

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CAIO AUGUSTO DA SILVA OLIVEIRA  
JAMERSON LUMA DA SILVA  
NAAMA TAVARES FONSECA  
VICTOR DE ABREU RAMOS BRAGA**

**ANÁLISE DE FALHA DOS PARAFUSOS UTILIZADOS EM UM  
*STACKER RECLAIMER***

**VOLTA REDONDA  
2019**

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DE FALHA DOS PARAFUSOS UTILIZADOS EM UM  
*STACKER RECLAIMER***

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Alunos:

Caio Augusto da Silva Oliveira  
Jamerson Luma da Silva  
Naama Tavares Fonseca  
Victor de Abreu Ramos Braga

Orientadores:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira  
Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Coorientador:

Prof. Dr. Sandro Rosa Correa

VOLTA REDONDA

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Caio Augusto da Silva Oliveira

Jamerson Luma da Silva

Naama Tavares Fonseca

Victor de Abreu Ramos Braga

Título de Monografia

ANÁLISE DE FALHA DOS PARAFUSOS UTILIZADOS EM UM STACKER  
RECLAIMER

Orientadores:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Coorientador:

Prof. Dr. Sandro Rosa Correa

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

---

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

---

Prof. Dr. Sandro Rosa Correa

## DEDICATÓRIA

A Deus, dono de todas as coisas e autor dos  
nossos dias.

Aos nossos pais, que não mediram esforços  
para nos ajudar a conquistar essa vitória,  
amamos vocês.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por ter nos proporcionado chegar até aqui. A nossos pais por serem nossas bases, e ter nos apoiados em todos os momentos ao longo do curso, por toda dedicação e paciência nos momentos de dificuldades.

Aos nossos familiares, aos que nos ajudaram direta ou indiretamente, aos nossos colegas e amigos.

Ao professor e nosso coorientador Sandro Rosa Correa, por toda orientação e apoio ao longo do desenvolvimento da nossa monografia.

Aos orientadores Alexandre Alvarenga Palmeira e Alexandre Fernandes Habibe por todo o conhecimento que nos foi passado.

Ao técnico de laboratório Dirceu Hartung de Camargo Coutinho, pelo auxílio na parte prática dessa monografia.

Aos professores que nos ensinaram e nos incentivaram durante esses 5 anos.

Aos amigos que adquirimos nessa trajetória, em especial a nossa própria equipe, somos gratos por cada um de nós, e principalmente pela nossa amizade.

Por fim, queremos agradecer a todos os envolvidos, vocês foram de suma importância para a concretização dessa conquista.

## RESUMO

A realização do seguinte trabalho possibilitou a análise de falha mais detalhada dos parafusos de fixação do rolamento de giro de um *Stacker Reclaimer* que atua como recuperador e empilhador de minério granulado em uma siderúrgica. O sistema de fixação do rolamento é composto por 72 parafusos, sendo que 24 fraturaram em operação. A partir destas informações foram realizadas análises químicas, metalográficas, dureza e de falha com intuito de identificar a causa da falha do parafuso. Os resultados mostraram que as propriedades do material conforme indicado no mesmo, especificação DIN ISO 898 M27 classe 12.9 foi atendida e o tipo de fratura observado foi frágil sem marcas de praia, o que mostra que o mesmo sofreu uma sobrecarga acima do seu limite de resistência. Quando analisado a especificação de projeto, DIN ISO 898 M27 classe 10,9, o parafuso analisado divergia da especificação, o que mostra que já haviam sido substituídos por um de classe mais resistente e mesmo assim ocorreu a falha.

**Palavras chaves:** Componente de fixação; Microestrutura; Análise de falha.

## **ABSTRACT**

The accomplishment of the following work allowed the analysis of more detailed failure of the fastening screws of the rolling bearing of a Stacker Reclaimer that acts as recuperador and forklift of granulated ore in a steel plant. The bearing fastening system is composed of 72 screws, 24 of which have fractured in operation. From this information were carried out chemical, metallographic, hardness and failure analyzes in order to identify the cause of the screw failure. The results showed that the properties of the material as indicated in the DIN ISO 898 M27 class 12.9 specification were met and the type of fracture observed was fragile without beach markings, which shows that it suffered an overload over its resistance limit. When analyzing the design specification, DIN ISO 898 M27 class 10.9, the screw analyzed differed from the specification, which shows that they had already been replaced by a more resistant class and even then the failure occurred.

**Key-words:** Fixation component, microstructure, fault analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Stacker Reclaimer .....	3
Figura 2 - Parafuso .....	4
Figura 3 - Parafuso passante.....	5
Figura 4 - Parafuso não passante.....	5
Figura 5 - Parafuso de pressão .....	6
Figura 6 - Parafuso prisioneiro .....	6
Figura 7 - Terminologia de roscas de parafusos .....	8
Figura 8 - Parafuso de porca com cabeça hexagonal .....	9
Figura 9 - O'Ring.....	10
Figura 10 - Princípio de vedação .....	11
Figura 11 - Volume de interação .....	12
Figura 12 - Sistemas de iluminação .....	13
Figura 13 - Conceito intuitivo sem concentração de tensões.....	18
Figura 14 - Conceito intuitivo com concentração de tensões.....	18
Figura 15 - Curvas do índice de sensibilidade ao entalhe versus raio do entalhe para uma gama de aços e uma liga de alumínio submetidos ao carregamento axial, de flexão e de torção .....	19
Figura 16 - Curva fluência versus tempo .....	26
Figura 17 - Efeito do histórico termomecânico sobre as propriedades mecânicas do aço AISI 4340.....	29
Figura 18 - (a) Fratura extremamente dúctil cuja imagem empescoça até um único ponto. (b) Fratura levemente dúctil a seguir de algum empescoçamento. (c) Fratura frágil isenta de deformação plástica.....	37
Figura 19 - Estágios na fratura taça e cone. (a) Empescoçamento inicial. (b) Pequena formação de cavidades. (c) Aderência de cavidades para formar a trinca. (d) Ampliação de trinca. (e) Fratura final por cisalhamento em um ângulo de 45° em relação à direção de tração.....	38
Figura 20 - Tensão aplicada em superfície de fratura relativamente plana .....	39
Figura 21 - Superfície de fratura frágil.....	40
Figura 22 – Superfície de fratura frágil.....	40
Figura 23 - Durômetro de bancada Pantec Rockwell modelo RASN-RS.....	44
Figura 24 - Corpo de prova .....	46

Figura 25 - Cortadora Metalográfica Modelo C M40.....	47
Figura 26 - Amostra embutida .....	47
Figura 27 - Embutidora TECLAGO EM-30D .....	48
Figura 28 - Lixadeira metalográfica AROTEC.....	48
Figura 29 - Microscópio Óptico.....	49
<i>Figura 30 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Modelo TM 3000 .....</i>	<i>50</i>
Figura 31 - Corpo de prova utilizado para análise de fratura .....	51
Figura 32 – Microestrutura martensítica. Aumento de 100x.....	52
Figura 33 – Microestrutura martensítica. Aumento de 200x.....	53
Figura 34 – Microestrutura martensítica .....	53
Figura 35 – Microestrutura martensítica .....	54
Figura 36 - Superfície da fratura .....	54
Figura 37 – Superfície da fratura.....	55
Figura 38 – Localização do Parafusos no Sistema.....	58
Figura 39 – Sistema Parafuso e Rolamento .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala Rockwell.....	43
Tabela 2 - Composição química do Aço Liga (%p/p).....	56
Tabela 3 - Composição química ISO 898.....	56
Tabela 4 - Valores do ensaio de dureza Rockwell.....	57

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Fluxograma .....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Equipamento .....	3
2.2 Elementos de Fixação .....	4
2.2.1 Parafusos.....	4
2.2.2 O'Ring.....	10
2.3 Princípio Básico de Vedação.....	11
2.4 Microscopia eletrônica de varredura .....	11
2.4.1 Princípio de funcionamento .....	11
2.5 Microscopia Óptica.....	13
2.6 Tensão .....	14
2.6.1 Análise de Tensão e Deflexão .....	15
2.6.2 Padrões Comuns de Tensões.....	15
2.6.3 Concentração de Tensões.....	17
2.7 Fatores de Concentração de Tensões à Fadiga e o Índice de Sensibilidade ao Entalhe.....	18
2.8 Fator de Segurança e Fator de Projeto .....	20
2.9 Materiais.....	22
2.9.1 Seleção de Materiais .....	22
2.9.2 Dureza.....	23
2.9.3 Propriedades de Impacto .....	23
2.9.4 Fadiga.....	24
2.9.5 Efeitos da Temperatura.....	25
2.9.6 Processos de Trabalho a Quente .....	26
2.9.7 Tratamento Térmico do Aço .....	27

