



ANALYSIS METHOD AND PROBLEM SOLVING APPLIED TO THE MECHANICAL AXIS OF EQUIPMENT

MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS APLICADO EM EIXO MECÂNICO DE EQUIPAMENTO

Rafael Fagundes Sousa^{1✉}, Eduardo Martins de Oliveira¹, Luciana dos Santos Duarte², Osvaldo Abadia de Carvalho Filho³

¹Faculdades Kennedy, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

²Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

³Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

✉ rafafgsousa@hotmail.com

Recebido: 24 novembro 2019 / Aceito: 27 novembro 2019 / Publicado: 17 dezembro 2019

ABSTRACT. This paper performs an analysis of failure in an equipment, which had recurring failures in the transmission axis machine element. Through the MASP methodology and the use of tools such as Brainstorming and Ishikawa Diagram, it was possible to eliminate hypotheses and guide to identify the root cause, which was related to particularities of the machine element. Several analyzes were performed on the machine element: analysis with the naked eye, material hardness test and fracture analysis with the aid of Scanning Electron Microscope (SEM). After conducting several surveys, the information obtained with the analyzes was compared. It was identified that the recurring failure in the machine element axis of transmission was related to the manufacturing process, which provides points of concentration of tension and provides the appearance of cracks. As a corrective action, it was proposed to manufacture the prototype of the machine shaft element according to the dimensioning and tolerances of DIN standardization. The new object was analyzed during three months, period understood as sufficient to affirm that a proposal of correction was accepted, and presented no flaws. It is concluded that the fundamental cause has been interfered, thus establishing the expected operation of the equipment and eliminating the waste.

RESUMO. Este trabalho realiza uma análise de falha em um equipamento, o qual apresentava falhas reincidentes no elemento de máquina eixo de transmissão. Por meio da metodologia MASP e do uso de ferramentas como *Brainstorming* e Diagrama de *Ishikawa*, foi possível eliminar hipóteses e orientar para identificar a causa raiz, a qual estava relacionada a particularidades do elemento de máquina. Foram realizadas diversas análises no elemento de máquina: análise a olho nu, ensaio de dureza de materiais e análise de fratura com o auxílio de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Após a realização de várias pesquisas, foram confrontadas as informações obtidas com as análises realizadas. Identificou-se que a falha recorrente no elemento de máquina eixo de transmissão estava relacionada ao processo de fabricação, o qual proporciona pontos de concentração de tensão e propicia o aparecimento de trincas. Como ação corretiva, foi proposta a fabricação de protótipo do elemento de máquina eixo respeitando o dimensionamento e tolerâncias da normatização DIN. O novo objeto foi analisado durante três meses, período entendido como suficiente para afirmar que uma proposta de correção foi aceita, e não apresentou falhas. Conclui-se que a causa fundamental foi interferida, assim estabelecendo o funcionamento esperado do equipamento e eliminados os desperdícios.

Keywords: Failure Analysis, MASP, Quality, Maintenance.

Palavras-chave: Análise de Falhas, MASP, Qualidade, Manutenção.



1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira tem passado por grandes desafios como a globalização, os avanços tecnológicos dos países desenvolvidos, alta competitividade e a inconstância do mercado europeu (ABELE *et al*, 2008). Como agravante, o Brasil enfrenta uma grave crise política e econômica, que tem como efeito a redução de investimentos na indústria. Diante desse cenário, a indústria nacional busca otimizar seus recursos para reduzir custos, aumentar o desempenho e ser cada vez mais competitiva. Uma das estratégias industriais é investir em manutenção. De acordo com ABRAMAN (2013), nota-se o crescimento da utilização de métodos alternativos para melhorar a manutenção, isto é, da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM ou MCC).

Sabe-se que todos os produtos têm um ciclo de vida (são lançados, crescem, amadurecem e entram em declínio) e, caso ocorra falha prematuramente, provoca gastos desnecessários. Se a falha não for ocasionada por um acidente (como por exemplo, manuseio de forma inadequada) ou desgaste natural, o qual pode ocorrer devido à falta de manutenção preventiva periódica, poderá estar ligada a qualidade do produto ou do serviço. De acordo com Carpinetti (2012) o conceito de qualidade predominante nas últimas décadas e que representa a tendência futura é a qualidade como satisfação dos clientes. Já o conjunto de normas ISO 9000:2005 adota essa conceituação ao definir qualidade como “grau no qual um conjunto de características inerentes satisfaz a requisitos” (ISO, 2018). Quando as características não atendem aos requisitos predeterminados, expõe-se a maior probabilidade a falha.

Logo, diante de um mercado competitivo no qual as empresas buscam constantemente conter os desperdícios para aumentar a competitividade, a falha em um equipamento pode prejudicar fortemente. Neste trabalho, busca-se realizar análise de falhas com a finalidade de descobrir a causa fundamental da falha reincidente, a qual reflete em um elemento de máquina eixo e, assim, apresentar um plano de ação apropriado para eliminá-la e evitar futuras incidências. Dado o dinamismo do mercado, é priorizada a aplicação de metodologia de forma objetiva, para que seja localizada a possível causa raiz de forma mais rápida, a fim de reestabelecer a estabilidade de funcionamento do equipamento.



