



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**EMANUEL MARTINELLI LIMA**  
**FELIPE THEODORO SILVA HERZOG**

**ANÁLISE DE FALHA DO ELEMENTO DE FIXAÇÃO DO CILINDRO  
HIDRÁULICO DE ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE CORTE E  
FURAÇÃO: ESTUDO DE CASO**

VITÓRIA

2011

**EMANUEL MARTINELLI LIMA**  
**FELIPE THEODORO SILVA HERZOG**

**ANÁLISE DE FALHA DO ELEMENTO DE FIXAÇÃO DO CILINDRO  
HIDRÁULICO DE ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE CORTE E  
FURAÇÃO: ESTUDO DE CASO**

Projeto de Graduação elaborado para complementação do curso superior em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientadora: Karin Faria Pinho

VITÓRIA

2011

**EMANUEL MARTINELLI LIMA**  
**FELIPE THEODORO SILVA HERZOG**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2011.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. MsC. Karin Faria Pinho**

**Orientadora**

---

**Prof. Dr. Marcelo C. Severo de Macêdo**

**Examinador**

---

**Eng. José Guilherme Pancieri**

**Examinador**

Os problemas significativos que enfrentamos não podem ser resolvidos no mesmo nível de pensamento em que estávamos quando os criamos.

Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus pelas oportunidades que nos foram dadas na vida, principalmente por termos conhecido pessoas e lugares interessantes, mas também por termos vivido fases difíceis, que foram matérias-primas de aprendizado.

Não podemos deixar de agradecer à Karin, nossa orientadora, pela paciência, inspiração, motivação e inúmeras contribuições, sem as quais esse projeto de graduação não teria se concretizado.

A Pablo Altoé Amorim pelo pontapé inicial.

Aos colegas pelos bons e conturbados momentos que juntos passamos durante a faculdade!

Agradecemos aos nossos familiares pelo carinho, incentivo e cumplicidade tão indispensáveis.

A todos só podemos dizer: Muito Obrigado!

## RESUMO

Este projeto de graduação tem o objetivo de realizar uma análise de falha da quebra do parafuso localizado na extremidade da haste do cilindro hidráulico de acionamento de uma morsa que faz parte de uma máquina de corte e furação. Como tal fato ocorreu duas vezes em um curto espaço de tempo e como o equipamento é elemento fundamental da linha de produção da empresa, torna-se interessante averiguar os motivos ensejadores dessa situação. Para tanto serão realizadas várias etapas de estudo a fim de se chegar à causa raiz, modo de falha e, se possível, propor melhorias no equipamento com o intuito de evitar a quebra recorrente.

Palavras-chave: Análise de falha, fratura frágil, parafuso, cilindro hidráulico.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagramação de eventos e fatores causais. [6].....	19
Figura 2: Atuação da análise de falha no processo produtivo. [13] .....	23
Figura 3: Parafusos com fratura frágil (a) e fratura dúctil (b) .....	31
Figura 4: Representações de concentração de tensão .....	32
Figura 5: Máquina utilizada nos processos de furação e corte(CPI 126DI e T3CH 126 Danobat): transportador de rolos (a), os pontos de acionamento pelos operadores (b) e ao fundo a máquina de furação (c).....	44
Figura 6: Máquina utilizada nos processos de furação e corte(CPI 126DI e T3CH 126 Danobat). São vistas as ferramentas de furação e, ao fundo, a mesa onde é realizado o corte (b).....	44
Figura 7: Morsa com seu sistema de acionamento e fixação. Indicação de onde ocorreu a falha .....	45
Figura 8: Cilindro de movimentação da morsa. ....	46
Figura 9: Medição do curso da haste do cilindro totalmente aberto, 1215 mm. ....	46
Figura 10: Fratura no parafuso do terminal rotular de fixação.....	50
Figura 11: Visualização de topo da falha explicitando a seção resistente da peça ...	53
Figura 12: Indicações das seções onde foram feitas as microscopias pelo MEV .....	53
Figura 13: Micrografia eletrônica de varredura realizada na região de sobrecarga. Vêm-se marcas de rios (padrões em leque) indicadas pelas setas. ....	54
Figura 14: Micrografia eletrônica de varredura realizada na região propagação, mais próximo da região de sobrecarga. Vêm-se marcas de rios (padrões em leque) indicadas pelas setas. ....	54
Figura 15: Micrografia eletrônica de varredura realizada na região propagação, mais próximo da região de iniciação. Vêm-se marcas de rios (padrões em leque) indicadas pelas setas. ....	55
Figura 16: Fotografia do corte da peça. Os pontos que foram visualizados no MEV estão indicados pelas setas. ....	56

Figura 17: Ponto 1 - Dentes próximos a fratura. As bases dos vãos entre dentes não possuem trincas iniciais. Vê-se um dente com irregularidade de forma no seu topo (a).....	56
Figura 18: Ponto 3 - Visualização dos dentes da rosca. Não há a presença de trincas ou deformações, com a forma ideal com a integridade preservada. ....	57
Figura 19: Ponto 2 - Interseção do dente com a fratura. Uma grande deformação é notada. ....	57
Figura 20: Ponto 4 - Visualização do vão entre dentes. São notadas marcas de desgaste e possível início de trinca indicada pela seta. ....	58
Figura 21: Proposta de filete para redução da concentração de tensão na seção de mudança de diâmetro.....	62



## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Diagrama força versus deslocamento mostrando um comportamento do tipo frágil (curva a) e um comportamento dúctil (curva b). Fonte: Introdução à engenharia metalúrgica, Nestor Cezar Heck.....27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações da máquina de corte CPI 126DI(Dados da Danobat). .....47

Tabela 2: Especificações da máquina de furação T3CH 126(Dados da Danobat)....48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍGLAS

CNC Comando Numérico Computadorizado

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
2.1 EMPRESA .....	15
2.2 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ESTRUTURAS METÁLICAS.....	17
<b>2.2.1 Estruturas Metálicas .....</b>	<b>17</b>
2.3 MANUTENÇÃO.....	17
<b>2.3.1 Definição .....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2 Conceitos .....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.3 Tipos de Manutenção.....</b>	<b>20</b>
<b>2.3.4 Gerenciamento da Manutenção .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.5 Engenharia de Manutenção .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3.6 Análise de Falhas .....</b>	<b>22</b>
2.4 OCORRÊNCIA DE FALHAS.....	24
<b>2.4.1 Causas fundamentais de falhas .....</b>	<b>24</b>
<b>2.4.2 Mecanismos de Falha .....</b>	<b>26</b>
<b>2.4.3 Falhas de componentes.....</b>	<b>29</b>
<b>2.4.4 Concentração de tensão.....</b>	<b>31</b>
2.5 ETAPAS DE UMA ANÁLISE .....	32
<b>2.5.1 Coleta de dados e seleção de amostras.....</b>	<b>33</b>
<b>2.5.2 Exame preliminar da peça que falhou .....</b>	<b>34</b>
<b>2.5.3 Ensaios não destrutivos .....</b>	<b>34</b>
<b>2.5.4 Ensaios mecânicos .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.5 Seleção, identificação, preservação e limpeza de superfícies de fratura.....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.6 Exame macroscópico da fratura .....</b>	<b>36</b>

2.5.7	Exame microscópico da fratura .....	36
2.5.8	Seleção e preparação de seções para análise metalográfica .....	37
2.5.9	Exame e análise das seções metalográficas .....	38
2.5.10	Análise química .....	38
2.4.11	Aplicação da mecânica da fratura.....	39
2.4.12	Teste sob condições simuladas de serviço .....	40
2.4.13	Considerações.....	41
3	ESTUDO DE CASO .....	42
3.1	EQUIPAMENTOS CPI126DI (CORTE) E T3CH126 (FURAÇÃO) DO FABRICANTE DANOBAT .....	42
3.1.1	Processo Produtivo e Operação .....	42
3.1.2	Descritivo do equipamento .....	43
3.1.3	Especificações.....	47
3.1.4	Procedimentos de Manutenção do equipamento .....	48
3.1.5	Parâmetros de serviço .....	49
3.2	IDENTIFICAÇÃO DA FALHA.....	49
3.2.1	Descritivo da falha.....	49
3.2.2	Registros das falhas .....	50
3.2.3	Identificação das causas .....	50
3.2.4	Processo Investigativo .....	51
3.2.5	Análise da superfície de fratura .....	51
4	DISCUSSÃO.....	60
5	CONCLUSÃO .....	61
6	PROPOSTAS DE MELHORIAS.....	62
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos fatores influenciam o bom funcionamento de um maquinário e das peças que o compõe. O modo em que o mesmo é operado, o tempo de funcionamento, seu projeto, os materiais empregados na sua construção e sua manutenção, são alguns desses fatores. Anormalidades recorrentes em algum desses equipamentos, que diferem do projeto ou aconteçam em períodos de tempo menores que os previstos, são considerados como gatilho para que seja realizada uma análise de falha no componente.

A Análise de Falha visa, por meio de estudos aprofundados, a identificação da causa raiz da falha e em seguida propor ações e melhorias para que o equipamento trabalhe sem que a falha indicada seja recorrente, pois a cada falha em um componente crucial de um equipamento (ou em equipamento gargalo para o processo produtivo), as despesas e o tempo para a manutenção significam diminuições e perdas substanciais nos lucros.

Neste Projeto de Graduação, será realizada a análise de falha de um componente mecânico essencial de um maquinário de furação e corte de estruturas metálicas, que é um terminal rotular com fixação feita por meio de um parafuso na ponta de um atuador hidráulico. O terminal rotular é parte integrante de uma morsa que restringe o movimento dos perfis metálicos para que seja executada a furação e posteriormente o corte.

Este maquinário faz parte do sistema de produção de uma empresa, cuja filial se localizada em Serra, ES, fabrica perfis metálicos para montagem de estruturas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Empresa

A empresa em questão é uma empresa de Chapecó/SC com filial no Espírito Santo, na região de Civit1, e reconhecida no mercado nacional por produzir estruturas em aço com alta tecnologia e padrões de acabamento. Principal compradora de aço e maior fabricante de estruturas metálicas de Santa Catarina, também está entre as grandes indústrias de estruturas do Brasil.

Para a garantia da qualidade, a empresa somente adquire matéria-prima de fornecedores que comprovam padrão de qualidade através da emissão de certificado de origem. Na fabricação, são utilizados equipamentos de última geração que processam os materiais, através de corte, dobragem, usinagem, montagem, solda e acabamento superficial. Além de fabricação e acabamento, o controle de qualidade se estende à instalação e à montagem das estruturas no canteiro da obra.

A empresa onde fica localizada a máquina tem como política realizar suas atividades de projeto, fabricação e montagem de estruturas metálicas a partir do desenvolvimento de soluções em engenharia através da:

- a) Satisfação dos clientes;
- b) Reconhecimento e desenvolvimento profissional dos colaboradores;
- c) Padronização dos processos;
- d) Atendimento aos requisitos ambientais e de saúde e segurança legais e outros aplicáveis;
- e) Minimização dos efeitos dos impactos ambientais e riscos à saúde e segurança;
- f) Prevenção da poluição e de acidentes e riscos à saúde e segurança;
- g) Melhoria contínua do Sistema de Gestão Integrado.

O sistema de produção compreende os processos e equipamentos de corte como oxicorte e plasma, processos e equipamentos de furação como furos de topo, lateral e horizontal, e processos e equipamentos de conformação e soldagem.

O processo produtivo é realizado de acordo com a necessidade do cliente, onde após aprovação do projeto é gerado um Programação Interna de Trabalho (PIT) de produção.

O Planejamento e Controle de Produção (PCP) são informados pela engenharia de produtos conforme a necessidade do cliente em relação à ordenação de produção de cada peça, tendo assim uma eficiência em entrega do produto final por meio de um *Just in Time* (JIT), onde o cliente acompanha todo o processo de fabricação, pintura, embalagem e transporte do seu produto até o destino final.

A política implantada para a realização do processo operacional é baseada em equipamentos de alta tecnologia, com nível de desvio de processos na escala de 0,01 mm em ângulo de corte, considerado como ótimo na área de atuação do mercado.

Durante o processo de produção, o produto tem um rigoroso controle de qualidade, sendo submetido a ensaios não destrutivos por inspetores qualificados.

A empresa conta com uma grande gama de equipamentos, sejam manuais, semi ou totalmente automatizados através de sistema CNC (Comando Numérico Computadorizado), responsáveis por todos os processos de fabricação.

Os processos críticos de fabricação são controlados diretamente por um sistema computacional central, garantindo assim a qualidade final das estruturas em aço.