2.9.8 Aços Liga .....	29
2.10 Critério de Falha .....	32
2.10.1 Métodos de Falha Mecânica .....	32
2.11 Utilização e Características de Uniões em Montagens de Máquinas .....	33
2.12 Modos Prováveis de Falha .....	33
2.13 Cargas Variáveis, Acúmulo de Dano a Vida à Fadiga .....	34
2.14 Materiais e Procedimentos de Fabricação dos Elementos de Fixação.....	34
2.15 Fratura.....	35
2.16 Fratura Dúctil.....	36
2.17 Fratura Frágil.....	38
<b>3 METODOLOGIA .....</b>	<b>41</b>
3.1 Material do Parafuso .....	41
3.2 Classe de Resistência do Parafuso.....	41
3.3 Ensaio de Dureza .....	42
3.4 Ensaio Metalográfico .....	44
3.5 Preparação do corpo de prova .....	45
3.6 Metalografia .....	45
3.6.1 Lixamento .....	46
3.6.2 Polimento .....	48
3.6.3 Ataque químico .....	49
3.7 Microscopia Óptica.....	49
3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	50
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>52</b>
4.1 Resultados Metalográficos.....	52
4.2 Resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura .....	53
4.3 Resultado de Análise na Superfície da Fratura.....	54
4.4 Análise de Falha .....	55

4.5 Análise Química.....	56
4.6 Dureza do Material .....	56
<b>5 ANÁLISE DO SISTEMA .....</b>	<b>58</b>
5.1 Análise da Estrutura do Rolamento.....	58
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>62</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um problema que tem preocupado bastante aos engenheiros são as falhas inesperadas e repentinas de componentes mecânicos, podendo ocorrer eventos indesejáveis como; risco a vida humanas, perdas econômicas e financeiras e interferência em meios produtivos.

No presente trabalho foi realizado uma análise de falha do parafuso de fixação do rolamento de giro de uma *Stacker Reclaimer* que opera em uma siderúrgica, levando em conta o índice de parafusos fraturados, pois o sistema é composto por 72 parafusos, dos quais 24 romperam Assim, visa-se compreender porque e como ocorre a fratura de parafusos do sistema de fixação do rolamento.

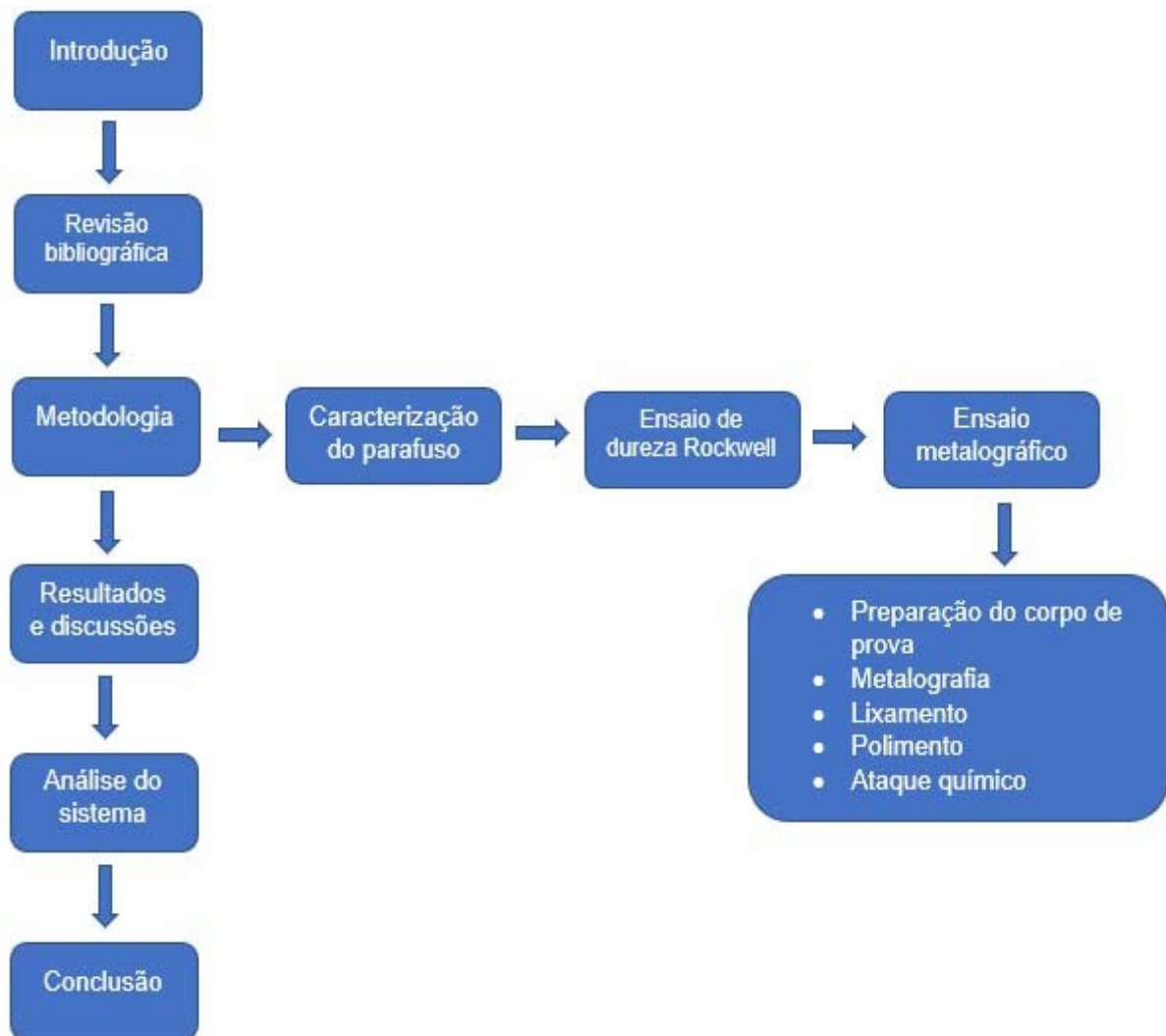
Esse tipo de ocorrência exige da siderúrgica um longo período de parada para que se faça a reparação do problema, optando por resolução mais eficácia, para que assim o problema não venha ocorrer novamente, ocasionando a indisponibilidade do equipamento.

Porém, nem sempre a melhor solução é eliminar o problema que ocorreu e sim analisar e tentar inibir o que contribuiu para o surgimento do mesmo. Uma vez que comprovado que o material do parafuso está de acordo com o que é estabelecido, podemos então prever que a falha pode estar relacionada ao sistema que engloba o componente de fixação.

Mediante tal problema o ideal é que também se analise o sistema de onde o parafuso estava fixado. Neste cenário nota-se a importância de compreender tais falhas, tudo isso para que se evite acidentes e quedas na produtividade, levando em consideração a necessidade de manutenção e acompanhamento da vida útil dos componentes.

Devido a exigência do uso do equipamento diariamente, torna-se necessário buscar opções mais eficácia para garantir o bom funcionamento do equipamento e do mesmo modo efetuar uma correta operação no mesmo.