“Por que falhou?” É uma das primeiras perguntas que os engenheiros fazem quando ocorre algo indesejável como a falha. De acordo com Bloch & Geitner (2014), é necessário determinar de forma precisa as causas que provocaram a falha. Para isso, é preciso analisar e compreender o comportamento do equipamento. A utilização de ferramentas de análise direciona como realizar a investigação e possibilita identificar precisamente as causas raízes e, consequentemente, propor os reparos necessários para que a falha possa ser eliminada e a qualidade seja restabelecida.

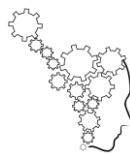
Assim, tendo como estudo de caso um equipamento mecanizado responsável por transportar os resíduos gerados por aves de uma indústria de alimentos, propõe-se como objetivo geral investigar a falha ocorrente em tal equipamento, com a utilização do Método de Análise e Solução de Problemas (MASP). Como objetivos específicos, busca-se compreender a funcionalidade e o objetivo do equipamento; delinejar hipóteses para a falha do equipamento da empresa; conhecer os impactos gerados à produção; e propor um novo objeto como solução.

A seguir, são apresentadas a metodologia da pesquisa, o referencial teórico, os resultados e discussão, e as considerações finais.

2 MÉTODO

A metodologia está dividida em quatro estágios. Na primeira etapa, teórica, compreende a revisão de literatura sobre as abordagens pertinentes, como um entendimento sobre MASP, e tópicos em engenharia dos materiais, como estrias, tensão e fraturas.

Em seguida, a etapa exploratória consistiu nos estudos de campo, com entrevistas e reuniões com colaboradores da empresa estudo de caso, bem como nos testes do objeto estudo de caso. A saber, o equipamento estudado se trata de um sistema mecanizado cujo objetivo é transportar os resíduos gerados por aves de uma empresa do ramo de alimentos, produtora de ovos. Esse transporte é realizado por uma esteira movimentada por sistema mecânico, o qual o elemento de máquina eixo é tracionado, fazendo com que a esteira se move, retirando os resíduos gerados pelas aves. Por questões de exposição de imagem da empresa, do equipamento, pessoal envolvido e fornecedores não foi permitido fornecer detalhes, mantendo informações em sigilo.



A falha do equipamento reflete sobre o elemento de máquina eixo mecânico, proporcionando a fratura dele. O MASP é utilizado para nortear a análise do problema focando na causa raiz. Devido à complexidade da análise, restrição de tempo e disponibilidade do laboratório, apenas uma unidade foi selecionada para análise, porém observou-se que as outras unidades as quais estavam na empresa, eram semelhantes. Com amostra de uma unidade do elemento de máquina eixo fraturado cedido pela empresa, são realizadas diversas análises para identificar as particularidades do componente. Inicia-se por análise a olho nu, a fim de avaliar a geometria do elemento. Em seguida, são preparadas amostras para realizar ensaio de microdureza usando microscópio para identificar o tipo de aço do componente através da dureza do material. E por fim, realização de análise da fratura com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para caracterizar o tipo de fratura do componente através da visualização ampliada.

Na sequência, na etapa de base experimental, as informações das etapas anteriores foram articuladas junto aos estudos realizados. Os resultados obtidos foram analisados quanto as suas particularidades, refletindo sobre o desempenho do equipamento, as causas e as consequências de sua falha. Por fim, as considerações finais foram tecidas, destacando pontos principais da pesquisa e indicando novas pesquisas acadêmicas.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, são apresentados os seguintes tópicos: MASP, *Brainstorming* (Tempestade de Ideias), Diagrama de *Ishikawa*, Ciência e Engenharia dos Materiais, Estrias, Concentrações de Tensões e Fundamentos da Fratura.

3.1 MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS

A metodologia MASP surgiu com o nome *QC-Story* nos sistemas de qualidade e melhoria contínua dos japoneses. Para Campos (2004), o método é peça fundamental para que o controle da qualidade possa ser exercido. A análise de processo é uma sequência de procedimentos lógicos, baseada em fatos e dados que objetiva localizar a causa fundamental dos problemas. Introduzida a literatura no Brasil com o nome de MSP – Método de Solução de Problemas. Logo se popularizou como MASP – Método de Análise e Solução de Problemas.



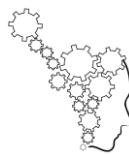
Para a sua aplicação, é fundamental a existência de histórico de ocorrência de situações a serem aprimoradas (PARKER, 1995). Utilizando o Ciclo de Deming como referência a JUSE (União Japonesa de Cientistas e Engenheiros), criou o *QC-Story* dividido em oito fases que foram traduzidas por Campos (2004) como: Identificação do problema; Observação; Análise; Plano de Ação; Ação; Verificação; Padronização; e Conclusão.

Como ferramentas auxiliares para o MASP, tem-se o *brainstorming* e o diagrama de *Ishikawa*. Enquanto a primeira é usada para listar o máximo de causas das falhas, a segunda serve para compreender a relação de causa e consequência das falhas.

