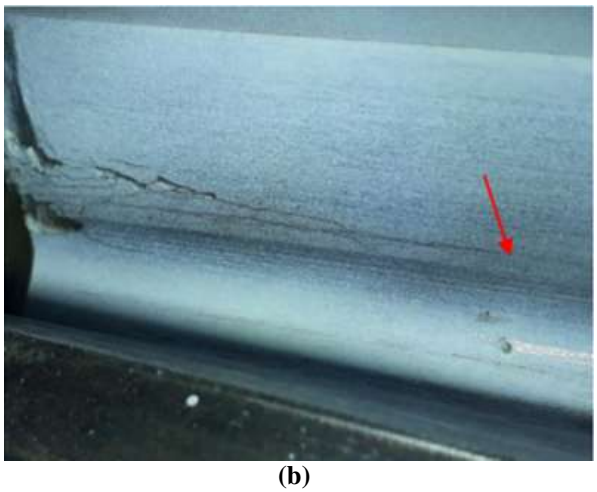
Apesar da engrenagem "C" ter apresentado apenas uma trinca em um dos dentes e pouca deformação e cisalhamento da ponta, foi recomendado o acompanhamento mensal da trinca quantificada, devido ao papel fundamental da engrenagem "C" para a transmissão de movimento da prensa.

5. Conclusões

Um estudo de confiabilidade deve proporcionar dados que possam descrever a integridade de um elemento mecânico. Particularmente no equipamento e componentes analisados, o aspecto relevante foi avaliar a posição e o tamanho das trincas e fissuras presentes, assim como a presença de rupturas (cisalhamentos) nos dentes das engrenagens mais críticas. Com esta avaliação é possível definir o ponto que não seja mais viável economicamente usar o equipamento devido ao risco de sua falha.



(a)



(b)

Figura 7. Análise por líquidos penetrantes na engrenagem "C": (a) vista geral e (b) trinca detectada (indicada).

Copyright © 2022 ISESC

O presente artigo teve como objetivo fazer o estudo de confiabilidade em uma engrenagem empregando resultados de inspeção por líquidos penetrantes, demonstrando a importância do uso deste método e os benefícios que este apresenta para a análise da criticidade de um equipamento. A propagação contínua das trincas detectadas pode ser monitorada e analisada, separadamente em cada componentes. Medidas de retardo e/ou bloqueio destas trincas, por exemplo, realizando perfurações nas suas extremidades, podem ser testadas para avaliar o aumento da durabilidade do componente. Portanto, é possível planejar uma manutenção corretiva de modo que eleve a vida útil do equipamento ao máximo.

Referências

1 MOUBRAY, J. **Novos Desenvolvimentos em Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Workshop – 11º Congresso Ibero Americano de Manutenção. Florianopolis, 2001, p.1-2.

2 CARVALHO, A. L. **Análise de Disponibilidade Utilizando Abordagem Nebulosa**. 2008. 123f. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Elétrica, Belo Horizonte.

3 CHAVES, F. A.; SARTORI, D. H. Q. ; BRAIDOTTI, F. R. ; LIMA, G. A. C. ; LARA, J. C. N. ; BRAIDOTTI JUNIOR, J. W. . **Entendendo a Gestão de Ativos (ISO 55.001) na Prática**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2020. v. 1. 166p.

4 GNEDENKO, B. USHAKOV, I. **Probabilistic Reliability Engineering**. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1995, 517p.

5 FLOGLIATO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1ª. ed. São Paulo: GEN LTC, 2009, 288p.

6 FREITAS, M. A; COLOSIMO, E. A. **Confiabilidade: Análise de Tempo de Falha e Testes de Vida Acelerados**. Coleção Ferramentas da Qualidade nº 12. Belo Horizonte: QFCO, 1997, 309p.

7 GANDARILLAS, A. L. C. E.; SILVA, A. G.; MELO, M. F.; SALVADOR, T. M. Plano para Melhorar a Confiabilidade de uma Unidade de Ácido Nítrico. **Unisanta Science and Technology**, 2019, V. 8 (2): 85-95.

8 FURINI, A.; MORAIS, W. A. Análise de Confiabilidade e Integridade de um Trocador de Calor Resfriado a Ar. **Unisanta Science and Technology**, v. 10 (1): 05-14, 2021.

9 SCHAEFFER, L.; NUNES, R. M. e BRITO, A. M. G. **Tecnologia da Estampagem de Chapas e Metálicas**. 1ª. ed. (reimpressão atualizada) Porto Alegre: RÍGEL, 2022, 136p.

10 MORAIS, W. A. **Análise dos Processos de Conformação: Volume 1 - Fundamentos Matemáticos-Mecânicos**. 1. ed. São Vicente: Willy Ank de Morais. São Vicente: WILLY ANK – Soluções para o Setor Metal-Mecânico, 2018, v. 1, 104p.

11 POLACK, A. V. **Manual Prático de Estampagem**. 1. ed. (reimpressão). São Paulo: Hemus, 2004. 224p.

12 PROVENZA, F. **Estampos I**. 1. ed. São Paulo: Editora F. Provenza/Pro-tec, 1990, 260p.

13 MORAIS, W. A.; TAVARES, M. M.; FARIAS, E. S. A Análise de falhas - Parte 4: Início de uma Análise de Falhas. **Siderurgia Brasil**, v. 15 (4): 34-39, 2014.

14 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.

Copyright © 2022 ISESC