## 1.1 Fluxograma

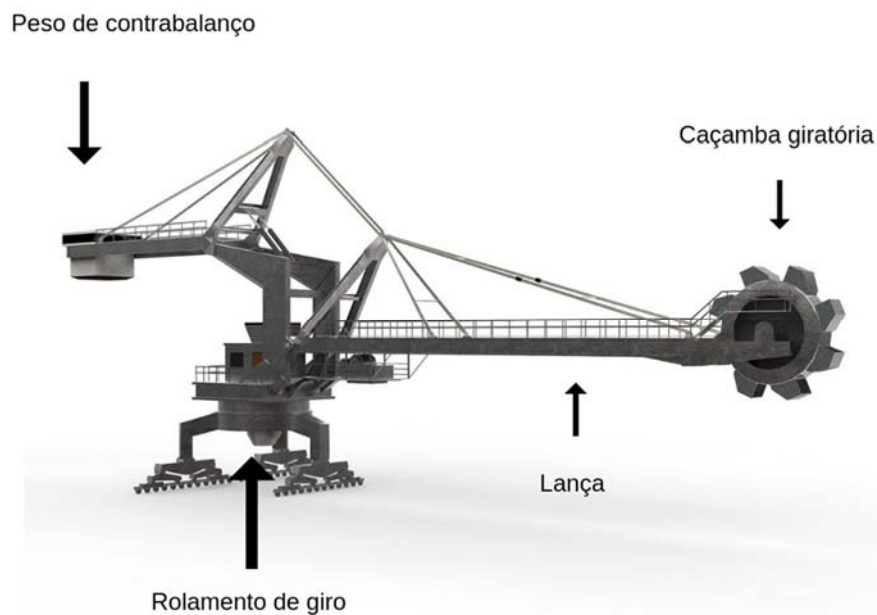


## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Equipamento

*Stacker Reclaimer* é um equipamento de grande porte que trabalha como recuperador e empilhador utilizado no controle do fluxo de entrada e saída de minérios sólidos, como cascalho de aço, cimento, carvão, dentre outras matérias. Essa máquina contém uma lança por onde o material é transportado que podem ultrapassar os 50 m, por serem equipamentos de grande porte requer muito cuidado no dimensionamento dos componentes mecânicos que vão suportar as cargas de operação.

Figura 1 – *Stacker Reclaimer*



Fonte: google imagens em maio de 2019.

A figura 1 indica a caçamba giratória por onde o material é recolhido, a lança por onde o material é transportada, rolamento de giro que permite com que o equipamento se movimente e um peso que serve de contra balanço devido ao comprimento de sua lança. Por serem máquinas de grande porte que trabalham com

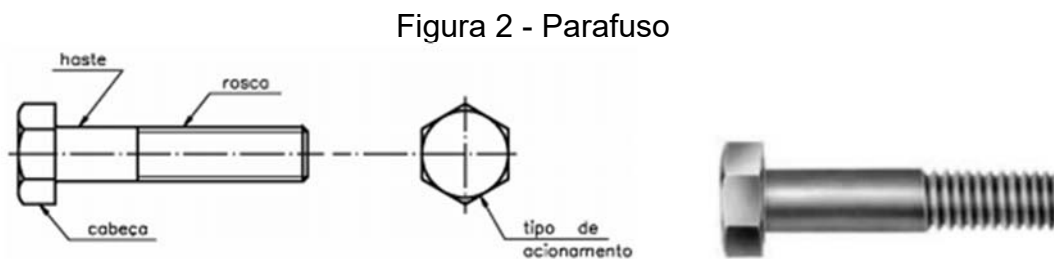
cargas altas os principais defeitos que ocorrem em uma *Stacker Reclaimer* são de operação, impactos externos, projeto e fabricação.

## 2.2 Elementos de Fixação

### 2.2.1 Parafusos

Os parafusos são elementos de fixação mecânica, usados para unir peças de forma não permanente, ou seja, as peças unidas por este componente de fixação têm a capacidade ser desmontada e montada com um certo grau de facilidade, bastando aplicar o torque corretamente.

Segundo Barbosa (2011, pg. 29) “os parafusos são caracterizados pela forma da rosca, haste, cabeça e do tipo de acionamento”.



Fonte: Palatino (2017).

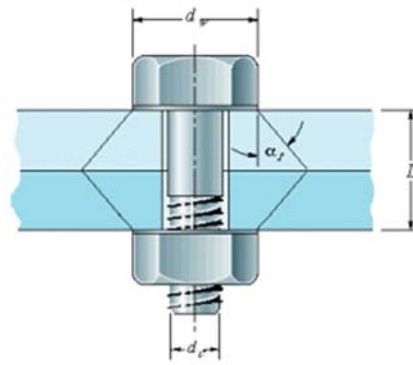
Parafusos são formados basicamente por um corpo cilíndrico ou cônico e cabeça, então o que os diferencia é o tipo de acionamento, forma da haste, cabeça e da rosca.

#### 2.2.1.1 Tipos de Parafusos

##### 2.2.1.1.1 Parafusos Passantes

Este tipo de parafuso atravessa de um lado para o outro nos componentes a serem unidos. Dependendo do trabalho a se fazer, esse tipo de parafuso, além da porca necessita de arruelas e contra porcas.

Figura 3 - Parafuso passante

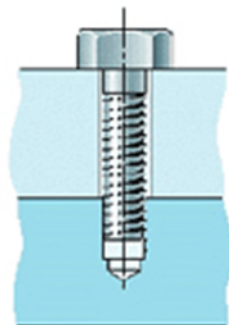


Fonte: Shigley (2011).

#### 2.2.1.1.2 Parafusos não passantes

Nesse caso o parafuso é fixado no furo roscado da peça a ser unida, não é necessário usar porca.

Figura 4 - Parafuso não passante

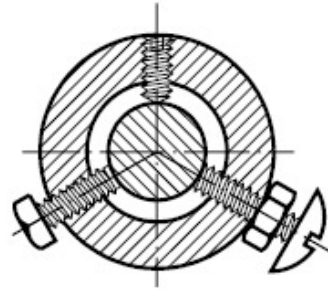


Fonte: Shigley (2011).

#### 2.2.1.1.3 Parafusos de Pressão

Parafusos de pressão são fixados por pressão podendo ter ou não cabeça, onde a pressão é cumprida pela ponta do parafuso contra a peça que se deseja ser fixada.

Figura 5 - Parafuso de pressão



Fonte: Collins (2006).

#### 2.2.1.1.4 Parafusos Prisoneiros

Este tipo de parafuso não apresenta cabeça, mas com rosca em ambos os lados. São utilizados geralmente onde a montagem e desmontagem ocorre com frequência. De acordo com Barbosa (2011, p. 38) “a utilização de outros tipos de parafusos pode danificar a rosca dos furos. As roscas dos parafusos prisoneiros podem ter passos diferentes ou sentidos opostos, isto é, um horário e o outro anti-horário”.

Figura 6 - Parafuso prisioneiro



Fonte: SBRT (2011).

#### 2.2.1.2 Padrões de Roscas e Definições

De acordo com Shigley (2011, p 422) os parafusos que contem roscas helicoidais foram uma das invenções mecânicas mais importante, pois ele é base de

alguns parafusos como o de potência, que tem como função converter movimento angular em movimento linear com o objetivo de transmitir potência ou gerar grandes forças (macacos, prensas), outro componente muito importante são os fixadores rosqueados, que são de suma importância em junções não permanentes.

Um dos objetivos da manufatura é diminuir a quantidade de fixadores, entretanto haverá a necessidade de fixadores de modo a facilitar na hora da desmontagem caso necessário. Um exemplo é o jato Boeing 747 que requer aproximadamente 2,5 milhões de fixadores, os quais possuem um elevado custo. Para manter o baixo custo fabricantes de aeronaves, constantemente reveem desenhos de novos fixadores, técnica de instalação e ferramental.

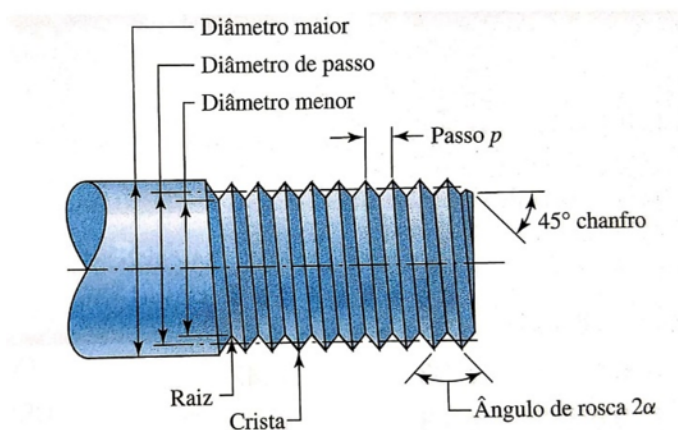
Ao passar dos anos a quantidade de tipos de fixadores tem se inovado em grande escala. Uma grande variedade de fixadores está à disposição para a seleção do projetista, os métodos para a união de peças são muito importantes na engenharia, onde é necessário ter uma compreensão completa do desempenho de fixadores, junções e de todas as condições para o uso.