Brainstorming ou “tempestade de ideias” é o nome dado à uma técnica realizada em grupo ou individual na qual são exploradas o potencial de ideias de maneira criativa com a finalidade de resolver problemas específicos. Pretende-se obter potenciais alternativas de soluções para um dado problema, dentro do contexto de qualidade com baixo risco de atitudes inibidoras (BAXTER, 2000). Por sua vez, o Diagrama de *Ishikawa*, conhecido também como Espinha de Peixe ou Diagrama de Causa e Efeito, possibilita estruturar hierarquicamente as possíveis causas de determinado problema ou oportunidade de melhoria. Sempre que algo ocorre (efeito, fim, resultado) existe um conjunto de causas (meios) que podem ter influenciado. Observando a importância da separação das causas de seus efeitos no gerenciamento e como tem-se a tendência de confundi-los, os japoneses criaram a ferramenta para separação dos fins de seus meios (CAMPOS, 2004). A utilização dessa ferramenta auxilia a identificação de causas de um problema e ajuda na estruturação da análise. Todavia para melhor compreensão na discussão dos resultados sobre as causas de falhas no equipamento estudado, faz-se necessária uma revisão de literatura sobre tópicos em Engenharia dos Materiais.

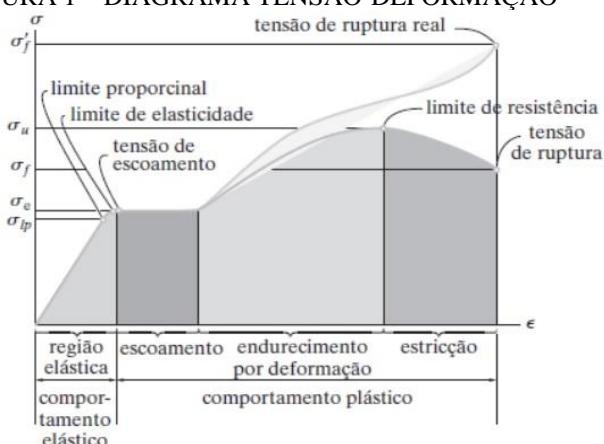
3.2 CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS

As propriedades mecânicas determinam o comportamento do material quando sujeitos a esforços. Relaciona-se à capacidade do material de resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura. Essa propriedade é inerente ao próprio material e deve ser determinada por métodos experimentais (HIBBEKER, 2010). Em um diagrama tensão-deformação convencional (Figura 01), pode-se verificar pontos importantes acerca dos comportamentos do material, bem como o limite de



proporcionalidade, o limite de elasticidade, a tensão de escoamento, o limite de resistência e a tensão de ruptura (HIBBEKER, 2010).

FIGURA 1 – DIAGRAMA TENSÃO-DEFORMAÇÃO



Diagramas de tensão-deformação convecional e real para um material dúctil (aço) (não está em escala)

FONTE: HIBBEKER (2010)

Estes são alguns dos critérios para estudar em que momento pode ocorrer uma ruptura do material.

3.3 ESTRIAS

As estrias são “chavetas construídas nos eixos” para transmitir mais torque do que seria possível pelas chavetas, que são necessárias para fixar engrenagens, polias, volantes, etc., em eixos. Com formas semelhantes a dentes, eixo e cubo se acoplam devido à similaridade pelo contorno externo do eixo e pelo contorno interno do cubo (NORTON, 2013).

Uma vantagem expressiva das estrias sobre as chavetas é a capacidade de acomodar, com folga adequada, longos movimentos axiais entre o eixo e o cubo ao mesmo tempo em que transmite o torque. Precisão do formato devido ao uso de ferramentas padronizados, bom acabamento superficial, o qual elimina a necessidade de retífica e resistência máxima na “raiz do dente” são algumas vantagens de sua utilização (NORTON, 2013). O carregamento, tanto variado quanto constante, em uma estria é especialmente torção pura. A manutenção de estrias em balanço mínimo e a inserção apropriada de mancais minimiza os momentos fletores (NORTON, 2013).



Da mesma maneira que com as chavetas, dois modos de falha são possíveis, esmagamento e cisalhamento. A falha por cisalhamento geralmente é o modo limitante. Se não houvesse nenhuma variação na espessura do dente ou do espaçamento da estria, todos os dentes compartilhariam cargas iguais (NORTON, 2013).

3.4 CONCENTRAÇÕES DE TENSÃO

Segundo Hibbeler (2010), aplicando uma força axial a um elemento, cria-se uma distribuição de tensão complexa dentro de uma região localizada do ponto de aplicação da carga. Essa distribuição pode surgir sob um carregamento concentrado e também em seções nas quais a área da seção transversal do elemento muda. Considerando que um material se comporte de maneira linear elástica e/ou se a seção transversal sofrer redução com a utilização, à distribuição de tensão que age sobre essa seção ocorrerá na menor área de seção transversal.