## 2.2 Processo de produção de estruturas metálicas

### 2.2.1 Estruturas Metálicas

Estruturas metálicas são formadas por associação de peças metálicas ligadas entre si por meio de conectores ou solda. Atualmente os conectores mais usados são os parafusos. Em geral essas estruturas são de aço carbono, sem necessidade de tratamento, com teor máximo de 1,7% de carbono. Estas peças têm suas seções transversais limitadas em função da capacidade dos laminadores e seus comprimentos limitados em função dos transportes disponíveis. [1]

Matérias primas utilizadas para a produção dessas estruturas são: chapas, barras e perfis laminados. As chapas, normalmente, são classificadas de acordo com sua espessura, variando conforme a norma a ela aplicável de acordo com sua utilidade. As barras possuem dimensões de seção transversal muito menor quando comparada ao seu comprimento. Podem ser encontradas com diferentes geometrias de seção: quadrada, retangular alongada (barra chata) ou circular. Os perfis laminados são, então, subdivididos em relação ao formato de sua seção transversal em "W", "H", "I", "U" e "L"(cantoneiras). [1]

## 2.3 Manutenção

### 2.3.1 Definição

A palavra Manutenção é derivada do latim "*manus tenere*", que significa "manter o que se tem". [2]

Seguindo esta linha de raciocínio, o dicionário Aurélio define manutenção como: "medidas necessárias para a conservação ou permanência, de alguma coisa ou situação" e, ainda, "cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de motores e máquinas". [3]

Em suma, manutenção se define como o conjunto de atividades e recursos aplicados aos sistemas e equipamentos, visando garantir a continuidade de sua função dentro de parâmetros de disponibilidade, de qualidade, de prazo, de custos e de vida útil adequados. Desta forma a manutenção é caracterizada como um processo que se deve iniciar antes da aquisição e que tem como principal função o prolongamento da vida útil do equipamento ou sistema. [4]

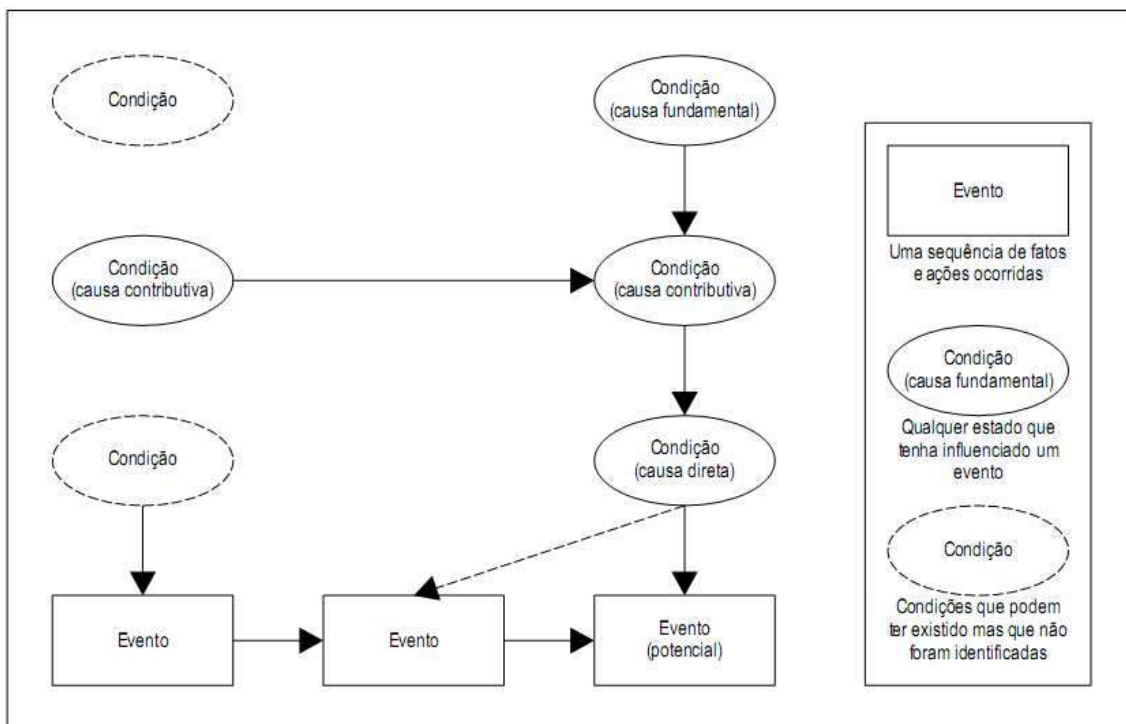
Segundo Adriana Louzada Pereira e Fábio Lúcio Neves [5], de modo geral, a manutenção em uma empresa tem como objetivos:

- Manter equipamentos e máquinas em condições de pleno funcionamento para garantir a produção normal e a qualidade dos produtos;
- Prevenir prováveis falhas ou quebras dos elementos das máquinas. Alcançar esses objetivos requer manutenção diária em serviços de rotina e de reparos periódicos programados. A manutenção ideal de uma máquina é a que permite alta disponibilidade para a produção durante todo o tempo em que ela estiver em serviço e a um custo adequado.

### 2.3.2 *Conceitos*

Pinto (2004) lista algumas definições relacionadas à manutenção:

- Evento - qualquer ocorrência em tempo real que tenha impacto sobre o desempenho do sistema avaliado;
- Condição - qualquer estado que possa gerar impacto sobre o desempenho do sistema;
- Causa - uma condição particular que resulta na ocorrência do evento;
- Causa direta - a causa que diretamente faz com que ocorra o evento;
- Causa contributiva - uma causa que isoladamente não resulta na ocorrência do evento, porém somada a outras causas contributivas ou diretas pode ampliar a potencialidade de ocorrência do mesmo;
- Causa fundamental - a causa que, acaso corrigida/eliminada, preveniria a recorrência do evento.



**Figura 1: Diagramação de eventos e fatores causais. [6]**

Modo de falha - é definido como sendo toda e qualquer falha que seja inerente a um equipamento ou componente, e que resulte em uma perda funcional sobre um sistema ou um subsistema.

Confiabilidade - "É a probabilidade de que um componente ou sistema não falhe durante sua vida útil".

Disponibilidade – é a probabilidade do bom funcionamento de um dispositivo, em certo momento ou durante um intervalo de tempo dado.

Falha pontual - corresponde a parada de manutenção corretiva que possui tempo alto de reparo, acima de um gatilho definido.

Falha crônica – é aquela relacionada a frequência excessiva de reparo, para que se repetem por várias vezes com tempo menor.

### 2.3.3 Tipos de Manutenção

Existem basicamente três tipos de manutenção: preventiva, preditiva e corretiva. Alguns autores citam outros tipos, que, em sua maioria, acabam sendo subdivisões ou derivações das supramencionadas.

A manutenção preventiva ocorre através da substituição de peças ou componentes antes que atinjam a idade em que passam a ter risco de quebra. O parâmetro utilizado é a troca por tempo de uso, com base no conhecimento estatístico da taxa de defeito das peças, equipamentos ou sistemas ao longo do tempo. A preventiva procura evitar e prevenir antes que a falha efetivamente ocorra. [5]

A definição da NBR 5462 (1994) para a Manutenção Preventiva é “manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritivos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item”.

A manutenção preditiva se utiliza da mesma ideia da preventiva, isto é, de prevenir antes que a falha ocorra, porém se baseia no acompanhamento sistemático das variáveis que indicam o desempenho dos equipamentos, definindo, assim, a necessidade da intervenção nos mesmos. O grande volume de recursos iniciais com materiais e com mão de obra muito qualificada e treinada, bem como a restrição para aplicação em sistemas industriais complexos, dificulta a implementação de forma generalizada deste tipo de técnica de manutenção. [5]

A manutenção corretiva é a mais antiga e mais utilizada, sendo empregada em qualquer empresa que possua itens físicos, qualquer que seja o nível de planejamento de manutenção. Segundo a Norma NBR 5462 (1994), manutenção corretiva é “efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida”. Em suma, é toda manutenção com a intenção de corrigir falhas em equipamentos, componentes, módulos ou sistemas, visando restabelecer sua função. Normalmente implica em custos altos, pois a falha inesperada pode acarretar perdas de produção e queda de qualidade do

produto. As paralisações são quase sempre mais demoradas e a insegurança exige estoques elevados de peças de reposição, com acréscimos nos custos de manutenção. [5]

#### *2.3.4 Gerenciamento da Manutenção*

A organização da manutenção depende da definição dos objetivos, dos princípios e da filosofia a ser adotada em função das atividades que serão executadas e deve estar voltada para a gerência e a solução dos problemas nos processos produtivos. [7]

Programação é a maneira pela qual as informações do planejamento, tais como: descrição dos serviços, durações das tarefas, datas, horas de início e término previstos e recursos necessários (ferramentas, procedimentos, percentual de avanço etc.), são inseridos em sistemas informatizados especializados e também passadas para as equipes de execução incluindo todos os interessados, podendo ser diária, semanal ou até mensais dependendo das características da tarefa. [7]

Controle é o acompanhamento do cumprimento da programação e a implementação de ações para que as metas e os objetivos planejados sejam cumpridos. De posse das informações oriundas do campo, via apropriação de serviços, o planejador irá, se necessário, replanejar os serviços, emitir programação para o período seguinte, atualizar o cronograma. [7]

#### *2.3.5 Engenharia de Manutenção*

A engenharia de manutenção é o ramo da engenharia voltado para a aplicação dos seus conceitos à otimização dos equipamentos, dos processos e dos orçamentos, de modo a alcançar uma melhor manutenibilidade, confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos. [8, 9, 10]

Dentro do universo da engenharia, a engenharia de manutenção é uma especialidade multidisciplinar que, além dos conhecimentos específicos de

manutenção, como os de estatística, logística, confiabilidade e previsibilidade, requer conhecimentos mais específicos relacionados com a área de aplicação, como por exemplo, os de mecânica, eletricidade e química. A engenharia de manutenção também requer conhecimentos gerais de higiene e segurança no trabalho, informática, gestão de recursos humanos, legislação, meio ambiente e contabilidade. [8, 9, 10]

Entre as funções típicas de um engenheiro de manutenção incluem-se: aperfeiçoar a estrutura da organização de manutenção, análise das falhas de equipamento, estimativa dos custos de manutenção e avaliação de alternativas, previsão de necessidades de peças sobresselentes, avaliação das necessidades em termos de renovação de equipamentos e estabelecimento de programas de renovação, aplicação de princípios de agendamento e de gestão de projetos aos programas de renovação de equipamentos, avaliação das necessidades em termos de materiais e de mão de obra para uma manutenção eficaz, avaliação das necessidades em termos de qualificação técnica e profissional do pessoal de manutenção, identificação e fazer o levantamento dos riscos em termos de segurança associados à manutenção. [8, 9, 10]

#### *2.3.6 Análise de Falhas*

O término da capacidade de um componente em desempenhar a função requerida é considerado falha conforme a norma NBR 5462 de 1944, sendo, portanto, um evento. [11]

A análise de falha é uma ferramenta que visa identificar o motivo da perda de capacidade de um sistema ou componente em desempenhar a função projetada. [12]

Para tanto, se utiliza o processo chamado “análise completa” que é uma extensão do método “5 *Why*” (“5 Porquês”), e que deve ser realizado por um time multiprofissional em razão do aprofundamento da análise. Esse diagnóstico será

divido em: levantamento de dados, organização de dados, análise de dados, e implementação de melhoria e relatórios, segundo Affonso (2006).

Observa-se, ainda, que a análise de falhas possui fundamentos básicos que devem ser utilizados como parâmetros, garantindo, assim, a consistência do estudo. Além disso, mostra-se fundamental que se considere o funcionamento do mecanismo, eis que esse viabiliza a constatação das dimensões e interações entre as peças, e deste modo, o estudo da falha do sistema a partir de falhas pontuais e/ou crônicas.

[12]

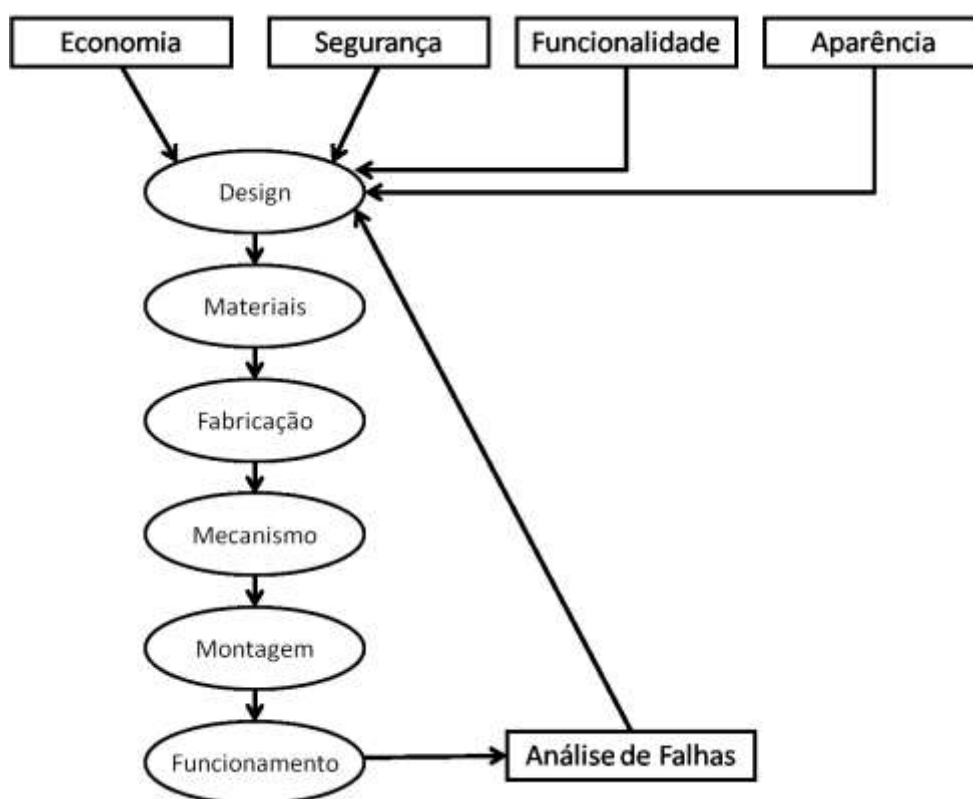


Figura 2: Atuação da análise de falha no processo produtivo. [13]

Por meio do levantamento de dados busca-se obter informações relevantes sobre objeto da análise, dentre as quais se destacam: sua fabricação (nos moldes supramencionados na figura 2), seu histórico operacional, seu histórico de manutenção, registros fotográficos detalhados da falha e a seleção de amostras que sejam representativas da falha. Além disso, devem ser observadas as possíveis condições anormais que possam ter contribuído para a falha e a descrição do funcionamento do mecanismo de falha envolvido. [12]

De acordo com Affonso (2006), para se chegar a uma possível solução para a falha é fundamental que as peças deterioradas passem por inspeções visuais e fotográficas, por testes não destrutivos e mecânicos, e por análises químicas do material e de eventuais resíduos. Ainda, deverá ser feita uma reconstituição da sequencia de eventos compatíveis com o funcionamento do mecanismo que levaram à falha.