### **2.2.1.3 Terminologia de Roscas de Parafusos**

O passo pode ser compreendido como o espaço entre formas adjacentes de rosca que pode ser medida paralelamente ao eixo da rosca. O diâmetro maior pode ser entendido como o diâmetro maior de uma rosca de parafuso.

Raiz ou menor diâmetro pode ser compreendido como o menor diâmetro de uma rosca de parafuso. O diâmetro de passo é um diâmetro teórico entre os diâmetros maior e menor.

Figura 7 - Terminologia de roscas de parafusos



Fonte: Shigley (2011).

O Avanço  $dp$ , não mostrado, pode ser entendido como o espaço em que a porca se move paralelo ao eixo do parafuso no momento em que a mesma dá uma volta. Para rosca única, o avanço é o mesmo que o passo.

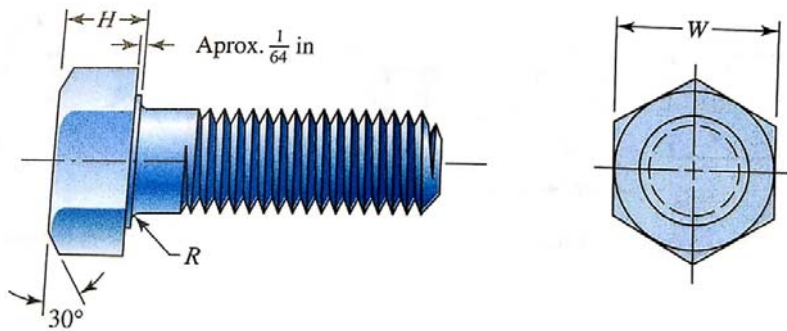
A norma utilizada para rosca é a *American National* (Unificada) que foi aprovada na Grã-Bretanha e nos Estados Unidos para ser utilizada em produtos rosqueados padronizados. O ângulo para rosca é de rosca é  $60^\circ$  e as cristas das roscas pode ser redonda ou plana.

#### 2.2.1.4 Fixadores Rosqueados

À medida que estudamos sobre fixadores rosqueados e sua utilização, temos que estar em atentos quanto às perspectivas de vista determinístico e estocástico. Na maioria o indício é proveniente de carregamento de sobre prova de fixadores, e esta é mais bem tratada por métodos estatístico. A ameaça de fadiga é menor e os métodos determinísticos podem ser adequados.

A figura 8 mostra um parafuso de porca de cabeça hexagonal padrão. Pontos de concentração de tensão estão no início das roscas (escape), no filete, e no filete da rosca de raiz, no plano da porca quando esta está em presente.

Figura 8 - Parafuso de porca com cabeça hexagonal



Fonte: Shigley (2011).

O tamanho ideal de parafusos de sua porca é aquele em que somente uma ou no máximo duas roscas se projetam da porca após o momento em que ela é apertada. Furos de parafusos de porca podem conter extremidades afiadas ou rebarbas posteriormente ao processo. Elas são capazes de aumentar a concentração de tensão e cortar no filete. Assim arruelas sempre devem ser utilizadas abaixo da cabeça do parafuso de porca, de maneira que a borda arredondada do furo estampado encontre a face da arruela do parafuso. Em alguns momentos, é necessário utilizar as arruelas sob a porca também.

### 2.2.1.5 Definições de rosca

Rosca é um conjunto de sulcos helicoidais que podem ser encontrados em parafusos, porcas ou na extremidade de tubos ou peças que se conectam por movimento de rotação e encaixe. Elas podem ser internas, encontradas no interior de porcas e peças que demandam algum tipo de rosca ou roscas externas que podem ser encontradas no corpo do parafuso ou na extremidade de peças e tubos.

#### 2.2.1.5.1 Perfil da Rosca (Seção do Filete)

As roscas possuem tipos de perfis variáveis, aos quais são sempre uniformes, nomeiam e determina a sua aplicação:

- O triangular é tipo mais usado sendo empregado em parafusos, porcas, uniões e tubos.
- O trapezoidal é utilizado em aparelhos de comando de máquinas (transmissão de movimento) e prensas de estampar.
- Redondo geralmente usado em parafusos de grande porte que exigem uma enorme quantidade de esforço .
- Dente de serra é utilizado quando a força solicitada é muito grande e em um único sentido.
- Quadrado é pouco utilizado, mas pode ser encontrado em peças sujeitas a grandes esforços e impactos.

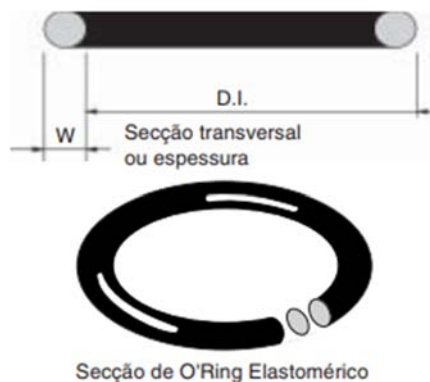
As roscas podem ter seu direcionamento da esquerda e direita e classificadas conforme o eixo do parafuso em relação a obliquidade dos filetes.

- Direita, o filete eleva-se da direita para a esquerda.
- Esquerda, o filete eleva-se da esquerda para a direita.

### 2.2.2 O'Ring

O'Ring é um componente de geometria circular, geralmente fabricado de elastômero, mas também podendo ser fabricado de outros materiais como plástico e metais, tendo como função a vedação. Seu funcionamento é bem simples, onde o elastômero é confinado e alojado de modo a se conformar e preencher as irregularidades da superfície impedindo a passagem indesejada de fluídos.

Figura 9 - O'Ring

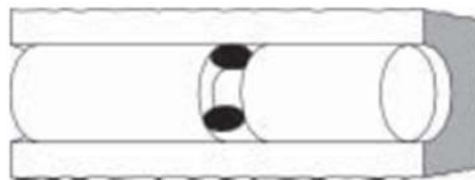


Fonte: Parker Seals (1997).

## 2.3 Princípio Básico de Vedação

A vedação utilizando o O'Ring tem como objetivo fechar a passagem e prevenir a perda ou transferência de fluido. A vedação consiste em dois elementos, o próprio O'Ring e um local adequado (canal), onde o elastômero será confinado. A figura abaixo mostra uma vedação utilizando o O'Ring:

Figura 10 - Princípio de vedação



Fonte: Parker Seals (1997).

## 2.4 Microscopia eletrônica de varredura

O microscópio eletrônico de varredura conhecido como MEV é um dos principais instrumentos para a caracterização dos materiais metálicos e semicondutores, destacando-se a observação da morfologia, constituição e distribuição das fases presentes, inclusões e trincas, discordância e maclas, espessura e profundidade de camadas superficiais.

### 2.4.1 Princípio de funcionamento

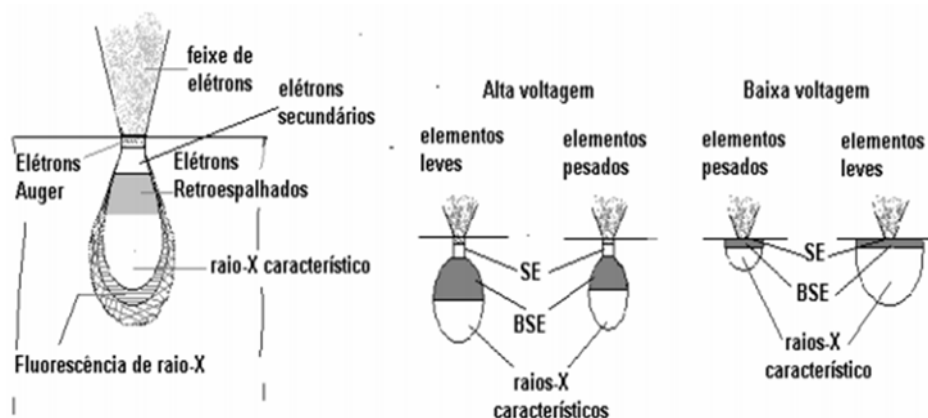
O microscópio eletrônico de varredura tem seu princípio de funcionamento em um feixe de elétrons que vasculha a superfície da amostra em todos os pontos, por linhas contínuas e transmite o sinal a uma tela catódica onde a sua varredura está impecavelmente alinhado com o feixe incidente.