Fatores de concentração de tensão foram estabelecidos com base em um carregamento estático, considerando que a tensão no material não ultrapassa o limite de proporcionalidade. O material sendo dúctil e estando submetido a uma carga estática, costumeiramente os projetistas desprezam a utilização de fatores de concentração de tensão, pois sabe-se que nenhuma tensão que ultrapasse o limite de proporcionalidade resultará em uma trinca. Caso o determinado material seja muito frágil, o limite de proporcionalidade poderá ser igual à tensão de ruptura, logo a falha iniciará no ponto de concentração de tensão quando o limite de proporcionalidade for atingido. Por isso, é importante a utilização de fatores de concentração de tensão em projetos os quais utilizam materiais frágeis (HIBBEKER, 2010).

Quando se altera a seção transversal de uma barra, determina-se teoricamente que um canto vivo produz um fator de concentração de tensão normal máxima três vezes maior do que a tensão normal média na menor seção transversal. Essa tensão pode ser reduzida ao meio inserindo um raio de concordância. Pode-se haver uma redução adicional da tensão através de furos na zona de transição ou pequenas ranhuras.

Essa adequação da forma geométrica do elemento ajuda a reduzir a rigidez nas proximidades dos cantos, de maneira que a deformação e a tensão se distribuam mais uniformemente por toda a barra.



3.5 FUNDAMENTOS DA FRATURA

A fratura simples consiste no rompimento do corpo em duas ou mais partes devido a certa tensão constante ou que se modifica lentamente ao decorrer do tempo e às temperaturas baixas, considerando a temperatura de fusão do material. A tensão poderá ser de: torção, compressão, cisalhamento ou tração de cargas uniaxiais (CALLISTER & RETHWISC, 2002).

Para materiais na engenharia, as fraturas são classificadas de acordo com características obtidas através da ocorrência de deformação plástica e estão intimamente relacionadas com a formação e propagação de trincas. Elas podem ser dúcteis ou frágeis. Essa classificação está relacionada com a capacidade de absorção de energia dos materiais. As fraturas dúcteis absorvem grande quantidade de energia antes de haver a fratura e apresenta deformação plástica. Já as fraturas frágeis, baixa absorção de energia e pouca ou nenhuma deformação plástica (CALLISTER & RETHWISC, 2002).

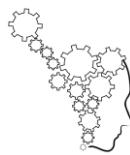
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de compreender o problema, foram realizadas visitas à empresa para coletar informações, questionar, inferir e discutir possibilidades. Nas primeiras visitas, buscou-se compreender o equipamento, para então prosseguir com a investigação. Todas as visitas foram acompanhadas do responsável pela manutenção e/ou por mecânicos. Conhecido o equipamento, ocorreram outras visitas, já com uma série de questionamentos e inferências. Os questionamentos foram avaliados e respondidos. Assim, esta seção apresenta de forma sintética como foi desenvolvida a análise do problema, em ordem cronológica.

4.1 FOLHA DE VERIFICAÇÃO

A Folha de Verificação é uma maneira de organizar e apresentar os dados em formato de quadro, tabela ou planilha, o que facilita a coleta e análise dos dados. Na empresa em que se localiza o equipamento estudo de caso, foram vistas as falhas ocorridas durante um mês (Tabela 01).

O responsável pelo Departamento de Manutenção da empresa não tinha o registro das falhas ocorridas, devido à realização constante de manutenção corretiva. Por isso, foi aplicada a Folha de Verificação em um mês aleatório a partir da proposta de pesquisa, com o objetivo



de quantificar o número de falhas ocorridas em um mês, e também para tentar estabelecer relações entre a função e a falha. Conforme demonstrado a seguir (Tabela 1), foram contabilizadas 43 quebras do elemento de máquina eixo em um mês aleatório. Não se sabe mensurar precisamente a quanto tempo existe o defeito, apenas que ocorre em torno de um ano. E também, não se sabe se essa quantidade medida se repete a cada mês que a falha não é solucionada. Segundo informação verbal de colaborador, a quantidade de quebras em cada mês varia em torno da quantidade medida.

TABELA 1 – FOLHA DE VERIFICAÇÃO

| DIAS DO MÊS | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----------------------------------|----|----|----|----|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| N.º DE QUEBRAS | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| DIAS DO MÊS | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| N.º DE QUEBRAS | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 |
| TOTAL DE QUEBRAS OCORRIDAS NO MÊS | | | | | 43 unidades | | | | | | | | | | |

FONTE: Os autores (2017)

Sabe-se que os elementos de máquina eixo que foram instalados no equipamento não são originais do fabricante, isto é, são de um de seus fornecedores. O responsável pela manutenção informou que a empresa optou por um fornecedor regional devido ao tempo gasto com o ressuprimento do produto original, pois o equipamento não é de origem nacional. No equipamento, há quatro unidades do elemento de máquina eixo e a falha ocorre em qualquer um deles. Não coexiste relação com tempo (ocorre de forma aleatória) e o carregamento é sempre constante.

O equipamento não tem variação de funcionamento, ou seja, toda vez que entra em funcionamento, exerce o mesmo esforço (informação do responsável pela manutenção). Funciona duas vezes ao dia (manhã e tarde) por cerca de 30 minutos. A quebra do eixo ocorre espontaneamente, ou no início ou durante o funcionamento, não sendo possível perceber a olho nu sinais de que o elemento irá quebrar.