Assim, será possível alcançar a determinação do modo de falha e da causa básica, que é o último estágio da análise antes da definição das ações corretivas, que serão feitas sobre as máquinas, pessoas e processos de trabalho. A análise das causas físicas ou químicas da falha corresponde ao primeiro passo para definir a causa básica do problema. [12]

Deve-se procurar mais de uma causa básica, para assim viabilizar a implementação de todas as medidas preventivas para o problema. E por fim, mostra-se necessário desenvolver um banco de dados de análise de falhas e histórico de manutenção. [12]

## 2.4 Ocorrência de Falhas

### 2.4.1 *Causas fundamentais de falhas*

Após a breve análise do que vem a ser falha, parte-se para o estudo das causas fundamentais destas, que podem ser classificadas como falhas de projeto, de fabricação, de montagem, de operação e de manutenção de equipamentos. [12]

As falhas de projeto estão relacionadas a detalhes de projetos sujeitos a problemas, tanto pela presença de entalhes mecânicos, como pela mudança de projeto ou ainda, por critérios de projetos inadequados. Quanto à mudança de projeto, tem-se que frequentes alterações são realizadas visando melhorias, entretanto que acabam levando uma peça ou máquina que funcionava adequadamente a apresentar problemas. Por fim, sabe-se que a escolha de critérios inadequados resulta em propriedades mecânicas que não suportam as reais solicitações. [12]



A falha na seleção dos materiais de construção de um equipamento é relacionada com a incompatibilidade das propriedades do material com as necessidades do serviço é importante salientar que casos com mais de um mecanismo de falha, tornam mais complicada esta seleção. Em poucas palavras, falha por seleção inadequada de materiais são aquelas evitáveis pela simples modificação do material da peça. [12]

Muitas falhas originam-se em defeitos no material de uma peça. Tanto imperfeições internas quanto superficiais podem reduzir a resistência, pois funcionam como pontos de concentração de tensões. [12]

As falhas podem estar em alguns casos, relacionadas a uma especificação inadequada, incompleta ou ambígua do processo de fabricação do componente. Além disso, mudanças feitas no projeto sem uma completa avaliação de sua repercussão, dificuldades em seguir a especificação e erro operacional, podem resultar em falhas do componente. [12]

Operações como: embutimento profundo, estiramento, expansão, redução e dobramento, resultam em tensões residuais que, em alguns casos, alteram as propriedades mecânicas, produzindo micro ou macrotrincas e causando uma redução localizada da ductilidade. [12]

Alterações na superfície e modificações metalúrgicas causadas pelo processo têm influência na resistência à fadiga, resistência à fratura frágil e à corrosão. Propriedades anisotrópicas, zonas de material dissimilar e mudanças na orientação das tensões residuais podem ocorrer com efeitos danosos sobre a suscetibilidade de falha do produto acabado. [12]

As falhas também podem resultar de erros de montagem não detectados pela inspeção durante a fabricação do componente. [12]

Este tipo de falha é mais frequentemente associado a peças móveis de equipamentos mecânicos ou estruturais. Assim, por exemplo, pode-se citar a

instalação de rolamentos de tal forma que danifiquem as pistas, instalação de rebites em estruturas de aviões que produzam danos nos furos que levem a falhas por fadiga, etc. [12]

O desalinhamento de peças como, por exemplo, eixos, engrenagens, mancais, vedadores e acoplamentos são também frequentes causadores de falhas em serviço. Além disso, a operação de equipamentos sob severas condições de velocidade, carga, temperatura, condições ambientais, ou sem uma manutenção regular e adequada, contribui enormemente para a ocorrência de falhas. [12]

As inspeções periódicas, que normalmente fazem parte dos planos de manutenção, podem ter uma pequena ou nenhuma influência a menos que sejam estabelecidas em função de algum mecanismo de falha que caracterize o componente em questão. [12]

Tais procedimentos devem ser capazes de detectar o defeito antes que a falha ocorra.

Uma manutenção inadequada também contribui para falhas em serviço, despontando como um dos mais frequentes e importantes fatores, pela introdução de defeitos antes inexistentes. Neste particular, a análise de falhas funciona como uma ferramenta de reavaliação de planos de manutenção. [12]

#### *2.4.2 Mecanismos de Falha*

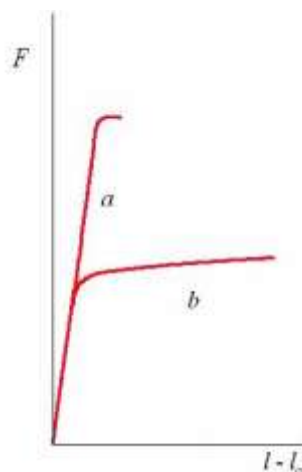
##### *2.3.2.1 Fratura*

Consiste na separação do material em duas ou mais partes devido à aplicação de uma carga a temperaturas relativamente baixas em relação ao ponto de fusão do material. O processo de fratura envolve basicamente duas etapas, a formação e a posterior propagação de trincas, em consequência à tensão que foi aplicada. [14]

Na engenharia, são relevantes dois tipos: Fratura dúctil e Fratura frágil. A classificação está baseada na capacidade de um material em sofrer uma grande deformação plástica ou não. [15]

A fratura dúctil é caracterizada por uma extensa deformação plástica na vizinhança da trinca que está avançando e também pelo fato do processo ocorrer de maneira relativamente lenta à medida que o comprimento da trinca se estende, sendo por isso chamada de estável. Esse tipo de trinca resiste bem ao aumento de extensão, a menos que exista um aumento da tensão aplicada. Além disso, normalmente, fica evidente uma deformação generalizada na superfície da fratura. Já no caso de uma fratura frágil, as trincas se espalham de maneira extremamente rápida, com quase nenhuma deformação plástica, sendo assim chamadas de instáveis. Uma vez iniciada, a trinca se propaga sem um aumento na magnitude da tensão aplicada. [15]

Para verificar se um material é dúctil ou frágil, um bom método é submeter o material ao ensaio de tração, onde, através de um gráfico de força x deslocamento, define-se a qual dos dois grupos o material pertence. Exemplificando o caso dos materiais frágeis, estes rompem com curto deslocamento e demonstram maior resistência mecânica em relação aos dúcteis. [16]



**Gráfico 1: Diagrama força versus deslocamento mostrando um comportamento do tipo frágil (curva a) e um comportamento dúctil (curva b).**

**Fonte: Introdução à engenharia metalúrgica, Nestor Cezar Heck.**

#### 2.4.2.2 *Fadiga*

Na engenharia, as condições de projetos envolvem peças sujeitas a cargas cíclicas e variáveis, eis que estas em conjunto com as cargas de impactos e cargas repetitivas mostram-se os tipos mais comuns de cargas, se comparadas com as estáticas ou quase estáticas, conforme Collins (2006).

Em razão de tais cargas ocorre a fadiga, que é a ruptura de componentes, sob uma carga bem inferior à carga máxima suportada pelo material, devido a solicitações cíclicas repetidas. Fadiga mecânica é a deterioração das propriedades mecânicas levando à falha do material ou de um componente sob carregamento cíclico. [17]

No mesmo sentido, Collins (2006) afirma que a fadiga é um processo de falha progressiva que envolve a iniciação e propagação de uma trinca até esta atingir um tamanho instável, causando uma separação repentina catastrófica em duas ou mais partes da peça afetada.

A falha por fadiga pode ocorrer com pouco ou nenhum aviso, eis que durante a solicitação ocorrem mudanças progressivas nas propriedades do material que são difíceis de detectar. Salienta-se, ainda que, mesmo nos metais normalmente dúcteis, a falha por fadiga é de natureza frágil, existindo pouca ou nenhuma deformação plástica generalizada associada à falha. Logo, períodos de repouso, isto é, com a tensão de fadiga removida, não levam a melhora alguma ou recuperação significativa dos efeitos da solicitação cíclica mencionada. [18]

Em muitos casos, pode-se fazer uma aproximação da resistência à fadiga a partir do número de ciclos que a peça suporta para um dado valor de tensão, em outras palavras tem-se o que se pode chamar de limite de resistência à fadiga, isto é, um valor abaixo do qual a falha por fadiga não irá ocorrer. [18]

Segundo Garcia (2000), as rupturas decorrentes de processos de fadiga se distinguem em razão de seus estágios: o primeiro estágio abrange o período de

nucleação da falha, enquanto que o segundo compreende a propagação de uma trinca, e, por fim, o terceiro remete à ruptura.

Cumprido salientar, ainda, que a resistência à fadiga é influenciada pelo acabamento superficial, pelo tamanho da peça, pela temperatura, pela concentração de tensões, e pelos efeitos microestruturais.

Quanto ao acabamento superficial, deve-se observar que quanto melhor for o acabamento superficial, ou melhor, quanto menos rugoso estiver o componente, maior é a resistência à fadiga. Já em relação ao tamanho da peça, tem-se que quanto maior é o componente, menor é a sua resistência à fadiga. [15]

No que tange à temperatura, sabe-se que em temperaturas abaixo da ambiente, tem sido observado que os metais apresentam um aumento na sua resistência à fadiga com o decréscimo da temperatura. Para mais altas temperaturas, a deformação plástica que é um fator extremamente importante em fadiga, torna-se mais intensa, diminuindo a vida em fadiga. [15]

Ao se referir às concentrações de tensões, salienta-se que todas as descontinuidades tais como entalhes, furos e ranhuras modificam a distribuição de tensões, acarretando em um aumento de tensões localizadas. Com este aumento de tensão localizado, o carregamento torna-se mais severo, diminuindo a vida em fadiga do material. [15]

#### *2.4.3 Falhas de componentes*

Falha em componente mecânico é um processo que pode assumir as mais diferentes formas, que dependem do tipo de carregamento, tipo do material, das condições ambientais, do seu tempo de vida, dos cuidados com a manutenção dentre outros, sendo que cada componente possui peculiaridades quanto ao modo de falha e quanto ao fator de segurança, que confere limites de segurança possa ser executado o trabalho.

O fator de segurança corresponde ao valor numérico que se aplica à capacidade teórica de Trabalho (CTT), de um determinado elemento para se estabelecer a Capacidade Efetiva de Trabalho (CET), desse elemento ou meio de produção. [19]

Neste trabalho será focada a falha em parafusos, levando em conta sua estrutura, seus pontos de concentração de tensão e o mecanismo de falha que mais acontece neste elemento, que é a fratura.

Os pontos de fratura mais comuns em um parafuso são os primeiros fios da rosca e entre a cabeça e a região cilíndrica. Juntas aparafusadas falham de muitas maneiras, que podem ser resumidas nas seguintes categorias gerais, que descrevem o que ocorre com as partes aparafusadas [12]:

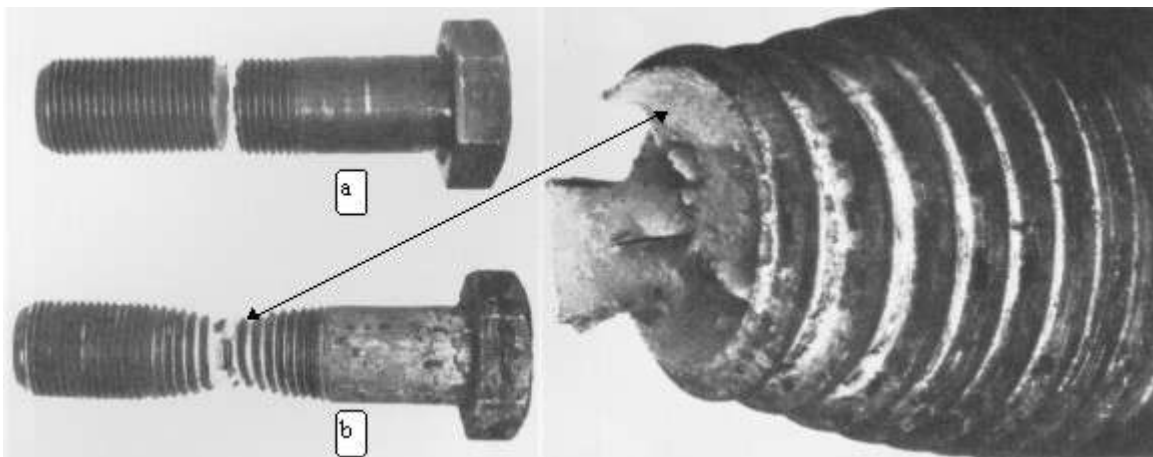
- a) Escorregam umas em relação à outra;
- b) Separam-se;
- c) Quebram.

A vida útil de um parafuso será normalmente indefinida, o que quer dizer que qualquer falha deve ser tratada como uma anormalidade. A causa mais comum de falha de um parafuso de um equipamento é a fadiga. Como no caso dos eixos, a fadiga de um parafuso normalmente acontece nos pontos de concentração de tensões, como filetes das roscas, transição de diâmetros etc. [12].

Affonso (2006) lista uma série de razões para a ocorrência de falhas em parafusos:

- a) Uso de parafusos com resistência inferior à necessária;
- b) Os componentes da união não se ajustam adequadamente uns aos outros;
- c) O projeto da junta não está adequado;
- d) A pré-carga aplicada não está adequada.

Um parafuso pode falhar também por sobrecarga, corrosão, *fretting*, segundo os mecanismos já descritos [12].