A imagem do sinal é resultado da comunicação da superfície da amostra com o feixe incidente. O sinal retráido é usado para articular o brilho no monitor, assim possibilitando a observação. Através de um sistema de bobina de deflexão, o feixe pode ser encaminhado de maneira a limpar a superfície da amostra segundo uma malha retangular. Sobre a amostra o feixe é focalizado por uma série de lentes eletromagnéticas com um spot abaixo de 4 nm assim interagindo com corpo de prova gerando fótons e elétrons que podem ser captados por detectores adequados e sendo convertido em sinal de vídeo.

A incidência do feixe primário incide no corpo de prova, provocando propagação de parte dos elétrons e formando um volume de interação cujo aspecto depende basicamente da tensão de aceleração e do número atômico da amostra. Neste volume, as ondas eletromagnéticas geradas e os elétrons são utilizados para efetuar análises físico-químicas ou formar imagens. Para encontrarem as partículas ou os raios eletromagnéticos decorrentes da interação do feixe eletrônico com a amostra devem retornar a superfície e então alcançar o detector pelo qual geram a profundidade máxima de detecção de acordo com a energia com que estes raios ou partículas atingem ou são capturadas pelo aparelho.

Uma vez que a imagem decorre do acréscimo do sinal gerado de uma relação entre o feixe eletrônico logrado e o material da amostra, a partir do sinal assimilado na varredura eletrônica, esta pode apresentar diferentes aspectos e emitir inúmeros sinais pela amostra. Destes sinais, os mais usados para formação da imagem são decorrentes dos elétrons secundários ou dos elétrons retro espalhados.

Figura 11 - Volume de interação

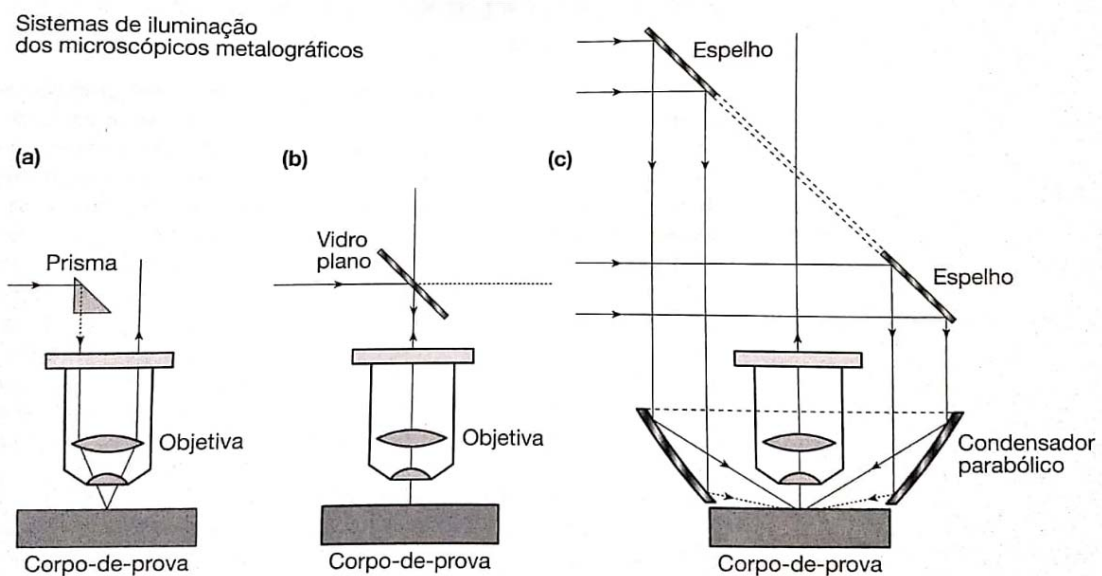


Fonte: adaptado de KESTENBACH (1994).

## 2.5 Microscopia Óptica

Existem diversos artifícios para a observação da microestrutura de ferros fundidos e dos aços, porém a mais utilizada é a microscopia óptica. Nesse processo, aplica-se uma luz visível que vem a incidir sobre a amostra de maneira a refletir até o observador conforme mostrado na figura 12:

Figura 12 - Sistemas de iluminação



Fonte: adaptado de KESTENBACH (1994).

A resolução obtida na imagem vai depender do tamanho da onda da radiação utilizada para luz visível de cor verde, que resulta em uma resolução na ordem de 220 a 250 que corresponde a um aumento de 1400 vezes. Um ponto importante é que a profundidade do foco depende do comprimento de onda da radiação empregada na observação e da distância focal das lentes empregadas. Quando se utiliza o microscópio óptico, conseqüentemente se obtém uma profundidade de foco muito pequena (de 200 nm a 8 nm), dependendo das condições de aumento, quanto maior o aumento menor é a profundidade do foco e, para que possamos observar a superfície do corpo de provas totalmente em foco, é imprescindível que ela esteja perfeitamente perpendicular ao eixo óptico do microscópio (COLPAERT 2008, p.68).

## 2.6 Tensão

De acordo com Popov (1978):

“Em geral, as forças internas que atuam áreas infinitesimais de um corte, tem magnitudes e direções variadas. Essas forças são de natureza vetorial e mantêm o equilíbrio com as forças externas aplicadas. Na mecânica dos sólidos é particularmente significativo definir a intensidade dessas forças nas várias partes do corte como a resistência e a deformação. Em geral elas variam de ponto para ponto e são inclinadas em relação ao plano do corte. É costume decompor-se essas forças em componentes paralelas e perpendiculares à seção investigada. A intensidade da força perpendicular ou normal à seção é chamada de tensão normal em um ponto. É costume referir-se a tensões normais que causam tração na superfície do corte por tensões de tração. Por outro lado, aquelas que comprimem o corte, são tensão de compressão. As demais componentes da intensidade da força agem paralelamente ao plano da área elementar. Essas componentes são chamadas de tensões de cisalhamento e designadas por  $\tau$ ”.

Segundo Shigley (2011):

“Quando alguma superfície interna é isolada, o momento e a força resultantes que procedem na superfície manifestam-se com distribuições de forças ao longo de toda a área. A distribuição de forças que atuam em um local da superfície é única e terá componentes nas direções tangencial e normal denominadas, respectivamente, tensão de cisalhamento tangencial e normal”.

Tensões normais, que atuam na direção perpendicular à seção transversal da peça, e podem ser:

- tensão de compressão  $\sigma_c(-)$
- tensão de tração  $\sigma_t(+)$

Tensões cisalhantes ou de corte  $\tau$ , que atuam tangencialmente a seção transversal. Então:

$$\sigma = \pm \frac{P}{A} \quad \text{ou} \quad \tau = \pm \frac{P}{A}$$

Equação 1: Tensão

### **2.6.1 Análise de Tensão e Deflexão**

Ao se projetar uma peça de um equipamento mecânico, para que trabalhe sem que ocorra falhas, o profissional deve em primeiro lugar identificar os prováveis modos de falha e optar por um parâmetro apropriado para que a severidade do carregamento e do meio venha ser descrita analiticamente. Além disso, deve indicar um material e uma geometria para que se obtenham características de resistência crítica pertinentes e que estão relacionadas com o possível modo de falha. Com isso, o valor do parâmetro de severidade de carregamento deve ser dimensionado sob condições de carregamento por meios apropriados e colacionado com propriedades de resistência crítica adequadas. Com o parâmetro de severidade menor que a correspondente propriedade de resistência crítica, a falha pode ser evitada, para cada modo de potencial falha (COLLINS, 2006).

Segundo o mesmo autor (COLLINS, 2006), os parâmetros de severidade de carregamento mais úteis são tensão, deformação e energia de deformação por unidade de volume, no qual a tensão é geralmente escolhida para finalidade de cálculo. Deformação e energia de deformação são frequentemente expressas em função da tensão. Em poucas palavras tensão pode ser definida como a intensidade, direção e sentido das forças internas que agem em qualquer plano de corte que ultrapassa o corpo sólido de relevância.