4.2 BRAINSTORMING

Com a finalidade de listar o máximo de possibilidades de causas que pudessem influenciar de alguma maneira a falha, foi aplicado um *brainstorming* buscando responder a



seguinte pergunta: “O que pode ter levado a constante fratura do elemento eixo estriado?”
Algumas respostas são listadas a seguir.

- Ajustes, tolerâncias dimensionais, tolerâncias geométricas, torques e tensores fora da especificação; Produtos fora de especificação do equipamento; Desalinhamento; Dimensionamento inadequado;
- Fadiga; Desgaste natural; Ausência de manutenção periódica; Procedimento de instalação incorreto; Algum tipo de adaptação a qual sobrecarregue o equipamento; Estado físico dos componentes que influem diretamente ou indiretamente sobre o eixo;
- Rodas dentadas as quais são acopladas no eixo fora da especificação; Correntes não-conforme; Falha no conjunto motor-redutor; Material de fabricação do eixo; Geometria das estriadas do eixo;
- Ambiente agressivo (contato com substâncias que podem deteriorar o material); Travamento; Sobrecarga; Regime de utilização fora do especificado; *Start* espontâneo do equipamento em alta velocidade;

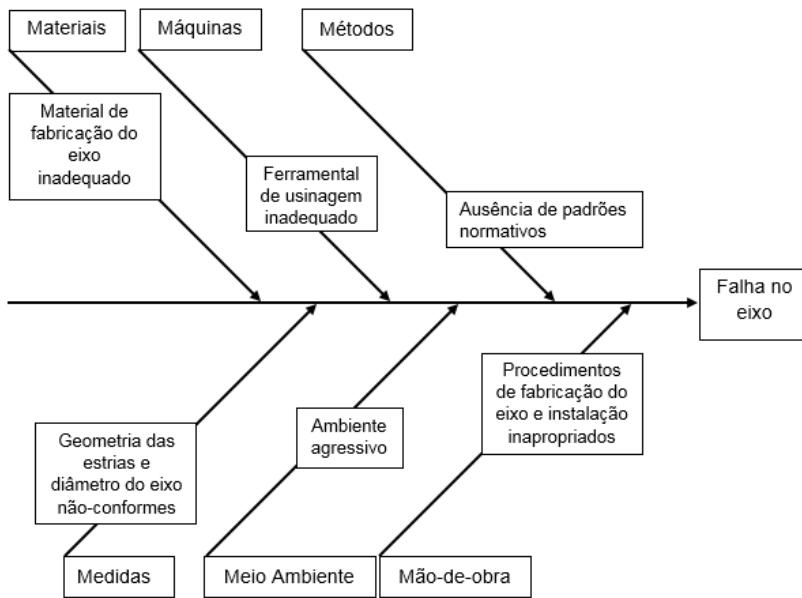
Verificou-se com o responsável pelo departamento de manutenção todas as possíveis causas listadas acima. Devido a maioria das variáveis estarem em conformidade, delimitou-se o foco da pesquisa à falha do elemento de máquina eixo estriado, bem como material de fabricação do eixo, geometria das estriadas e análise de fratura.

4.3 DIAGRAMA DE ISHIKAWA

Após realizado o *brainstorming*, e considerado um direcionamento à falha ao elemento eixo mecânico, pretendeu-se apontar possíveis causas de forma mais específica, por meio do diagrama Espinha de Peixe (Figura 2).



FIGURA 2 – DIAGRAMA DE ISHIKAWA PARA QUEBRA DO EIXO



FONTE: Os autores (2017)

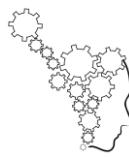
Foram considerados no diagrama, as principais causas (meios) que podem ter proporcionado a quebra do elemento de máquinas eixo (fim). O diâmetro do eixo não-conforme e material de fabricação do eixo com propriedades abaixo do exigido podem provocar a quebra prematura. Procedimentos de fabricação com ausência de padrões normativos e ferramentas de usinagem inadequadas podem proporcionar inconformidade na geometria das estriadas e surgimento de trincas. Devido a contaminação gerada pelos resíduos das aves, considera-se o ambiente agressivo. Procedimento de instalação inapropriado do elemento pode afetar no desempenho e proporcionar a quebra de componentes. A seguir, é descrito os ensaios realizados com a amostra do elemento.

4.4 ANÁLISE VISUAL DA AMOSTRA

A empresa cedeu uma unidade do elemento de máquina eixo estriado fraturado para realização das análises e ensaios necessários para identificar a causa raiz.

A primeira análise foi realizada macroscopicamente com a intenção de avaliar o processo de fabricação, dimensões (para identificar a normatização regente) e verificação da geometria da estria.

Pode-se perceber que a amostra apresentou ausência de raios, ou seja, apresenta cantos vivos o que gera um fator de concentração de tensão de aproximadamente três vezes mais que a tensão nominal.