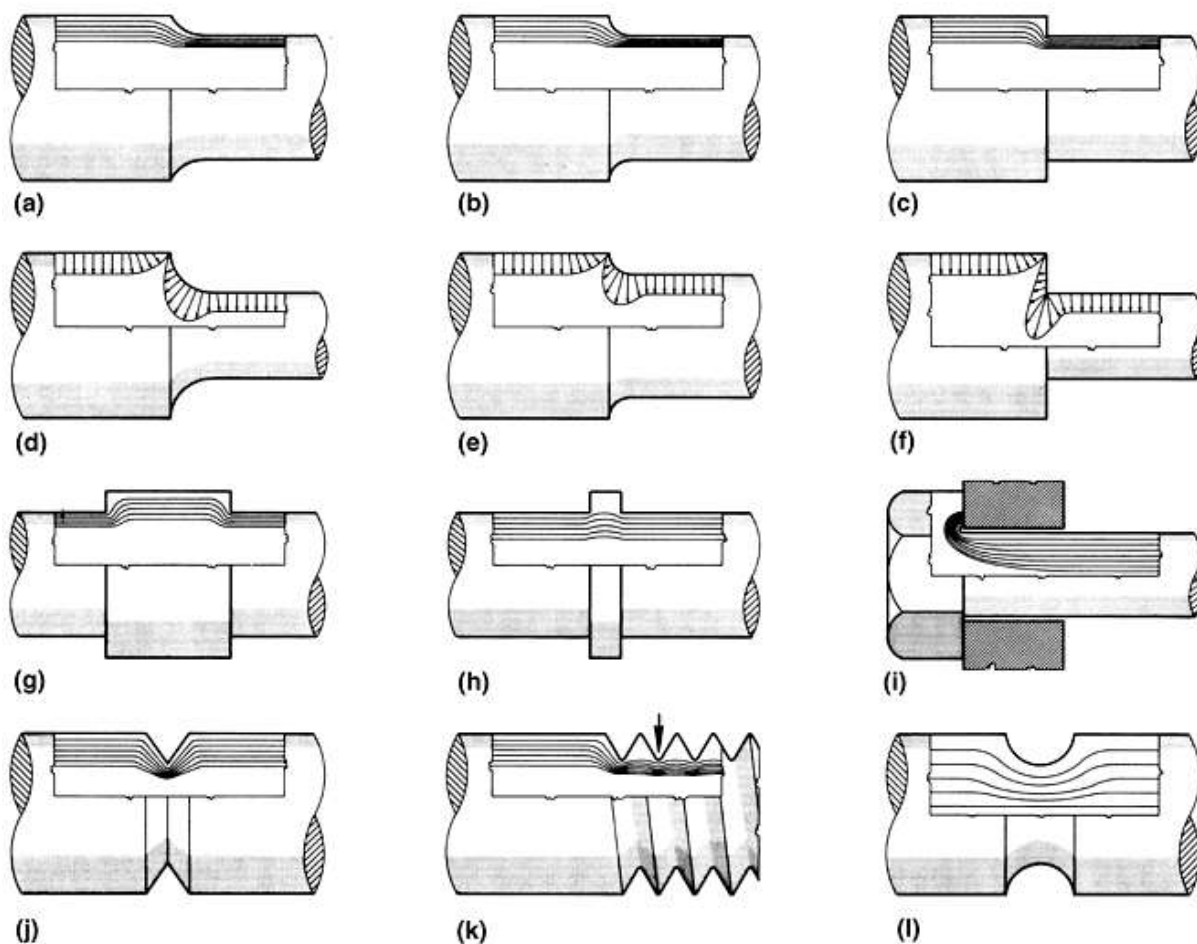


**Figura 3: Parafusos com fratura frágil (a) e fratura dúctil (b)**

#### *2.4.4 Concentração de tensão*

Em componentes submetidos a esforços, tensões são distribuídas pelo seu corpo de maneira não uniforme, sendo algumas localidades do componente, mais suscetíveis a concentração dessas tensões. Essas localidades são em geral regiões de detalhes complexos, cantos e furos, e são geralmente nesses locais que trincas que originam as falhas se iniciam.

Na Figura 4 representações de distribuição de tensão em vários diferentes formatos de peças. Na representação (k) que indica a distribuição da concentração de tensão em um parafuso, vemos que a região com a maior concentração de tensão são os vales entre os dentes, indicada na figura pela seta. Assim sendo, faz-se realmente necessária a microscopia nessa região da peça no caso da análise de falha em um parafuso, a fim de se obter características pertinentes na estrutura como microtrincas, deformidades etc.



**Figura 4: Representações de concentração de tensão**

## 2.5 Etapas de uma análise

Os principais estágios pelos quais deve passar a investigação e análise de uma falha são: [1]

1. Coleta de dados e seleção de amostras;
2. Exame preliminar da peça que falhou;
3. Ensaio não destrutivo;
4. Ensaio mecânico;
5. Seleção, identificação, preservação e limpeza da superfície da fratura;
6. Exame macroscópico da fratura;
7. Exame microscópico da fratura;
8. Seleção e preparação de seções para análise metalográfica;
9. Exame e análise das seções metalográficas;



10. Determinação do mecanismo de falha - identificação do tipo de falha;
11. Análise química;
12. Aplicação da mecânica da fratura;
13. Testes sob condições simuladas de serviço.

Antes do início de qualquer análise, e antes mesmo de começar o corte para a confecção dos corpos de prova, o investigador deve planejar todo o trabalho, todo o procedimento de investigação, pois, por exemplo, o corte precipitado da amostra pode inviabilizar a conclusão da pesquisa.

#### *2.5.1 Coleta de dados e seleção de amostras*

Inicialmente a investigação da falha deve ser orientada no sentido de abranger todos os detalhes relacionados à mesma, coletando as informações disponíveis relacionadas com a fabricação, processamento e histórico operacional do componente ou estrutura que falhou, reconstituindo tanto quanto possível a sequência dos eventos que precederam a falha. [1]

Devem ser coletados todos os dados relacionados ao sistema que falhou incluindo detalhes como velocidade, aceleração, frenagem, temperatura, enfim tudo que se possa imaginar que esteja relacionado com o acidente ou incidente. Inclui-se aqui entrevista com o operador do equipamento, testemunhas, etc. para que o fato possa ser inteiramente reconstituído. [1]

Sempre que possível, o analista deve ir ao local onde ocorreu a falha, além de documentar fotograficamente os detalhes da falha. Neste estágio é que serão coletadas as amostras para análise. Uma vez que se depara com inúmeras peças e conjuntos quebrados, será necessário estabelecer toda a sequência de falhas para se identificar a peça que rompeu em primeiro lugar deflagrando toda a sucessão de quebras que culminou na falha geral. Também é necessário o entendimento completo do funcionamento do sistema, sua operação, cargas e solicitações, especialmente da peça que falhou. Torna-se de capital importância relacionar a

carga com a falha para saber se esta ocorreu em carregamento esperado e normal ou sob o efeito de uma carga diferente. [1]

### *2.5.2 Exame preliminar da peça que falhou*

A peça que falhou, incluindo todos os fragmentos, deve ser submetida a um exame visual antes que seja procedida a sua limpeza. Frequentemente, a observação de partículas de sujeira e detritos encontrados na peça, pode ser de grande ajuda no estabelecimento das causas de um acidente ou na determinação da sequencia dos fatos que levaram à falha. Por exemplo, traços de tinta encontrados em uma região da fratura podem comprovar que a trinca, na qual a tinta penetrou, já existia na superfície da peça antes da ruptura ocorrer. [1]

### *2.5.3 Ensaaios não destrutivos*

Segundo a Associação Brasileira de Ensaaios Não destrutivos e Inspeção (ABENDI), “os Ensaaios Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los, sendo executados nas etapas de fabricação, construção, montagem e manutenção”.

Os ensaios não destrutivos são em muitos casos de fundamental importância em uma investigação, eis que incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto, das características tecnológicas de um material, ou ainda, da monitoração da degradação em serviço de componentes, equipamentos e estruturas.[6]

Os métodos mais usuais de END são: ensaio visual, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultra-som, radiografia (Raios X e Gama), correntes parasitas, análise de vibrações, termografia, emissão acústica, estanqueidade e análise de deformações.[6]

#### 2.5.4 *Ensaio mecânicos*

O ensaio de dureza é o mais simples dos ensaios mecânicos, constituindo-se na mais versátil ferramenta disponível para o analista de falhas. A par de suas muitas aplicações, o teste de dureza pode ser usado: [1]

- a) Para avaliar a dureza alcançada no tratamento térmico da peça quebrada e compará-la a dureza especificada;
- b) Para dar uma idéia aproximada de resistência a tração do material;
- c) Para detectar um endurecimento por encruamento (trabalho a frio), amolecimento ou endurecimento superficial por superaquecimento.

O teste de dureza é também um ensaio não destrutivo, portanto com toda a vantagem de não inutilizar a peça. Quando aplicável, deve-se fazer ensaio de tração ou de impacto, desde que a peça tenha material suficiente para a confecção dos corpos de prova. Também pode ser necessária a realização de ensaios de tenacidade à fratura e ensaios em altas ou baixas temperaturas simulando as condições de serviços. [1]

#### 2.5.5 *Seleção, identificação, preservação e limpeza de superfícies de fratura*

A correta seleção, preservação e limpeza da superfície da fratura são de grande importância para evitar a destruição de evidências que podem estar relacionadas com a causa da falha. A superfície da fratura pode sofrer danos mecânicos ou químicos. Os danos mecânicos podem ser produzidos de diferentes modos, incluindo batidas provocadas por outros objetos. Isto pode ocorrer em serviço ou por ocasião da remoção ou transporte da peça fraturada para o local da análise. [1]

O toque ou esfregamento da superfície da fratura com os dedos devem sempre ser evitados. Da mesma forma nunca se deve juntar as duas partes de uma peça quebrada (as duas superfícies da fratura). Isto de nada ajudará ao analista e, pelo contrário, poderá danificar a superfície da fratura. [1]

Caso seja necessário, pode-se fazer uma limpeza química com reativos adequados. No entanto, deve-se tomar cuidado para que não se promova uma corrosão exagerada da superfície danificando a mesma, o que resulta na perda de informações importantes quanto a falha ocorrida. Sempre que possível, deve-se evitar esta limpeza. [1]

#### *2.5.6 Exame macroscópico da fratura*

O exame detalhado da superfície da fratura, com ampliações entre 1 e 100 vezes, deverá ser feito a olho nu, com lente manual ou com um microscópio estereoscópico. Ocasionalmente, pode haver alguma vantagem no uso de um microscópio eletrônico de varredura. [1]

O exame macroscópico da superfície da fratura, revela texturas diferentes nas diferentes regiões, em relação a de ruptura final, como acontece em falhas por fadiga, corrosão sob tensão e fragilização pelo hidrogênio. [1]

#### *2.5.7 Exame microscópico da fratura*

O exame microscópico da superfície da fratura, também conhecido por microfractografia, pode ser feito com microscópio ótico, microscópio eletrônico de transmissão (MET) e microscópio eletrônico de varredura (MEV). [1]

Embora a interpretação das microfractografias requeira prática e compreensão dos mecanismos de falha, existe somente um pequeno número de aspectos básicos de fratura que são claramente reconhecidos e indicativos de um particular modo de falha. [1]

A análise microscópica de superfície de fratura é uma técnica importante não apenas para a determinação do real mecanismo de falha, mas também para a sua documentação. Este ensaio oferece informações muito importantes, pois permite associar o tipo de inclusão, segregação ou partículas estranhas presentes ou diretamente associadas com a falha observada. Também permite inferir as

condições de formação e evolução das trincas pela identificação e análise de eventuais produtos de corrosão ou contaminantes.[20]

#### *2.5.8 Seleção e preparação de seções para análise metalográfica*

O exame metalográfico de uma seção, polida ou polida e atacada, em microscópio ótico é uma parte vital em uma investigação de falha, devendo ser feita dentro dos procedimentos de rotina. O exame metalográfico proporciona ao investigador uma informação sobre o tipo de material, sua qualidade e tratamento térmico. Se forem encontradas anormalidades estas poderão não estar associadas com características indesejáveis que conduzam a uma falha prematura. Em algumas vezes, é possível relacioná-las a uma composição incorreta da liga, ou a fenômenos e transformações produzidas durante o uso do componente tais como envelhecimento em aços carbono decorrentes da precipitação de nitretos de ferro ou absorção de hidrogênio no cobre. [1]

A análise micrográfica pode também proporcionar informações quanto ao método de fabricação (processo) da peça e o tratamento térmico ao qual foi submetida, tanto intencionalmente durante a fabricação quanto acidentalmente durante o serviço. Outros problemas ou defeitos produzidos em serviço tais como corrosão, oxidação, encruamento superficial, etc., também podem ser revelados e investigados. Adicionalmente, as características de trincas encontradas nas microestruturas, particularmente seu modo de propagação, possibilitam a obtenção de informações relacionadas aos fatores responsáveis por sua iniciação e propagação. [1]

Algumas regras gerais podem ser adotadas quanto ao melhor local de onde retirar amostras para análise micrográfica, porque cada falha apresenta aspectos próprios que devem ser levados em conta para este propósito. Na maioria dos casos, entretanto, deve ser determinado se o corpo de prova deve ser retirado junto-à superfície da fratura ou numa região na qual o defeito desenvolvido em serviço seja representativo do componente como um todo. [1]

### 2.5.9 Exame e análise das seções metalográficas

Assim como o ensaio de dureza e o exame macroscópico, o exame das seções metalográficas ou análise da microestrutura é um procedimento de praxe em qualquer análise de falha, face-à sua capacidade de revelar imperfeições do material provocadas durante a fabricação da peça e de detectar o resultado produzido por diferentes condições operacionais e ambientais que podem ter contribuído para a falha. [1]

Inclusões, segregação microestrutural, descarbonetação, aumento do teor de carbono, tratamento térmico incorreto, martensita não revenida (branca) e corrosão intergranular são algumas das muitas imperfeições metalúrgicas ou condições indesejáveis que podem ser descobertas e analisadas através do exame microscópico de seções metalográficas. [1]

### 2.5.10 Análise química

A análise química da peça é realizada para verificar se o material se enquadra dentro da especificação recomendada. Pequenos desvios da composição química em relação à composição especificada não representam problema em relação à análise de falha. [1]

Em investigações específicas, como, por exemplo, nas que envolvem corrosão ou corrosão sobtensão, a análise química de algum depósito, partícula ou produto de corrosão torna-se de enorme importância no estabelecimento da causa primária da falha. Em situações em que a análise indique que o teor de um elemento em particular está ligeiramente acima do que o requerido na especificação não deve ser concluído que tal desvio seja o responsável pela falha. [1]

Alguns elementos gasosos, ou intersticiais, que normalmente não aparecem numa análise química, têm profundos efeitos nas propriedades mecânicas de alguns metais. No aço, por exemplo, os efeitos do oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, são da maior importância. O oxigênio e o nitrogênio podem aumentar o envelhecimento por

deformação e por têmpera. O hidrogênio pode provocar fragilização quando absorvido durante a solda, limpeza catódica, eletrodeposição de camadas metálicas etc. [1]

#### 2.4.10.1 Análise do substrato de peças

Várias técnicas analíticas podem ser empregadas para determinar a concentração de elementos e identificar compostos, ligas, depósitos de materiais, amostras de fluídos, lubrificantes e suspensões. [1]