### **2.6.2 Padrões Comuns de Tensões**

#### **2.6.2.1 Tensão axial pura**

Se uma força axial pura  $F$  é aplicada a um componente, a tensão  $\sigma$  é uniformemente distribuída sobre a área  $A$  da superfície de corte. O módulo da tensão uniforme é:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Equação 2: Tensão Axial Pura

Quando a força é trativa,  $\sigma$  é uma tensão trativa uniformemente distribuída. Já quando a força é compressiva e a barra não flamba,  $\sigma$  é uma tensão compressiva uniformemente distribuída.

### **2.6.2.2 Tensão de Cisalhamento Devido à Torção (Centro de Cisalhamento em Flexão)**

Na flexão de uma viga gerada por um conjunto de forças coplanar, onde o plano que está contido não for um plano de simetria da viga, a flexão da viga é usualmente acompanhada pela torção da mesma. Para eliminar a torção em tais casos, o plano do conjugado de forças transversal deve ser deslocado paralelamente até que passe através do centro de cisalhamento ou centro de torção, para uma dada seção transversal. Em algumas circunstâncias, a localização do centro de cisalhamento pode ser determinada por inspeção, observando (1) se a seção transversal tem um eixo de simetria, o centro de cisalhamento deverá estar sobre este eixo, mas usualmente não estará sobre centroide; (2) se a seção transversal tem dois eixos de simetria, o centro de cisalhamento deverá estar sobre seu ponto de interseção; ou (3) se a seção transversal tem um ponto de simetria, o centro de cisalhamento deverá estar sobre o centroide (COLLINS 2006).

### **2.6.2.3 Tensão de Contato Entre Superfícies**

Quando forças são transmitidas de uma peça de um equipamento para outra através de pinos ou outros elementos de fixação, como rolamentos, dentes de engrenagens ou outros tipos de marcas, as pressões de contato superficiais são desenvolvidas nas áreas de contato entre peças acopladas.

De acordo com *H. Hertz*, “tais tensões são usualmente chamadas de tensões de contato de *Hertz*. Mesmo caso de contato entre corpos planos podem gerar uma distribuição de pressões não uniforme na região de contato e ao redor desta. Por exemplo, um contato plano entre um pequeno bloco rígido, pressionado contra um

grande corpo elástico, gera uma distribuição não-uniforme de tensões próximo às bordas do bloco.

### 2.6.3 Concentração de Tensões

Falhas em máquinas e estruturas geralmente iniciam-se em áreas de tensões locais ocasionadas por descontinuidades geométricas e microestruturais. Esses tipos de concentrações de tensões resultam com muita frequência em tensões locais, muitas vezes superiores às tensões nominais na seção resultante, calculadas sem considerar os efeitos da concentração de tensões. Uma forma de visualizar concentração de tensões associada a uma descontinuidade geométrica é pensando-se em termos de fluxo de força através de um componente submetido a cargas externas (COLLINS, 2006).

Na figura 13 a placa plana retangular de largura  $w$  e espessura  $t$  está fixada na extremidade inferior e submetida a uma força vertical total  $F$ , uniformemente distribuída ao longo da extremidade superior. Cada linha tracejada representa uma determinada quantidade da força e, dessa forma, o espaçamento local entre linhas é uma indicação de intensidade da força local ou da tensão local. Conforme a figura (13 a) as linhas estão uniformemente espaçadas através da placa e a tensão  $\sigma$  é uniforme, sendo calculada com a seguinte fórmula.

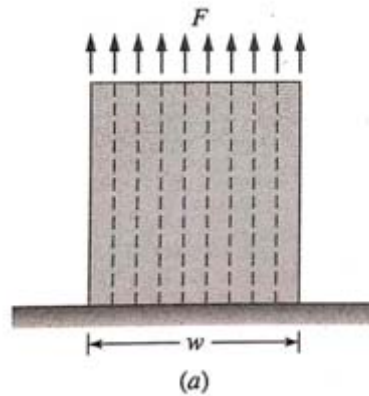
$$\sigma = \frac{F}{wt}$$

Equação 3: Concentração de tensão

Enquanto isso, na figura 14, uma placa plana retangular da mesma espessura está submetida à mesma força  $F$ , mas a placa é mais larga e tem um entalhe de modo a fornecer a mesma seção resultante com largura  $w$  na região do entalhe. As linhas de fluxo de força podem ser visualizadas de uma forma similar à forma que as linhas de corrente seriam visualizadas, no escoamento em regime permanente de um fluido através de um canal com uma obstrução com a mesma forma de seção transversal da placa. Podemos observar então que, nenhuma força pode ser suportada através do entalhe, da mesma maneira que o fluido escoando deve passar em torno da obstrução. Ao fazer isso, as linhas de fluxo de força aproximam-se localmente da raiz

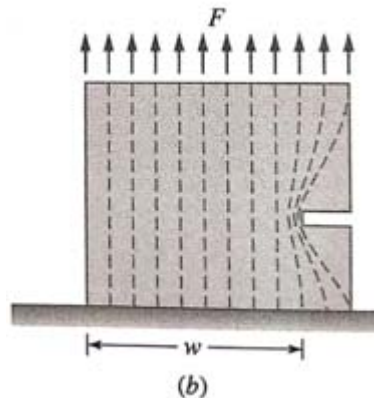
do entalhe, produzindo uma intensidade de força maior, ou de tensão na raiz do entalhe.

Figura 13 - Conceito intuitivo sem concentração de tensões



Fonte: Collins (2006).

Figura 14 - Conceito intuitivo com concentração de tensões



Fonte: Collins (2006).

## 2.7 Fatores de Concentração de Tensões à Fadiga e o Índice de Sensibilidade ao Entalhe

Ao contrário do fator de concentração de tensões teórico  $K_t$ , o fator de concentração de tensões de fadiga  $K_f$  é uma função do material, assim como do tipo de carregamento e da geometria. Para levar em conta a influência das características do material, um índice de sensibilidade ao entalhe  $q$  é definido para relacionar o efeito real de um entalhe na resistência à fadiga de um material com o efeito que pode ser

previsto tomando-se como base somente a teoria da elasticidade. A definição de índice de sensibilidade ao entalhe  $q$  é dada por:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

Equação 4: Índice de sensibilidade ao entalhe

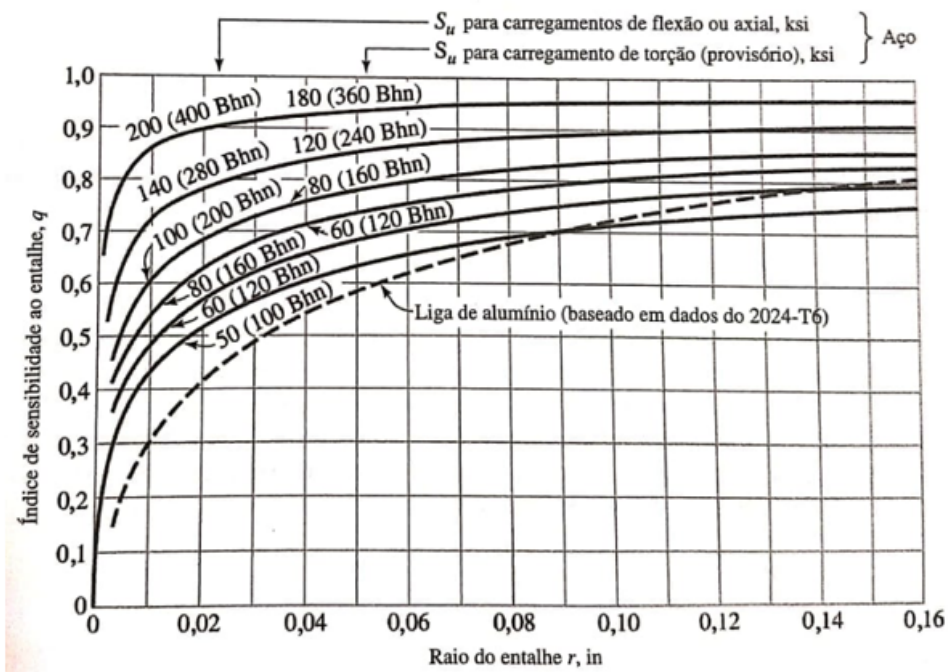
$K_f$  = fator de concentração de tensões

$K_t$  = fator de concentração de tensões teórico

$q$  = índice de sensibilidade ao entalhe válido para a faixa de fadiga de alto-ciclo

A intensidade  $q$  vai de zero, para nenhum efeito do entalhe, até a unidade, para o efeito do entalhe completo. O índice de sensibilidade ao entalhe é uma função tanto do material como do raio do entalhe, de acordo com a figura 15 para uma série de aços e uma liga de alumínio.