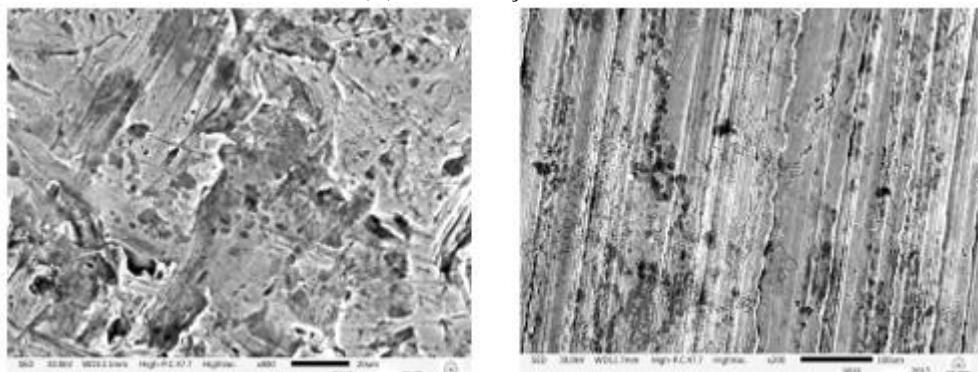


De acordo com as medidas extraídas e pesquisas realizadas, pode-se apontar a normatização DIN 5472 para o componente. A amostra não apresentou uniformidade nas medidas.

4.5 ANÁLISE DA FRATURA

A análise de fratura foi realizada por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV, da marca JEOL, modelo JSM-IT300. Foi realizado um corte com a serra fita da marca Franho FM 1600, de aproximadamente 5mm do eixo para separar a fratura do comprimento total e levá-la ao microscópio. A fractografia eletrônica de varredura pode ser vista em duas ampliações (Figura 3).

FIGURA 3 – FRACTOGRAFIA ELETRÔNICA DE VARREDURA DA FRATURA. (A) AMPLIAÇÃO 800X.
(B) AMPLIAÇÃO 200X



FONTE: Os autores (2017)

Analizando os aspectos entre as imagens obtidas no MEV da fratura com o que Callister & Rethwisc (2002) afirmam, conclui-se que a fratura é de origem frágil. Esse tipo de fratura ocorre repentinamente mediante a evolução de uma trinca a qual provoca uma superfície relativamente plana devido à expansão relativamente perpendicular da trinca em relação a tensão de tração aplicada (CALLISTER & RETHWISC, 2002). As superfícies das fraturas frágeis apresentam próprios padrões de distinções, extinguindo a presença generalizada de deformação plástica.

4.6 ANÁLISE DO MATERIAL

Para identificação do material, realizou-se os seguintes procedimentos instruído de forma empírica por especialista em materiais e baseado nos Ensaios de Microdureza Knoop e



Vickers citados por Callister & Rethwisch (2002) para preparar e realizar ensaios com as amostras:

- Corte com a serra fita, Franho FM 1600, de três partes com aproximadamente 5mm de espessura;
- Embutimento a quente com baquelite das três amostras;
- Polimento com as seguintes lixas: 180, 220, 320, 400, 500, 600, 1200, 2000 e feltro (alumina 1 μ c). Para cada troca de lixa, a amostra foi rotacionada em 90°;

Após preparo das amostras, foi realizado ensaio de microdureza *Vickers* (Figura 4).

FIGURA 4 – MICROSCÓPIO PARA ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

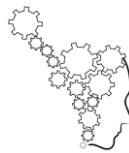


FONTE: Os autores (2017)

Foram realizadas 18 medições e obteve-se uma média de 235,86 HV 0,3 kgf/20s (224 HB) com desvio padrão de 18,21. Comparando os resultados obtidos com os dados do catálogo da empresa Arcelor Mittal (2013), pode-se afirmar que o material do elemento de máquina é aço-carbono e, considerando o desvio padrão, está entre os aços SAE 1050 e 1060 (Tabela 2).

TABELA 2 – DUREZAS ESPERADAS EM AÇOS-CARBONO E LIGADOS NO ESTADO
 NORMALIZADO EM FUNÇÃO DA BITOLA

| ABNT/ SAE/ AISI | Temperatura de normalização (°C) | Valores de dureza (HB) para diâmetros em mm | | | |
|--|---|---|------------|------------|------------|
| | | 13 (1/2") | 25 (1") | 50 (2") | 100 (4") |
| Aço-carbono para beneficiamento | | | | | |
| 1030 | 925 | 156 | 149 | 137 | 137 |
| 1040 | 900 | 183 | 170 | 167 | 167 |
| 1050 | 900 | 223 | 217 | 212 | 201 |
| 1060 | 900 | 229 | 229 | 223 | 223 |
| 1080 | 900 | 293 | 293 | 285 | 269 |
| 1095 | 900 | 302 | 293 | 269 | 255 |



| | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1137 | 900 | 201 | 197 | 197 | 192 |
| 1141 | 900 | 207 | 201 | 201 | 201 |

FONTE: Os autores (2017); adaptado do catálogo ArcelorMittal, (2013, p. 65)

O objetivo desta análise foi identificar o material aplicado no elemento de máquina, pois não se sabia qual era e, intuitivamente, pensava-se ser um aço de baixo carbono devido ao aspecto visual da fratura, já que a empresa não soube informar qual era o material aplicado no elemento de máquina eixo.