Espectrografia de emissão, espectrometria e espectroscopia de absorção atômica podem ser usados para determinar os elementos presentes em ligas metálicas. Já a análise química via úmida é usada para determinar de modo preciso a concentração de metais presentes em grandes concentrações, bem como para determinar a presença e concentração de ânions tais como, cloro, nitrato e enxofre. [1]

Enquanto que os métodos de combustão são usados para determinar a concentração de carbono, enxofre, nitrogênio, hidrogênio e oxigênio, e a difração por Raios-X identifica compostos cristalinos na superfície de peças metálicas, partículas, produtos de corrosão e outros depósitos superficiais. [1]

#### 2.4.10.2 Análise da superfície e depósitos

A análise da superfície e depósitos corresponde às técnicas analíticas destinadas a coletar informações relativas à composição química de constituintes da superfície. [1]

#### *2.4.11 Aplicação da mecânica da fratura*

O uso da mecânica da fratura no projeto e previsão de vida de estruturas metálicas e tubulações justificam a aplicação destes conceitos na investigação de falhas onde existam trincas ou, é claro, ruptura. Isto, além de se tornar uma ferramenta útil na

confeção de um programa de inspeção, permite a formulação de medidas corretivas para evitar falhas similares. [1]

#### *2.4.12 Teste sob condições simuladas de serviço*

Durante os estágios finais de uma investigação, pode se tornar necessária a execução de testes que simulem as condições nas quais se acredita que a falha tenha ocorrido. Entretanto, com freqüência, o teste de "serviço simulado" não é praticável, ou por que exige equipamento muito elaborado e caro ou por que não se conhece e compreende todas as reais condições de serviço. As falhas por corrosão, por exemplo, são difíceis de serem reproduzidas em laboratório e, apesar de todo o cuidado, às vezes os testes podem levar a conclusões enganosas. [1]

Sérios erros podem ser cometidos quando se procura reduzir o tempo requerido para o teste através do aumento artificial de severidade em um dos parâmetros, como por exemplo, o meio corrosivo ou a temperatura de operação. Por outro lado, quando suas limitações são claramente compreendidas, o teste simulado de certas variáveis selecionadas, encontradas em serviço, pode ajudar no planejamento da ação corretiva a ser adotada para evitar falhas similares ou, no mínimo, na tentativa de extensão da vida útil. [1]

A avaliação da eficácia na adoção de aditivos especiais ao lubrificante para impedir o desgaste é um exemplo da aplicação com sucesso do teste simulado de serviço empregado a um seleto número de variáveis. [1]

Por fim, a maioria dos fenômenos metalúrgicos envolvidos nas falhas pode ser satisfatoriamente reproduzida em laboratório e, as informações e resultados obtidos em tais experimentos, podem ajudar o investigador, desde que sejam reconhecidas as limitações dos testes. [1]



### 2.4.13 Considerações

Obviamente, muitas investigações não envolvem ou não exigem todos estes estágios. Se a causa provável da falha está bem clara e surge logo no início, o percurso e a extensão das investigações que se seguirem deverão ser dirigidos no sentido de confirmar a causa provável e de eliminar outras possibilidades. [1]

Outras investigações seguirão a série de estágios sugerida e as descobertas feitas em cada um deles determinarão a maneira pela qual a investigação deverá prosseguir. Assim que novos fatos modificarem as primeiras impressões, serão desenvolvidas diferentes hipóteses de causas de falhas, as quais vão ser aproveitadas ou abandonadas conforme se relacionem mais ou menos às falhas que delas se originaram. [1]

Onde estiverem disponíveis, ao investigador, recursos em termos de laboratórios e equipamentos, o máximo esforço deverá ser feito no sentido de acumular resultados e informações sobre ensaios mecânicos, análises químicas, fractográficas e análises microscópicas, antes de formular as conclusões preliminares. Finalmente, em investigações nas quais a causa da falha é particularmente ilusória ou confusa, deve ser feita uma pesquisa em relatórios publicados sobre casos similares a fim de sugerir algum indicio. [1]

Alguns dos trabalhos feitos ao longo de uma investigação podem ser julgados desnecessários. Também existem trabalhos aparentemente sem muita importância que podem ser essenciais a uma investigação. Assim, é possível formar uma opinião com relação à causa da falha a partir de um simples exame visual da superfície da fratura ou da observação de uma metalografia. Entretanto, antes de qualquer conclusão definitiva, deve-se procurar por dados ou informações suplementares que confirmem a opinião original. A total dependência de uma conclusão formada a partir de uma única amostra, tal como uma secção metalográfica, pode ser considerada insuficiente ou pelo menos posta em suspensão, a menos que se conheçam casos similares. [1]

### 3 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será descrito o equipamento onde o parafuso, elemento de fixação objeto deste estudo, está localizado, assim como o modo em que é operado e de que forma sua manutenção é realizada. Na sequência, é apresentada a análise da falha realizada.

#### 3.1 Equipamentos CPI126DI (corte) e T3CH126 (furação) do fabricante Danobat

##### *3.1.1 Processo Produtivo e Operação*

Compreende, inicialmente, na chegada dos perfis metálicos, quase que essencialmente perfis de aço-carbono, que são estocados e colocados na fila para o início do processo.

Os perfis em viga seguem então para um transportador de rolos, que os encaminha para a máquina de furação e corte.

De acordo com a especificação do cliente, cada perfil receberá um tipo de furação e corte, com base em projetos previamente analisados e inseridos no sistema de CNC.

Após a manufatura dos perfis, os mesmos são inspecionados visualmente para se garantir o controle da qualidade, e que não ocorram problemas futuros na montagem dos perfis em campo, juntamente com reclamações de clientes.

Feita a inspeção, os perfis são encaminhados para o cliente.

### 3.1.2 *Descritivo do equipamento*

A máquina de corte e furação apresentada nas Figura 5 e Figura 6, é um equipamento crítico do sistema de produção, já que é o único equipamento na planta que realiza este tipo de atividade, e por ser o equipamento mais importante da linha de produção, responsável pela fabricação da maioria dos pedidos realizados.

Após a furação das peças, o perfil é cortado nas dimensões desejadas pelo cliente. Dimensões essas que são especificadas pelo cliente de acordo com para que a programação CNC seja realizada no maquinário.

O processo consiste em furar peças com perfis de formato W e/ou H, de aço A36 usinado ou montado, realizando a furação em três eixos distintos ao mesmo tempo:

- Eixo X – Lateral Esquerda;
- Eixo Y – Lateral Direita;
- Eixo Z – Topo.

O equipamento em questão se trata de uma conjugação em linha de produção de duas máquinas do fabricante Danobat, empresa espanhola cujo ramo de atividade está ligado à fabricação de equipamentos industriais de manufatura de peças metálicas. A primeira máquina T3CH126 é responsável pela furação dos perfis metálicos. A segunda máquina T3CH126 é responsável pelo corte dos perfis.

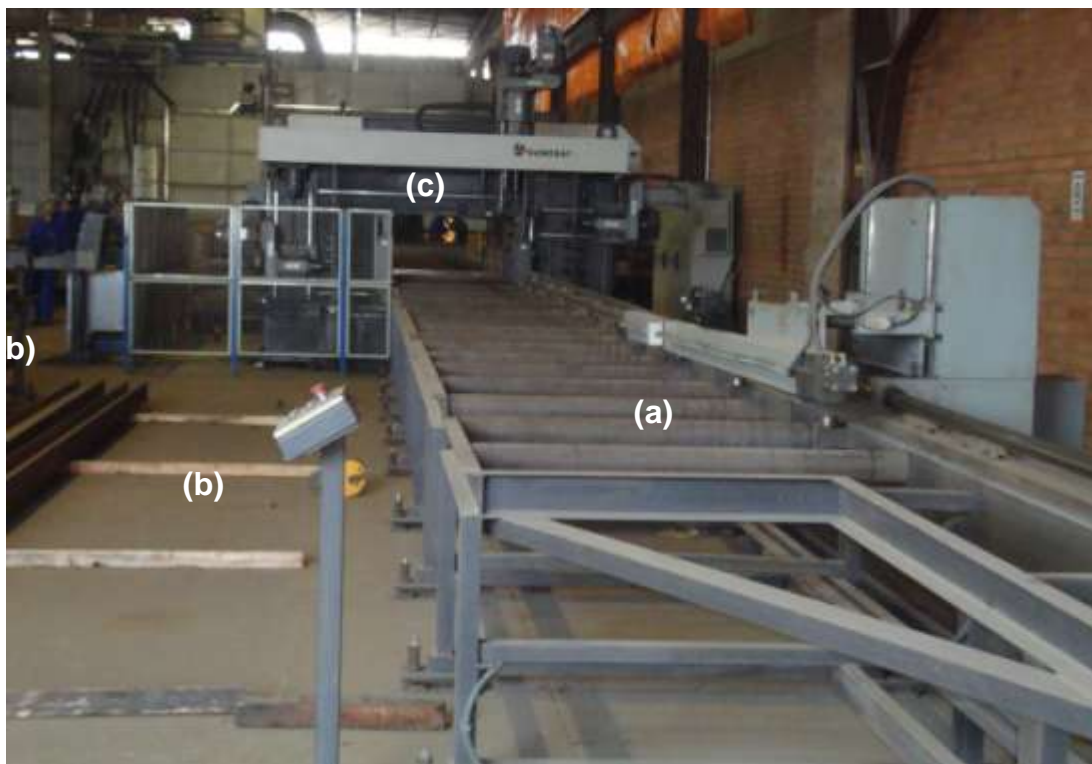


Figura 5: Máquina utilizada nos processos de furação e corte(CPI 126DI e T3CH 126 Danobat): transportador de rolos (a), os pontos de acionamento pelos operadores (b) e ao fundo a máquina de furação (c).

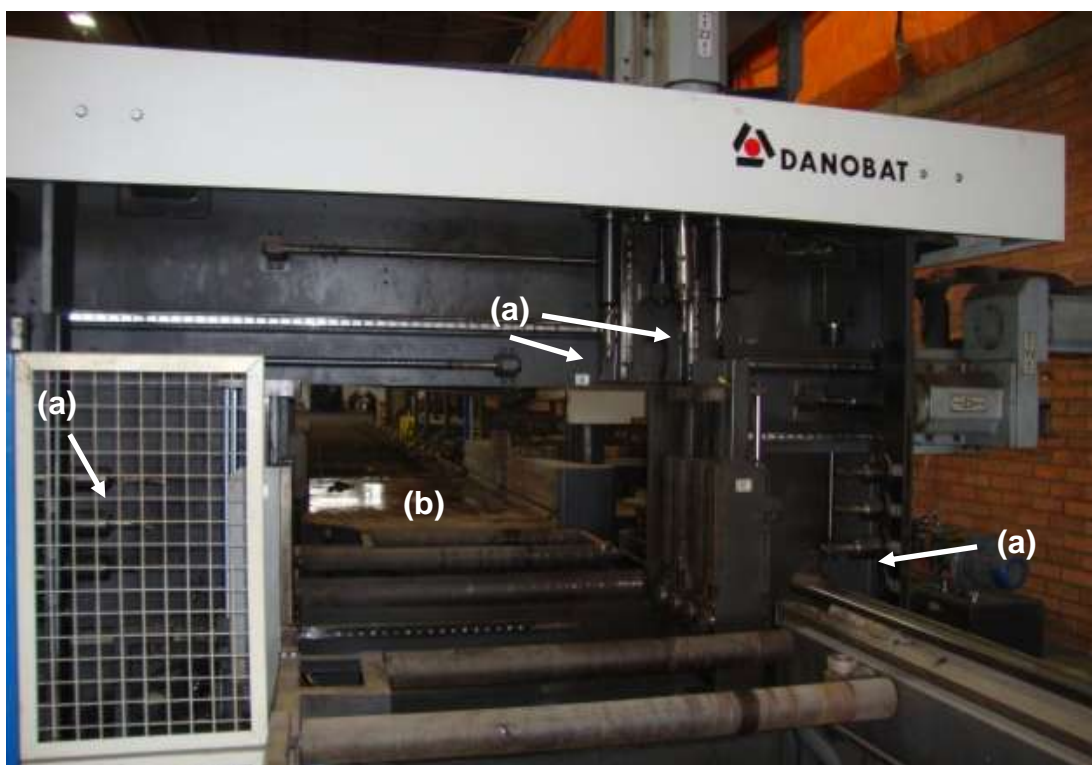


Figura 6: Máquina utilizada nos processos de furação e corte(CPI 126DI e T3CH 126 Danobat). São vistas as ferramentas de furação e, ao fundo, a mesa onde é realizado o corte (b).

Este equipamento participa de dois processos de fabricação como descrito anteriormente. Na parte inicial do processo é realizada a furação do perfil e na segunda etapa o perfil é cortado, sendo que as operações podem ser realizadas independentemente.

Para o processo de corte é necessária a utilização de uma morsa, parte do conjunto do equipamento, fixada a um cilindro hidráulico com pressão de trabalho de 60 bar por um terminal rotular (Figura 7), pressionando o material na posição a ser cortado, o impedindo de se movimentar durante o processo.



**Figura 7: Morsa com seu sistema de acionamento e fixação. Indicação de onde ocorreu a falha**

A morsa movimentada pelo cilindro corre em uma guia. O comprimento do atuador do cilindro hidráulico é de cerca de 1200 mm e o seu diâmetro é de cerca de uma polegada (24,5 mm). A Figura 8 mostra a haste totalmente estendida para que o seu comprimento seja conferido e a Figura 9 é a confirmação da medida da mesma.



**Figura 8: Cilindro de movimentação da morsa.**



**Figura 9: Medição do curso da haste do cilindro totalmente aberto, 1215 mm.**

Qualquer parada inesperada neste equipamento durante o expediente de produção é considerada crítica, pois a empresa possui apenas um maquinário para a realização deste tipo de tarefa, chegando a uma produção de 90 vigas tipo W

durante dois turnos de produção. Assim, o custo de reparo desta falha foi de cerca de R\$ 12.000,00, sem considerar o lucro cessante de produção de perfis, tomando em conta que a produção é realizada das 8:00h às 18:30h.