Figura 15 - Curvas do índice de sensibilidade ao entalhe versus raio do entalhe para uma gama de aços e uma liga de alumínio submetidos ao carregamento axial, de flexão e de torção



Fonte: Collins (2006).

Para materiais de grão mais fino, tais como aços temperados e revenidos, o valor de  $q$  é normalmente próximo à unidade. Para materiais de grão mais grosso,

como ligas de alumínio recozidas e normalizadas, o valor de  $q$  aproxima-se da unidade se o raio do entalhe exceder cerca de um quarto de polegada. Em função destes fatos, existe a tentação de recomendar-se o uso de  $K_f = K_t$  como uma hipótese simplificadora. Entretanto, fazendo-se isso, ignoram-se vários efeitos importantes de sensibilidade ao entalhe, incluindo:

- Sob carregamentos de fadiga, frequentemente observa-se que uma liga de aço com propriedades monoatômicas superiores não apresenta fadiga superiores quando comparada a aços baixo carbono comum, por causa da diferença nas sensibilidades ao entalhe.
- Existe uma tendência de se avaliar impropriamente os efeitos de pequenos riscos e cavidades, a menos que os efeitos da sensibilidade ao entalhe sejam reconhecidos.
- Sérios erros podem ser cometidos ao se aplicar os resultados de modelos a estruturas grandes, se os efeitos da sensibilidade ao entalhe não forem reconhecidos.
- Em situações críticas de projeto, ineficiências podem surgir se os efeitos da sensibilidade ao entalhe não forem considerados.

Baseado na equação de índice de sensibilidade  $q$  uma expressão para o fator de concentração de tensões de fadiga pode ser escrita como:

$$K_f = q(K_t - 1) + 1$$

Equação 5: Fator de concentração de tensões de fadiga

O fator de concentração de tensões elástico teórico  $K_t$  pode ser determinado segundo a geometria e o carregamento, através de gráficos de handbooks e o índice de sensibilidade ao entalhe  $q$  também pode ser obtido de gráficos, como o mostrado na figura 08.

## 2.8 Fator de Segurança e Fator de Projeto

O principal objetivo do projeto é livrar-se da falha de uma estrutura ou de um equipamento, prevendo e corrigindo os tipos de erros que podem ocorrer antes da

fase de construção. Identificando o modo de falha e tentando selecionar o tipo do melhor material para sua construção, prevenindo os cenários de falha provem uma base para escolha de dimensões e formas dos componentes. Já com a forma concebida, o ambiente e suas condições estabelecidas, as dimensões dos componentes podem ser determinadas assim assegurando que suas tensões e suas cargas de operações nunca passem de suas capacidades. Mas na prática, incertezas e variáveis de projeto existirão sempre em suas predições.

Carregamentos são, usualmente, variáveis e usualmente conhecidos, as resistências também são variáveis e, erroneamente conhecidas para certos tipos de falhas, os tipos de cálculos adaptam hipóteses que podem iniciar incertezas no dimensionamento, assim vale ressaltar que:

“[...] estas incertezas e variabilidades complicam claramente a tarefa de projetar. As incertezas na seleção de formas, dimensões e materiais que permitirão operação segura e confiável devem ser abordadas diretamente.”  
(COLLINS, 2006, p. 6).

Uma aproximação para a adversidade de cargas admissíveis versus a carga da perda de função é um fator de projeto determinantes, conhecido algumas vezes de método clássico. A equação 6 é fundamental pois é a equação em que  $n_d$  é conhecido como fator de projeto. Após do projeto ter sido finalizado, o fator de projeto real muda em relação das mudanças como o arredondamento de um tamanho modelo de emprego de componentes com valores em vez de usar os valores de fator de projeto. E então é denominado como fator de segurança,  $n$ . tendo a mesma descrição de projeto, entretanto, usualmente, ele muda em termos numéricos.

Shigley (2011, p. 44) diz que:

“A tensão pode variar de uma maneira não linear com a carga, usar a carga como parâmetro de perda de função provavelmente não seja conveniente. Isso é a mais comum expressão do fator de projeto em relação de resistência e uma tensão relevante.”

Portanto a equação poder ser escrita como:

$$n_d = \frac{\text{resistencia de perda de função}}{\text{tensão admissivel}} = \frac{S}{\sigma(\text{ou } \tau)}$$

Equação 6: Fator de segurança

Os valores da resistência e tensão usados na equação devem ter as mesmas unidades dimensionais. Assim, a resistência e a tensão têm que referenciar ao mesmo ponto da peça.

## **2.9 Materiais**

### **2.9.1 Seleção de Materiais**

Shigley (2011, p. 54) se refere que:

“[...] a seleção de um material para uma peça de máquina é uma das decisões mais importantes que o desenhista deve tomar”. Usualmente a escolha do material é tomada antes de estabelecerem as dimensões da peça serem definidas. Logo após escolher o processo de formação da geometria almejada, assim como o material a ser utilizado o projetista pode dar formas ao componente de maneira que o impeça de perder suas funções ou a chance que a perda de função seja em um nível mínimo aceitável.

Quando analisamos as deflexões de estabilidade, é essencial as propriedades de rigidez do material e para os cálculos das tensões num local crítico num elemento de máquina é fundamental uma comparação da resistência do material neste local com sua geometria e suas condições de uso. Esta resistência é uma peculiaridade do material descoberta por meio de ensaios e, quando indispensável, é estabelecida à geometria e à situação de uso.

A seleção de material é tão importante quanto a deflexão e a tensão das peças, mas nem sempre é baseada somente nesses fatores. Várias peças não quaisquer cargas atuando sobre elas. Elas podem existir apenas para estética ou para preencher espaços vazios no equipamento. Em outros momentos os componentes são feitos para resistir a corrosão. Também são levados em consideração os efeitos da temperatura, assim sendo muito mais importantes que a tensão e duas deformações. Assim vários outros fatores são influentes e podem alterar os meios em que o projetista pensou em primeiro momento, assim o mesmo tem que ter uma versatilidade e saber o que fazer e usar utilizando todos os seus conhecimentos a respeito de materiais e seus processos.

### **2.9.2 Dureza**

“A resistência de um material à penetração de uma ferramenta pontiaguda é denominada dureza.” (SHIGLEY, 2011, p. 62). Embora existam muitos sistemas de medição de dureza, será abordado apenas os dois mais usados.

Os ensaios de dureza Rockwell são especificados pelo padrão ASTM no método E-18, e as aferições são executadas de maneira fácil e rápida, são também simples de reproduzir e sua máquina de testes é de fácil utilização. O valor da dureza é lido exatamente em um mostrador. Na dureza de Rockwell suas escalas são denominadas por letras, A, B, C, D... etc. seus indentadores são do material de diamante, em forma de esfera com diâmetro de 1,6mm, assim suas escalas A, B, C tem cargas aplicadas sendo 60kg, 100kg ou 150kg.

Brinell é outro ensaio de dureza muito usado. Em seus ensaios, seu indentador é uma esfera, sua dureza tem seu número Hb idêntico à carga utilizada dividida pela sua área de indentação. A dureza de Brinell demanda mais tempo, pois seus resultados necessitam de ser calculados. É notável que a melhor vantagem dos dois métodos é que eles não destroem os materiais ensaiados. Os dois são justamente relacionados com a última resistência do material analisado. Assim significando que sua resistência pode, se almejado, testado durante a fabricação da peça.

### **2.9.3 Propriedades de Impacto**

Carga de impacto é quando uma força externa é empregada a uma peça ou até mesmo na estrutura se o tempo em que é aplicado for menor que o período de vibração natural dessa estrutura ou peça, ou, ela é denominada como carga estática.

O ensaio de entalhe Charpy utiliza barras com tamanhos e formas específicas para determinar a resistência e fragilidade ao impacto. Estes ensaios são úteis para comparação de materiais e na definição da fragilidade a menores temperaturas. O ensaio é executado com o corpo de prova sendo atingido por um pêndulo librado de uma altura fixa e tendo a energia absorvida, denominada valor de impacto, podendo

ser calculada a partir da extensão da oscilação depois da ocorrência da fratura, contudo é lida visor que mostra o resultado calculado.