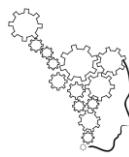
4.7 MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS APLICADO EM EQUIPAMENTO

O Quadro 1 ilustra o resumo das atividades realizadas através das fases do MASP. Com a aplicação da metodologia foi possível identificar a causa fundamental e apresentar um plano de ação para intervir, o qual seguiu as etapas listadas abaixo.

QUADRO 1 – MÉTODO DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE PROBLEMAS APLICADO EM EIXO MECÂNICO

| Fases do MASP | Descrição da fase | Atividades realizadas e resultados |
|---------------------------|---|---|
| Identificação do problema | Definir claramente o problema e reconhecer sua importância | Falha reincidente em eixo mecânico. Essa falha interrompe o funcionamento do equipamento, gerando gastos com manutenção demasiadamente |
| Observação | Investigar as características específicas do problemas com uma visão ampla e sob vários pontos de vista | Estudos de campo, com entrevistas e reuniões com colaboradores e aplicação de Folha de Verificação |
| Análise | Descobrir as causas fundamentais | Aplicação de <i>Brainstorming</i> e Diagrama de <i>Ishikawa</i> |
| Plano de ação | Conceber um plano para bloquear as causas fundamentais | Pesquisa do comportamento dos materiais, pesquisa de normalização aplicável ao componente, análise da fratura e análise do material |
| Ação | Bloquear as causas fundamentais | Analizar componente conforme material didático e norma técnica. Aplicar ação proposta, isto é, desenvolver e produzir novo eixo mecânico. |
| Verificação | Verificar se o bloqueio foi efetivo | Comparação do eixo antigo, com falhas, e do novo eixo desenvolvido. As ações propostas reagiram positivamente |
| Padronização | Prevenir contra o reaparecimento do problema | Instalação de peças de reposição do elemento de máquina com a nova geometria proposta |
| Conclusão | Recapitular todo o processo de solução do problema para trabalho futuro | Parecer final de análise e documentação do processo. |

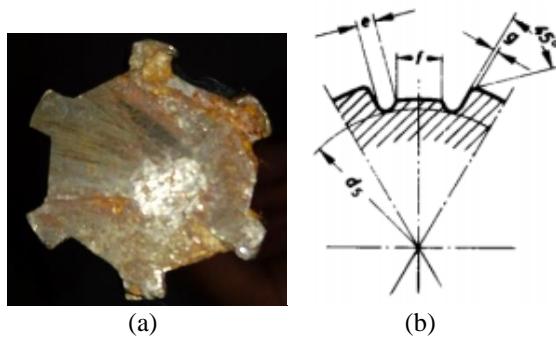
FONTE: Os autores (2017); quadro adaptado de CAMPOS (2004)



4.8 AÇÃO PROPOSTA

Devido a fratura ser extremamente frágil (Figura 05 a), propõe-se como medida de correção: alterar a geometria da estria para minimizar a concentração de tensão e melhorar a distribuição de esforços. O formato de estria proposto é mostrado a seguir (Figura 05 b).

FIGURA 5 – TIPO DE ESTRIA. (A) IMAGEM DO EIXO FRATURADO; (B) IMAGEM DA GEOMETRIA PROPOSTA



FONTE: (a) Os autores (2017), (b) Norma DIN 5472 (1980)

Foi considerado a norma DIN 5472 tipo A, com 6 dentes, diâmetro menor $d_5 = 21$ mm, diâmetro maior igual a 25 mm (diâmetro do eixo), largura do dente de 5 mm, $e = 1,98$ mm, $f = 1,95$ mm e $g = 0,3$ mm. Com essas especificações, foi desenvolvido e produzido o novo eixo mecânico.

4.9 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Foram contabilizadas 43 quebras do elemento de máquina em um mês. Diante das análises realizadas, foi proposto a produção de um protótipo do elemento de máquina eixo com modificação do formato das estrias com o objetivo de aliviar as tensões no componente. Após a proposta de correção, monitorou-se o equipamento por três meses, período entendido como suficiente para afirmar que uma proposta de correção foi aceita. Não ocorreram quebras da mesma natureza no período de monitoramento. Comparando-se o número de quebras antes e depois da aplicação das ações, e levando em consideração o período monitorado, pode-se afirmar que as medidas realizadas responderam satisfatoriamente ao problema. O protótipo instalado não foi retirado do equipamento para avaliar o estado físico após submetido ao regime de trabalho. Logo, considera-se que as medidas foram satisfatórias, pois não houve quebras no período monitorado e não foi percebido alterações vistas a olho nu.



5 CONCLUSÃO

A análise de falhas realizada com o auxílio do MASP possibilitou identificar a causa fundamental do problema. A intenção foi usar o mínimo de ferramentas para tornar o processo mais ágil. Ademais, com as medições realizadas em um mês, foi possível quantificar o número de falhas ocorridas e consequentemente, o mesmo número de vezes de manutenção corretiva.