O fabricante do equipamento, devido às varias solicitações feitas pela empresa e após ter ciência do ocorrido, enviou um cilindro novo para ser trocado sem custos adicionais e solicitou que o cilindro e atuador que falharam fossem enviados para a fábrica.

Vale ressaltar que a empresa não realizou a compra do maquinário com a sua literatura técnica.

### 3.1.3 Especificações

A seguir são mostradas duas tabelas com informações referentes a detalhes construtivos e parâmetros de fábrica quanto à capacidade de trabalho dos equipamentos de corte (Tabela 1) e furação (Tabela 2).

**Tabela 1: Especificações da máquina de corte CPI 126DI(Dados da Danobat).**

PARÂMETROS	VALORES
Capacidade de corte de superfícies arredondadas	620 mm
Capacidade de corte 90°	1200x600 mm
Capacidade de corte 45°	795x600 mm
Capacidade de corte 60°	540x600 mm
Capacidade de corte em feixes	1200x400 mm
Dimensões da lâmina	8270x54x1,6mm
Velocidade da lâmina	20-157 m/min
Potência do motor principal	7,5 Kw

**Tabela 2: Especificações da máquina de furação T3CH 126(Dados da Danobat)**

PARÂMETROS	VALORES
Potência do motor principal	9 Kw (S6: 13Kw)
Diâmetro de furação	6-40 mm
Número de fusos	3
Número de ferramentas por fuso	4
Espessura de trabalho	6-40 mm
Capacidade Máxima	1200x600 mm
Capacidade Mínima	80x6 mm
Alimentação para furação	0.1-12 mm/seg
Velocidade de rotação da ferramenta	0-2000 rpm
Velocidade de posicionamento da cabeça de furação	20 m/min
Força de travamento horizontal	1x2,5 Ton
Força de travamento vertical	4x1,5 Ton
Peso	13950 Kg

#### 3.1.4 Procedimentos de Manutenção do equipamento

A política de manutenção adotada pela empresa é baseada na manutenção corretiva, sendo que não são realizadas compras de itens para estoque. Os componentes que necessitam de troca ou substituição têm sua compra solicitada apenas após a apresentação e detecção da falha em um equipamento.

As inspeções são realizadas em busca do mau funcionamento de algum componente e não geram histórico de manutenção, sendo apenas de caráter visual.



Essas vistorias feitas pela equipe responsável pela manutenção das máquinas da empresa são realizadas semanalmente ou quando operadores relatam alguma anormalidade em um equipamento.

### *3.1.5 Parâmetros de serviço*

Não há nenhum tipo de manual ou indicação dada pelo fabricante de como o maquinário deve ser operado. Os parâmetros operacionais adotados foram desenvolvidos pela própria empresa para as atividades de furação e corte, sendo coordenadas por um engenheiro responsável.

O equipamento trabalha à temperatura ambiente e se situa em ambiente limpo (galpão coberto). É um ambiente não agressivo e ideal para o bom funcionamento do equipamento.

## 3.2 Identificação da falha

### *3.2.1 Descritivo da falha*

O rompimento do parafuso do terminal rotular ocorreu duas vezes, sendo que o intervalo entre a primeira e a segunda falha do componente na unidade de Serra foi de 6 meses. O fabricante do equipamento foi consultado e, conforme foi relatado, não há registro anterior de reclamações com relação a esse tipo de falha especificamente.

A falha do equipamento aconteceu na extremidade do eixo do cilindro (no parafuso de fixação), sendo que o componente é fixado à morsa por um terminal rotular.

A peça fraturou na seção onde há mudança de dimensões, sendo que esta parte é uma grande concentradora de tensões como explicado no tópico 2.4.4. Conforme a Figura 10, a peça fraturou de forma perpendicular à direção de tração e compressão, na parte rosqueada da peça, como sugerido pelo tópico 2.4.3.



**Figura 10: Fratura no parafuso do terminal rotular de fixação.**

### *3.2.2 Registros das falhas*

Atualmente, a empresa não possui registro de histórico com relação à manutenção, plano de lubrificação ou inspeção. Todas as atividades inerentes a este equipamento são realizadas com base na experiência de seus funcionários.

Foram realizados levantamentos com os operadores para verificar de que forma aconteceu a primeira falha, pois se acreditava ter sido uma falha operacional. Como resposta, obteve-se que a operação é basicamente automatizada, e os operadores não possuem muita autonomia sobre o maquinário em questão.

Após as entrevistas com operadores, a equipe de manutenção foi interrogada. Foi confirmado que a empresa não possui um sistema de manutenção preventiva do equipamento e que apenas foi realizada a troca do componente, sem nenhuma análise mais aprofundada.

### *3.2.3 Identificação das causas*

De acordo com o modo que a falha se apresentou, com a trinca se propagando de maneira praticamente perpendicular à direção de trabalho do parafuso, se iniciando

em uma região de concentração de tensão e em uma posição em que falhas em parafusos são muito recorrentes (conforme citado no tópico 2.4.4), um processo investigativo foi realizado a fim de se identificar o modo de falha e a causa raiz da falha, para que medidas possam ser propostas a fim de se evitar a recorrência deste tipo de falha.

#### 3.2.4 *Processo Investigativo*

No processo investigativo são buscadas características no componente que se assemelhem com características já conhecidas e de cada modo de falha, como maneira de aparecimento de trincas, a posição onde ocorreu a falha, se a falha foi dúctil ou frágil, etc.

São realizadas basicamente análises da superfície de fratura a níveis macroscópicos e microscópicos, a fim de se investigar por estruturas iniciais de propagação de trinca se outras particularidades que possam indicar a real causa da falha.

#### 3.2.5 *Análise da superfície de fratura*

Em uma análise macroscópica da superfície de fratura, algumas características valem a pena serem salientadas:

a) Quanto a ser notada a mudança de coloração ou textura:

- Devido à oxidação: Visualmente não é observada a ocorrência de *pitting* e deve-se levar em conta que se trata de um componente cromado.
- Devido a produtos de corrosão: A operação acontece em ambiente não agressivo, sem classificação para contaminantes químicos.
- Devido a contaminantes: Não existem contaminantes aparentes.

b) Características superficiais presentes na peça:

- Observa-se rugosidade na superfície de fratura

- Marcas de direção de propagação
- c) Medição de dureza: Não foi realizada
- d) Análise química: não foi realizada

Foram realizados ensaios de microscopia eletrônica de varredura com o objetivo de identificar trincas e outros defeitos microscópicos, pois é a partir dessas descontinuidades que falhas, na maioria das vezes, são originadas, decorrentes da propagação e amplificação dessas microdefeitos.

Os ensaios de corrosão não foram necessários, devido ao fato de que a peça é cromada e por não possuir nenhum indício aparente de que possuía um estágio de corrosão que pudesse ser um fator influenciador da falha, sendo que o tipo de corrosão procurado foi o *pitting* (pelo fato da peça ser cromada).

O ensaio de tensões não foi possível ser realizado, devido à peça já estar fraturada e impossibilitada de ser submetida a trabalho. Outra peça similar para que a análise fosse realizada seria de extrema dificuldade de se conseguir, devido ao fato de ser uma peça especial vinda de fora e com um custo elevado para a empresa. Na nova peça já reposta pela empresa não foi possível realizar o ensaio de tensões porque o equipamento deveria ser parado para tal, o que não foi possível devido à importância do equipamento para o processo. Seria um ensaio por *strain-gauges* e os resultados de extensão seriam parâmetros para uma análise mais apurada da falha.

Na Figura 11 é possível observar que uma das seções da peça aparenta ser a parte resistente da fratura, caracterizando possivelmente uma fratura por fadiga. Além disso, é possível perceber marcas de rios, uma característica de propagação de trincas.



**Figura 11: Visualização de topo da falha explicitando a seção resistente da peça**

A Figura 12 mostra as três zonas diferentes em que foram registradas as micrografias:

- a) Região de iniciação;
- b) Região de propagação;
- c) Região de sobrecarga.



**Figura 12: Indicações das seções onde foram feitas as microscopias pelo MEV**

Foram realizadas três microscopias eletrônicas de varredura em diferentes regiões da superfície de fratura, representadas nas Figura 13, Figura 14 e Figura 15, e apontados os pontos mais significativos, principalmente no que diz respeito aos padrões em leque, que provavelmente indicam a direção local de propagação.

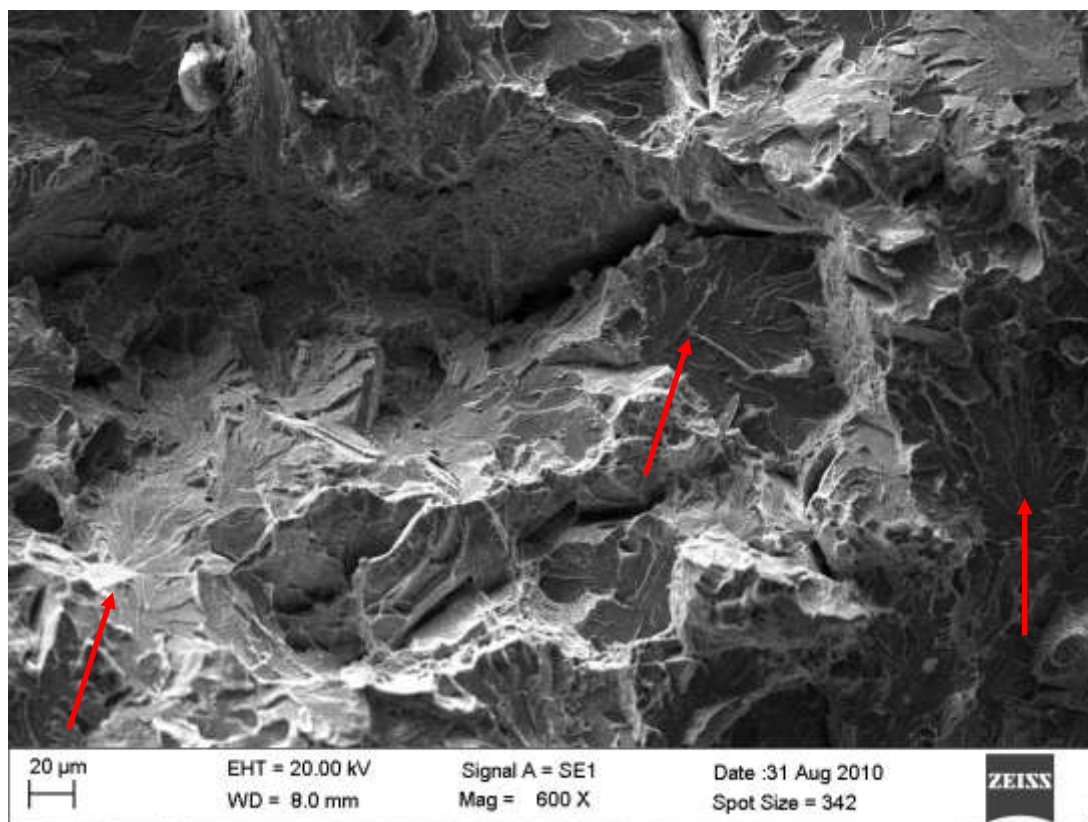


Figura 13: Micrografia eletrônica de varredura realizada na região de sobrecarga. Vêm-se marcas de rios (padrões em leque) indicadas pelas setas.

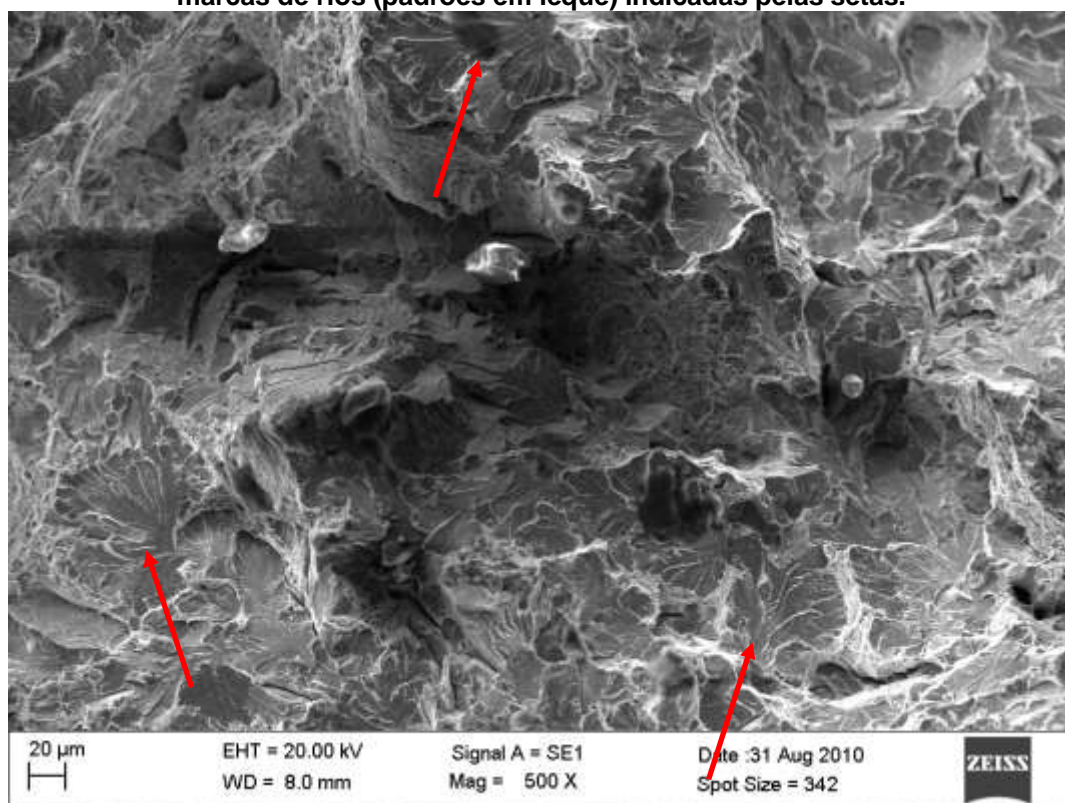
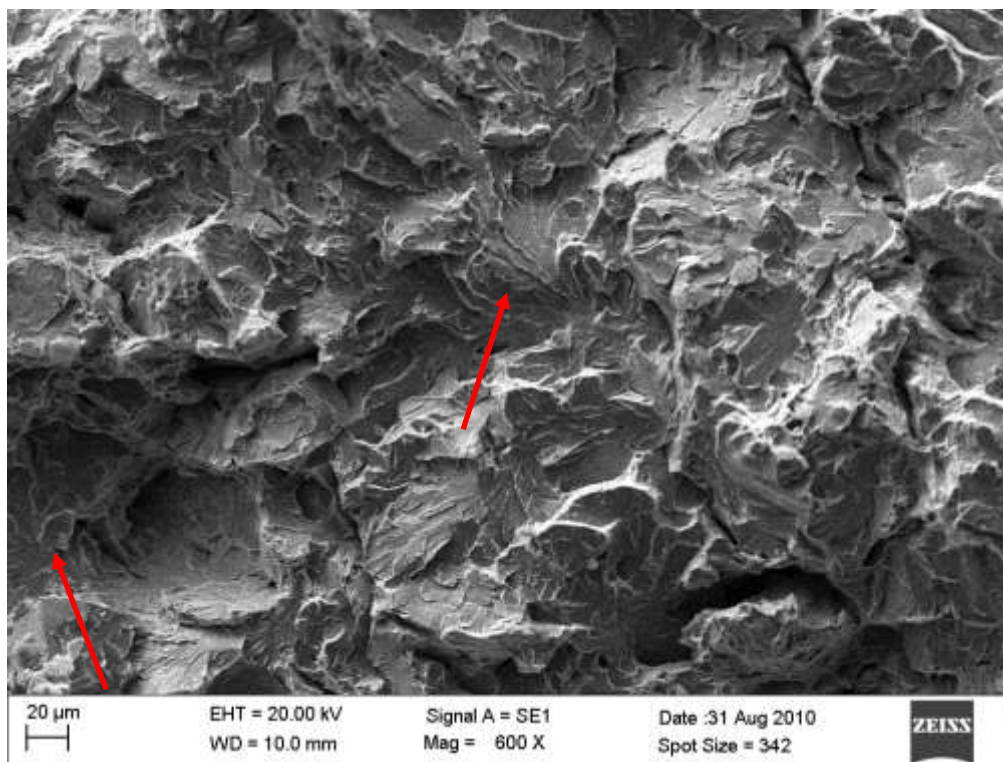