No início do trabalho, foram estudadas diversas variáveis e hipóteses relacionadas, de alguma maneira, à falha do elemento de máquina eixo estriado. Conforme foi ocorrendo a investigação, junto com colaboradores e especialistas, foram sendo eliminadas hipóteses e suposições, delimitando a pesquisa a um único componente. Este elemento, foi analisado de vários modos pela amostra que foi cedida para tal fim. Em uma análise feita a olho nu, a amostra apresentou falha no processo produtivo, o que ocasiona o surgimento de pontos de concentração de tensões os quais propiciam o aparecimento de trincas. A análise metalográfica permitiu identificar o material. As imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura, viabilizaram a análise da fratura com propriedade. As imagens apresentaram um tipo de fratura extremamente frágil. Contudo, devido a forma de fratura captada pelas imagens, pode-se apontar como causa raiz as imperfeições das estrias. Essa não conformidade está relacionada ao seu processo de fabricação, gerando um gradiente de concentração de tensão. Devido a falha estar relacionada a concentração de tensão, não é possível afirmar que o material está ou não correto. Se a geometria estivesse adequada, poderia-se pensar que o material estava incorreto e sugerir alterá-lo para outro com propriedades superiores ao material aplicado. Ainda assim, seria necessário comprovar através de cálculos para sustentar a alteração. O fator de concentração de tensão impede inferir qualquer possibilidade acerca do material. Assim, não é possível afirmar com propriedade se o material utilizado está ou não adequado a aplicação.

Diante dessas análises, foi proposto e aceita a devida correção quanto a proposição de nova geometria da peça. O novo eixo mecânico, produzido com a geometria proposta, teve seu desempenho analisado pela Folha de Verificação, durante mais de 90 dias, não tendo registrado falhas dessa natureza no equipamento. Devido ao não aparecimento de falhas, pode-se concluir que a ação corretiva foi eficaz, pois permitiu reestabelecer o funcionamento esperado atendendo as necessidades.



Devido a limitação de páginas, o tema foi abordado brevemente. Pode-se citar como sugestões para trabalhos futuros: abordar detalhadamente a análise, bem como destacar cálculos e ensaios; detalhar análise metalográfica; realizar análise de elementos finitos; avaliar quais ferramentas se aplicariam à falha sem restrição de uso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à instituição Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG) por propiciar a realização das análises de materiais. Agradecem ainda, ao professor doutorando André Bragança Carvalho França que orientou e conduziu os ensaios e análises realizados no Laboratório de Materiais de Construção Mecânica.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

- Rafael Fagundes Sousa e Eduardo Martins de Oliveira foram responsáveis pela concepção e desenho da pesquisa, Rafael Fagundes Sousa, Osvaldo Abadia de Carvalho Filho e Eduardo Martins de Oliveira fizeram a obtenção dos dados, análise, interpretação e análise estatística. Rafael Fagundes Sousa, Eduardo Martins de Oliveira, Osvaldo Abadia de Carvalho Filho e Luciana dos Santos Duarte elaboraram a redação do manuscrito e Rafael Fagundes Sousa, Eduardo Martins de Oliveira, Osvaldo Abadia de Carvalho Filho e Luciana dos Santos Duarte fizeram a revisão crítica do manuscrito quanto ao conteúdo.

REFERÊNCIAS

- ABELE, E., MEYER, T., NÄHER, U., STRUBE, G., SYKES, R. **Global Production – A Handbook for Strategy and Implementation**, 1 sted., SpringerVerlag Berlin Heidelberg, 2008.
- ABRAMAN. Associação Brasileira de Manutenção. **A situação da manutenção no Brasil**. Documento Nacional, 2013. Disponível em <<http://www.abraman.org.br/Arquivos/403/403.pdf>> Acessado em Outubro de 2018.
- BAXTER, M. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. Blucher, São Paulo, 2000.
- BLOCH, H. P.; GEITNER, F. K. **Análise e Solução de Falhas em Sistemas Mecânicos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISC, D.G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed., São Paulo: Editora LTC, 2002.
- CAMPOS, V. F. **TQC – Controle da Qualidade Total: No Estilo Japonês**. 8. ed. Nova Lima: INDG Tecnologia e Serviços LTDA., 2004.
- CARPINETTI, L. C. R. **Gestão da Qualidade: Conceitos e técnicas**. 2. ed., São Paulo: Atlas, 2012.



DIN. Deutsches Institut für Normung. **DIN 5472: Machine Tools: Spline shafts And Spline Bore Profiles with 6 Splines**: Internal Centering Dimensions, 1980.

GUIA DO AÇO - ArcelorMittal. **Durezas Esperadas em Aços-carbono e Ligados no Estado Normalizado em Função da Bitola**. Disponível em <<http://www.arcelormittal.com.br/pdf/quem-somos/guia-aco.pdf>> Acessado em 11 Out. de 2018.

ISO. **ISO 9000:2005 – Quality management system**. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/42180.html>> Acesso em 13 de Out. de 2018.

HIBBEKER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed., São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. 4. ed., Porto Alegre: Bookman, 2013.

PARKER, G. W. **Structured Problem Solving: A Parsec Guide**. Hampshire: Gower, 1995.