Figura 14: Micrografia eletrônica de varredura realizada na região propagação, mais próximo da região de sobrecarga. Vêm-se marcas de rios (padrões em leque) indicadas pelas setas.



**Figura 15: Micrografia eletrônica de varredura realizada na região propagação, mais próximo da região de iniciação. Vêem-se marcas de rios (padrões em leque) indicadas pelas setas.**

Para finalizar as análises da peça, foram realizados cortes a fim de preparar a peça para visualizações no MEV do perfil do parafuso, com o intuito de verificar trincas iniciais entre os dentes, que são regiões concentradoras de tensão.

O corte foi feito de forma perpendicular à Seção 1 (seção resistente), a fim de se analisar a peça quanto à forma, deformação e integridade nas regiões dos dentes. Foram admitidos quatro pontos distintos nos dentes do parafuso para que suas características possam ser comparadas. A Figura 16 mostra a peça já preparada para que o ensaio seja realizado e, também, a representação dos pontos onde será focada a análise da microscopia.

As micrografias dos pontos indicados na Figura 16 estão representadas pelas Figura 17, Figura 19, Figura 18 e Figura 20.

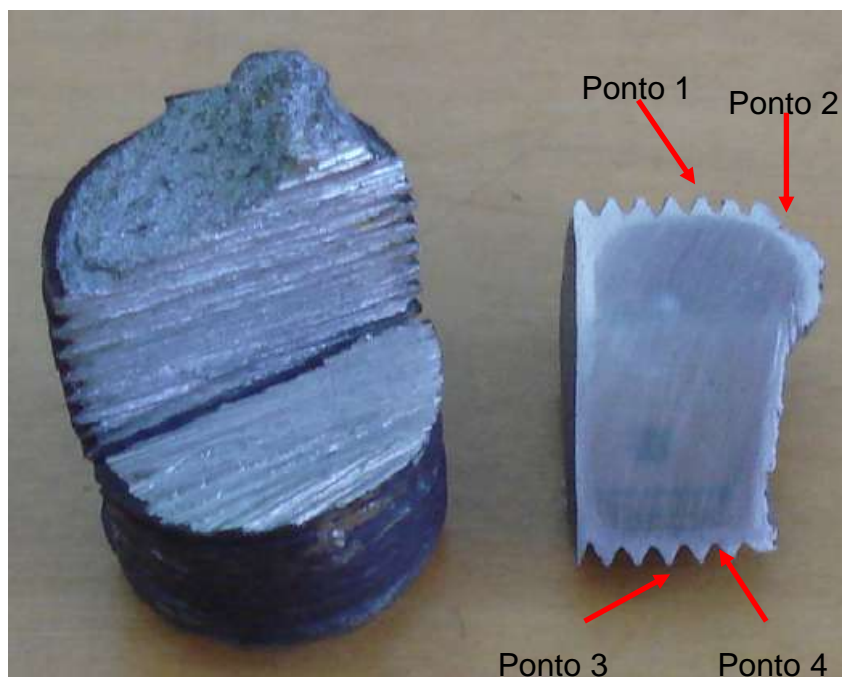


Figura 16: Fotografia do corte da peça. Os pontos que foram visualizados no MEV estão indicados pelas setas.

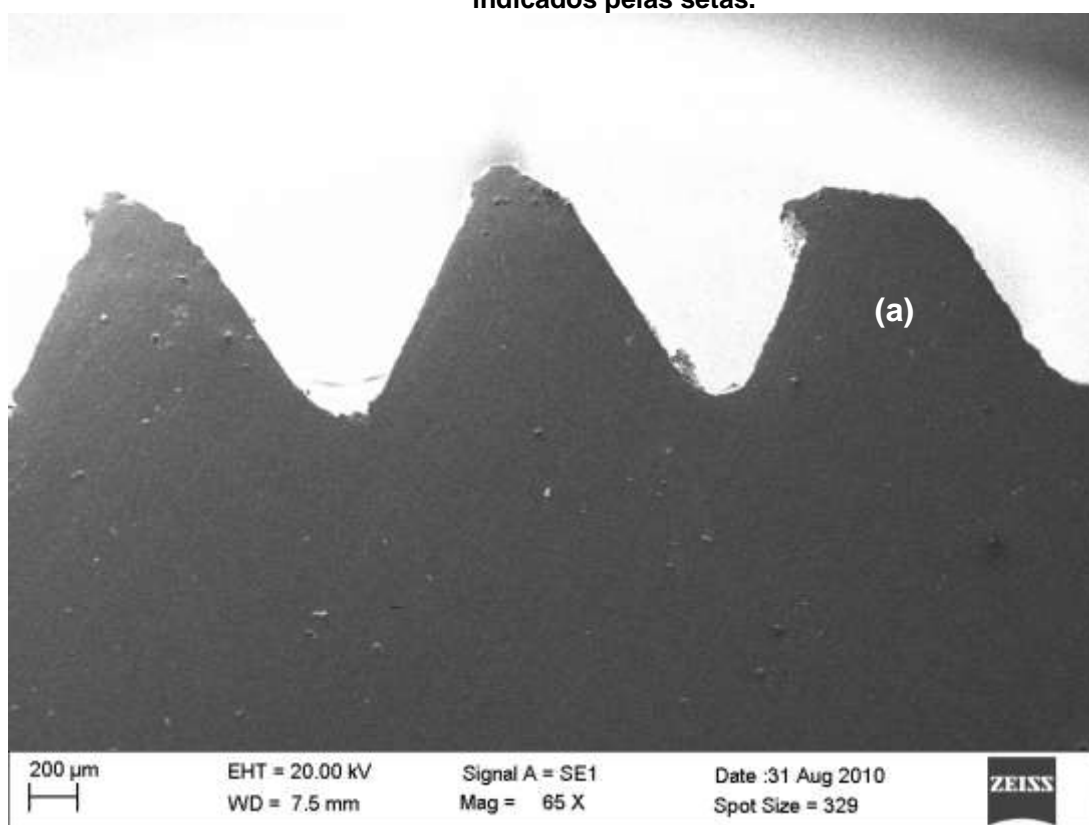
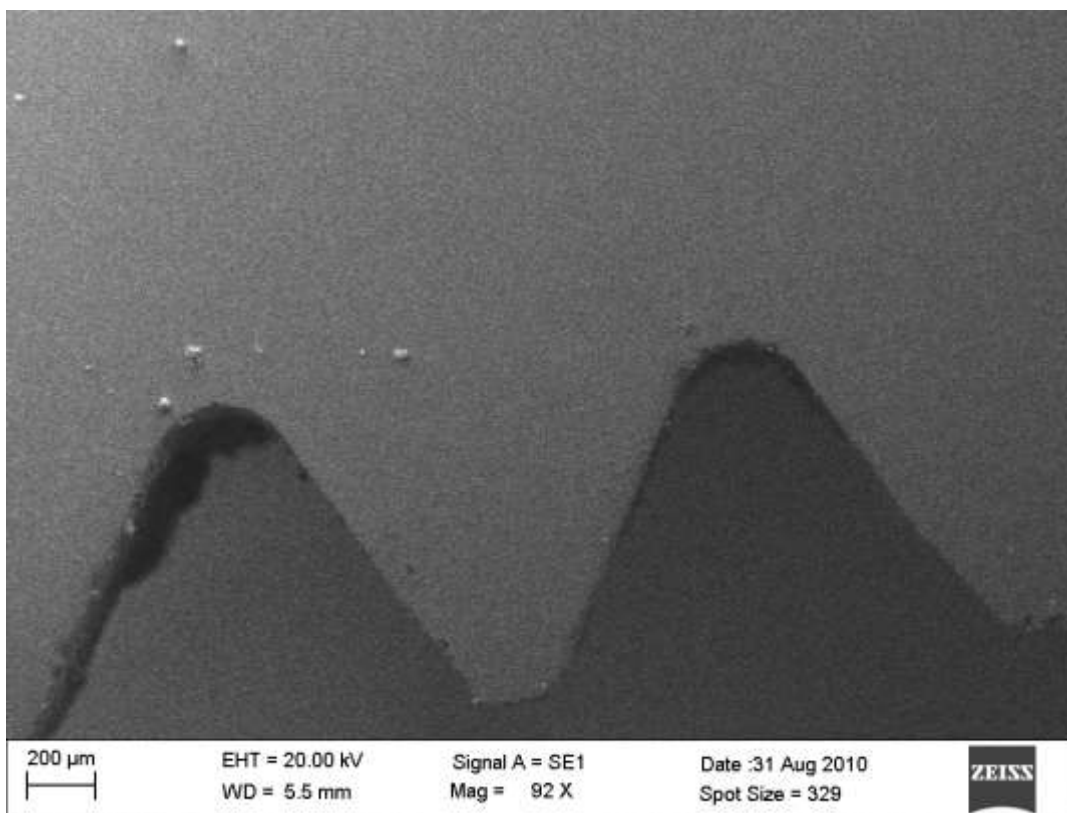
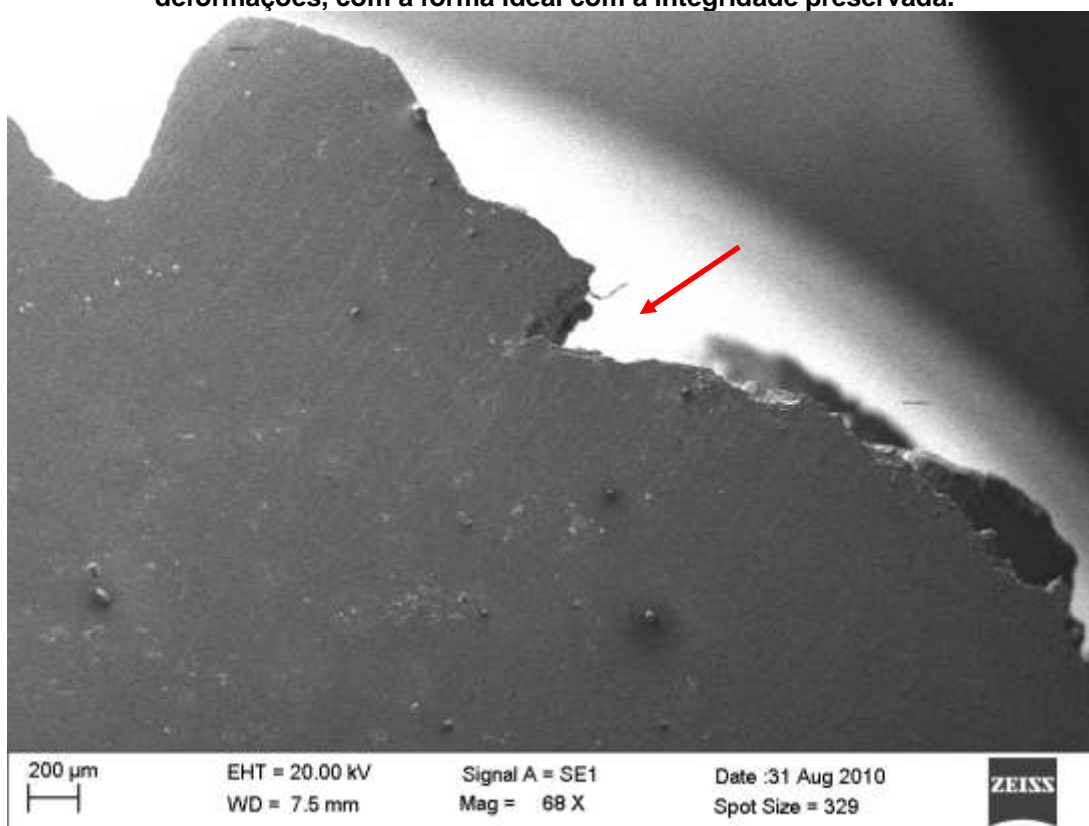


Figura 17: Ponto 1 - Dentes próximos a fratura. As bases dos vãos entre dentes não possuem trincas iniciais. Vê-se um dente com irregularidade de forma no seu topo (a).

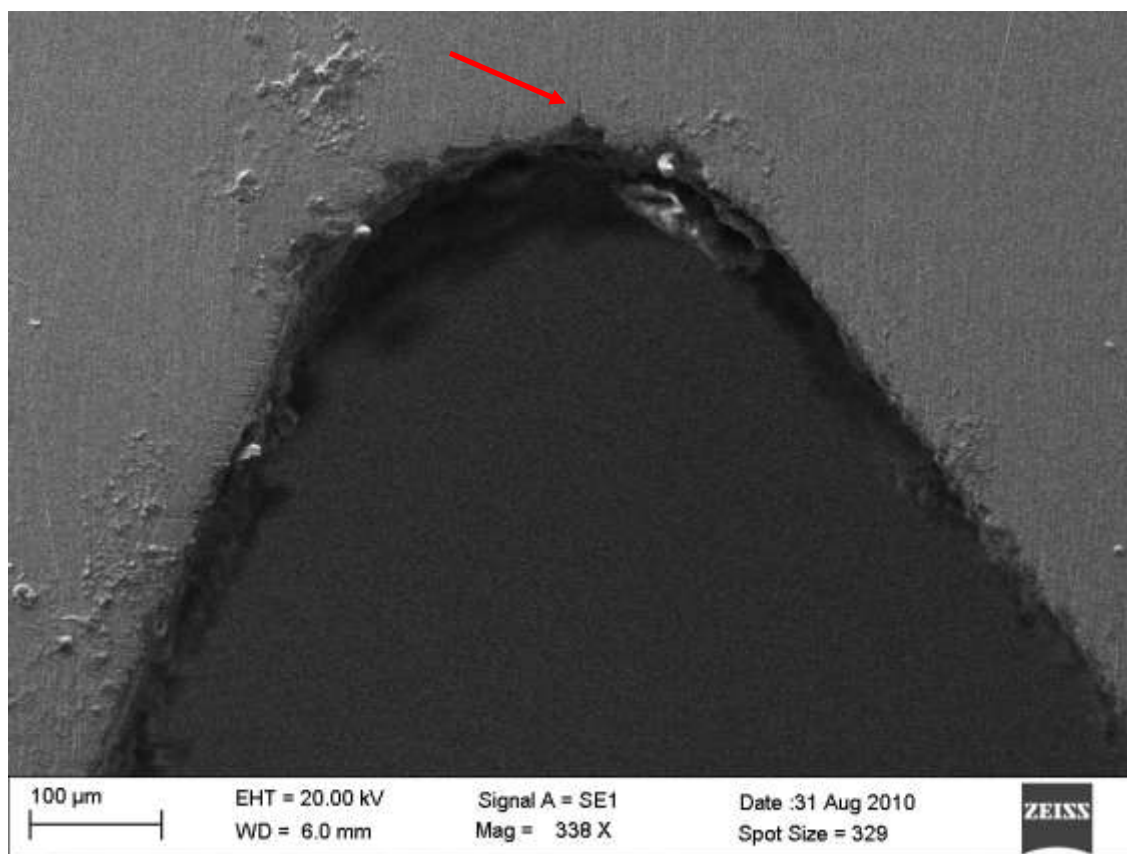




**Figura 18: Ponto 3 - Visualização dos dentes da rosca. Não há a presença de trincas ou deformações, com a forma ideal com a integridade preservada.**



**Figura 19: Ponto 2 - Interseção do dente com a fratura. Uma grande deformação é notada.**



**Figura 20: Ponto 4 - Visualização do vão entre dentes. São notadas marcas de desgaste e possível início de trinca indicada pela seta.**

Conforme as Figura 13, Figura 14 e Figura 15, nas três zonas analisadas é possível verificar regiões de início de propagação de trincas, sendo estas micro-fissuras que se ramificam a partir de um ponto em comum, formando contornos de áreas bem definidas na superfície da peça, conforme indicado pelas setas.

Nas Figura 17 e Figura 18 não foram encontradas trincas significativas nas regiões dos sulcos dos dentes do parafuso, que seriam um forte indício de fadiga, locais estes que são concentradores de tensões e são submetidos a tensões de tração, compressão e flexão.

Na Figura 19 observa-se uma irregularidade grosseira na peça, uma deformação originando uma entrada na diagonal para o interior da peça. Essa anormalidade não deve ser objeto de discussão para a falha ocorrida.

A Figura 20 revela um sulco de um dente em que apresentou um início de propagação de uma pequena trinca, mas não responsável pela falha que aconteceu.

Podem ser vistas, na base do dente do parafuso, pequenas deformações decorrentes ou da fabricação do parafuso ou mesmo devido aos esforços de trabalho.

As marcas de relevo nas faces que foram cortadas e preparadas, presentes em todas as microscopias, são de sujeira no material e originaram-se no corte ao se preparar a peça para ser feita a microscopia.

## 4 DISCUSSÃO

Uma característica marcante de a falha ter sido fratura frágil é o fato da trinca ter se propagado de forma praticamente perpendicular na peça com pouca deformação e de forma catastrófica, normal à direção da tensão principal de tração e compressão. Assim, tem indícios de ter sido originada por fadiga, resultado das tensões cíclicas que ocorreram durante o trabalho ao longo da vida da peça.

Quanto às dimensões da haste do atuador hidráulico, aparentemente seu comprimento (1200 mm) é muito grande em relação ao seu diâmetro (1 polegada ou 25,4 mm). Assim, sabendo que a morsa está susceptível a movimentos perpendiculares (na direção radial), podemos considerar que tensões de flexão e torção são originadas na compressão dos perfis para que sejam cortados. Essas tensões são muito prejudiciais ao elemento em questão, basicamente pelo mesmo não ter sido projetado para suportar essas tensões que possivelmente ocorrem devido a essa grande diferença entre o comprimento e o diâmetro da haste, e que também devido a essa característica construtiva, a consideração da atuação da torção e da flexão se torna indispensável.

Além disso, de acordo com o material do parafuso, Aço 1045, que possui uma dureza relativamente elevada, e pela temperatura de trabalho que é a ambiente, pode-se eliminar a possibilidade de uma fratura dúctil.

Na micrografia da Figura 19 foi observada uma pequena trinca inicial e irregularidades na estrutura do sulco do dente que, com o decorrer do tempo, é possível que essas irregularidades pudessem ter se propagado e, portanto, ter sido uma causa raiz de falha.

Em todas as micrografias são vistas mascas de relevo, conforme citado em 3.2.5, não sendo, portanto, particularidades ou aspectos a serem analisados na ocorrência desta falha.

## 5 CONCLUSÃO

Comparando os resultados obtidos na análise com o material da bibliografia usada, é possível afirmar que a falha ocorreu por fadiga com fratura frágil iniciada na região de maior concentração de tensão que são os sulcos entre os dentes (regiões de mudança de diâmetro). Provavelmente as tensões atuantes que levaram a essa falha foram essencialmente as de flexão e torção devido ao modo de apresentação que se originaram no processo de prensar o perfil para ser trabalhado (compressão), provavelmente devido à grande diferença entre o comprimento e o diâmetro da haste do atuador hidráulico.

Portanto, atribui-se a responsabilidade pela ocorrência da fratura principalmente aos seguintes fatores:

- Relação entre o comprimento da haste do atuador hidráulico e o diâmetro do mesmo é muito desproporcional (vão livre com ele estendido é muito grande), provocando uma flexão na haste e esforços na direção radial da mesma, que foram transmitidos para o parafuso;
- Componente poderia ser melhor dimensionado para as condições de operação, pois tomando em conta as tensões na direção radial que são geradas, um parafuso de maior diâmetro e sulcos mais abaulados distribuiria melhor as tensões concentradas. [2.4.3, 2.4.4]

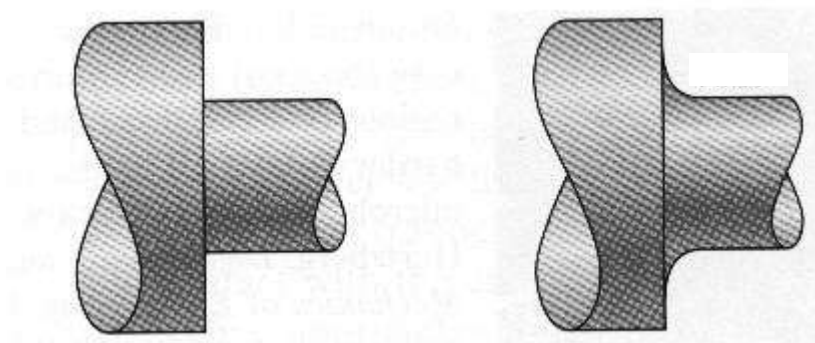
Após a realização dos procedimentos investigativos, foi concluído que possivelmente a falha ocorreu devido a erro de projeto, pois deveriam ser levados em consideração todos os fatores que já foram citados e ser inclusive adotado um fator de segurança, tomando por base a importância do elemento em questão para o funcionamento do equipamento (elemento essencial para o funcionamento da máquina).

## 6 PROPOSTAS DE MELHORIAS

Determinando a causa raiz da falha como realmente as tensões de flexão e torção que incidem na direção radial ao parafuso, é possível se realizar melhorias no equipamento a fim de evitar novas falhas. Abaixo, seguem propostas de melhorias para o componente analisado, que inclusive podem ser combinadas:

### 1ª Proposta

Diminuir a concentração de tensão na seção de mudança de diâmetro através de um filete desta seção, conforme a Figura 21 (lembrando que as dimensões estão exageradas).



**Figura 21: Proposta de filete para redução da concentração de tensão na seção de mudança de diâmetro**

### 2ª Proposta

Desenvolver e implementar um guia inferior na haste do atuador morsa a fim de evitar ou minimizar o movimento perpendicular ao ideal do cilindro (movimento na direção radial), minimizando as tensões de flexão e torção transmitidos ao parafuso, já sabendo que essas são as principais causadoras da falha analisada.

### 3ª Proposta

Redimensionar o sistema, aumentando o diâmetro da haste do atuador e conseqüentemente o diâmetro do parafuso que analisamos. Assim, com uma maior robustez, o parafuso será capaz de suportar as tensões originadas perpendiculares ao seu movimento de trabalho, e com uma menor diferença entre o comprimento da haste do atuador hidráulico e o seu diâmetro, as tensões de flexão e torção serão menores. Contudo, faz-se necessário se realizar ensaios prévios e registrá-los a fim de que uma base de dados esteja disponível para manutenções ou análise futuras.

### 4ª Proposta

Especificar outro material para a fabricação do componente. Material este com propriedades mais adequadas para a condição de trabalho do parafuso, tomando em conta as tensões atuantes sobre ele. Basicamente seria um material com uma menor dureza.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Análise de Falha**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/59539870/analise-de-falhas>>. Acesso em 18 nov. 2011.
- [2] REVISTA AGROANALYSIS. **O que é manutenção industrial?**. 2007 Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=65080>>. Acesso em 19 nov. 2011
- [3] FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. Dicionário aurélio . Disponível em: <<http://74.86.137.64-static.reverse.softlayer.com/>>. Acesso em 10 nov. 2011
- [4] DOSAFIELD. **Conceitos de manutenção**. Disponível em: <[http://www.dosafield.com.br/conceitos\\_manutencao.pdf](http://www.dosafield.com.br/conceitos_manutencao.pdf)>. Acesso em 09 nov. 2011
- [5] SENAI-CFP “ALVIMAR CARNEIRO DE REZENDE” **Gestão da manutenção**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/7326108/Gestao-Da-Manutencao-Curso-tecnico>>. Acesso em 02 nov. 2011
- [6] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO. **Ensaios não destrutivos – END**. 2011. Disponível em: <[http://www.abende.org.br/info\\_end\\_oquesao.php?w=1024&h=768](http://www.abende.org.br/info_end_oquesao.php?w=1024&h=768)>. Acesso em 21 de Nov. 2011
- [7] Apostila de planejamento e manutenção da Petrobras - Escola de ciências e tecnologias ABAST.
- [8] DHILLON, Balbir S. **Maintainability, maintenance, and reliability for Engineers**. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- [9] CABRAL, José Paulo Saraiva. **Organização e gestão da manutenção**. Lisboa: Lidel, 2006.
- [10] MOBLEY, Keith R., HIGGINS, Lindley R., WIKOFF, Darrin J. **Maintenance Engineering Handbook**. Nova Iorque: McGraw-Hill Professional, 2008.
- [11] NBR 5462. **Confiabilidade e Manutenibilidade** - Nov 1994
- [12] AFFONSO, Luiz Otávio. Amaral. **Equipamentos mecânicos: análise de falhas e solução de problemas**. Qualitymark, 2006.



- [13] ASM METALS HANDBOOK. **Failure Analysis and Prevention**. v. 11. 2002.
- [14] VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. Ed Campus, 1984.
- [15] CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução**. John Wiley & Son,. 2008
- [16] HECK, Nestor Cezar. **Introdução à engenharia metalúrgica**. 2009.
- [17] GARCIA, Amauri; SANTOS, Carlos Alexandre dos; SPIM, Jaime Álvares. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 2000.
- [18] COLLINS, J.A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas**. LTC. Inc. 2006
- [19] AMBIENTE BRASIL. **Fator de segurança**. Disponível em: <[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/exploracao\\_e\\_transporte/fator\\_de\\_seguranca.html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/florestal/exploracao_e_transporte/fator_de_seguranca.html)> Acesso em 25 nov. 2011
- [20] DE MORAIS, Willy Ank; GODEFROID, Leonardo Barbosa; CÂNDIDO, Luiz Cláudio. **A análise de falhas como ferramenta de convergência dos conhecimentos metalúrgicos: revisão e exemplos de casos**. Disponível em: <<http://willyank.sites.uol.com.br/DISCIPLINAS/AnaliseFalhas/Artigo1.pdf>>. Acesso em 10 nov. 2011