Segundo Shigley (2011, p. 64) “O teste Charpy, na realidade, fornece dados de tenacidade sob condições dinâmicas, e não estáticas”. Assim existe uma grande chance de os dados de impacto adquiridos nos ensaios serem tão unidos da geométrica do entalhe como são da taxa de deformação.

#### **2.9.4 Fadiga**

“Podemos definir fadiga como uma redução da capacidade de carga de um elemento, por uma ruptura bem lenta do material, ocasionado pela propagação de fissuras que se formam no interior do componente.” (DA ROSA, 2002, p.223).

As principais causas da fadiga englobam processos como carregamento, descarregamento, compressão, descompressão, vibrações, aquecimento, resfriamento, decolagem e aterrissagem.

Cargas variáveis podem ser cíclicas ou não e proporcionam em alguns pontos deformação plástica que variam com o tempo, tais deformações ocasionam uma degradação progressiva que originam as trincas, a qual crescem e atingem um tamanho considerado crítico suficiente para uma ruptura final.

As falhas ocasionadas pela fadiga na maioria das vezes originam a partir de uma trinca pequena ou uma fissura do componente, geradas de elementos denominados concentradores de tensão, ou seja, devemos ter uma atenção especial a peças que serão submetidas a tensões dinâmicas para que sejam projetadas de forma a minimizar concentradores de tensões para que se possa ter uma vida útil maior do componente. Existem praticamente três estágios que são característicos de falha por fadiga, que são início ou nucleação da trinca, propagação que são conhecidas como linhas de praia e ruptura.

O primeiro estágio pode apresentar uma pequena duração, o qual as trincas estão presentes na manufatura do material ou podem ser geradas de acordo com sua utilização, no geral essas trincas só podem ser observadas com a ajuda de um microscópio. A partir do momento que a trinca se inicia ela vai aumentando de

tamanho dando origem ao processo de propagação. O segundo estágio é mais longo e na maioria das vezes acompanha toda a vida útil do componente, neste processo na região da fratura é desenvolvida uma estrutura bem parecida com marcas de praia que está ligada ao processo de propagação de trincas. O terceiro estágio ocorre a ruptura súbita do material, o momento que a fratura ocorre vai depender das características como o valor de carregamentos aplicados, tensões e material utilizado.

### **2.9.5 Efeitos da Temperatura**

“Ductilidade, resistência ou fragilidade são propriedades afetadas pela temperatura do ambiente de operação.” (SHIGLEY, 2011, p.65).

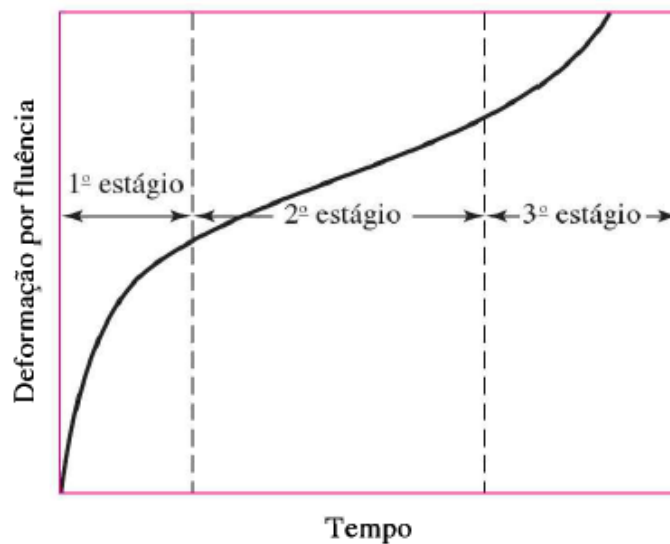
A consequência da temperatura sobre as características dos aços é demonstrada pelo diagrama resistência versus temperatura. A resistência à tração altera pouco até que a desejada temperatura seja atingida. A resistência ao escoamento, diminui sempre à medida que a temperatura ambiente é estendida. A ductilidade também sofre um aumento considerável, como seria de prever em temperaturas mais elevadas.

Durante anos existiram testes em metais ferrosos com cargas estáveis por longos ciclos em temperaturas altas. No decorrer deste tempo observou que os corpos de prova tiveram uma deformação permanente, mesmo em ocasiões onde as tensões verdadeiras são menores que a resistência de escoamento alcançada de testes de breve duração realizados em temperatura constante. A deformação constante sob uma carga é chamada de fluência.

Conforme Shigley (2011, p. 65) “Um dos ensaios mais uteis já contemplados é o de fluência de período longo sob carga constante”. Na figura 11 temos a ilustração de uma curva característica desse tipo de ensaio. Esta curvatura é alcançada a uma temperatura permanente. Usualmente, são feitos muitos testes com forças de tensão diferentes. A curva demonstra três áreas diversas. Na primeira parte está inclusa as deformações plástica e elástica. Esta parte demonstra uma taxa e fluência de maneira a baixar, em virtude de um endurecimento por má formação. O próximo estágio

demonstra que a taxa de fluência constante mínima é ocorrida por causa do resultado do recozimento. O último estágio o corpo de prova demonstra uma considerável redução na sua área, a verdadeira tensão aumenta com uma fluência maior assim levando a ruptura.

Figura 16 - Curva fluência versus tempo



Fonte: Shigley (2011).

Shigley (2011, p. 66) nos conta, que “O tratamento térmico, é utilizado para efetuar profundas mudanças nas propriedades mecânicas de um material”.

Aumento da temperatura em relação a soldagem ao arco elétrico ou a gás também faz ocorrer o aumento da temperatura ocorrendo mudanças em suas propriedades mecânicas. Estas mudanças podem ocorrer no decorrer do processo da soldagem, assim como o aquecimento; as tensões decorrentes mentem-se quando as peças perdem a temperatura. Testes de dureza podem ser realizados para exhibir se a resistência foi mudada por causa da soldagem ou não, mas estes ensaios não mostram demonstrarão a existência das tensões residuais.

### 2.9.6 Processos de Trabalho a Quente

Shigley (2011, p. 69) nos diz que “Em trabalho a quente existem os métodos como forjamento, laminação, prensagem e extrusão a quente, em que o metal é aquecido acima de sua temperatura de recristalização”.

Um dos processos de trabalho a quente é a laminação, que usualmente é usada para criar barra de material com dimensão e forma própria. Alumínio, aço, ligas de cobre e magnésio são os tipos de materiais mais identificados para barras laminadas.

A extrusão é outro procedimento de trabalho a quente, nela se aplica uma enorme pressão sobre uma barra ou uma peça de metal aquecida, assim seu escoamento é forçado através de um orifício estreito. Esse trabalho é mais usado com materiais com ponto de fusão mais baixo sendo eles o cobre, alumínio, chumbo, zinco e estanho. Aços inoxidáveis também são extrudados, porém tem seu uso limitado.

No forjamento é utilizado martelo, máquinas de forjas e prensas. Em igualdade com os outros processos, o forjamento fornece uma refinada estrutura granular ocasionando no aumento da ductilidade e resistência. Quando consideramos o mesmo peso dos materiais, os materiais forjados tem maior resistência comparados aos fundidos.

## **2.9.7 Tratamento Térmico do Aço**

Nos referimos a tratamento térmico quando os processos da temperatura são controlados pelo tempo, assim modificando as propriedades dos materiais como tenacidade, dureza e ductilidade, mas também aliviando as suas tensões residuais as operações mais comuns de tratamento térmico são: recozimento, revenido, cementação em caixa e tempera.

### **2.9.7.1 Tratamento de Recozimento**

É quando o material é trabalhado a frio ou a quente, produzem tensões residuais, também, normalmente sua dureza passa a ser maior como consequência destas operações. O recozimento de normalização e total, são processos que aquecem o material, fazendo com que o mesmo se transforme conforme o diagrama de equilíbrio. O material que vai ser recozido é esquentado a cerca de 38°C além da

temperatura crítica. Ficando nesta temperatura por um tempo limite, onde seu carbono dissolva e disperse pelo material. Após, é resfriado devagar no forno onde foi aquecido. De acordo com Shigley:

“O recozimento é utilizado para amolecer um material e torná-lo mais dúctil, assim aliviando suas tensões residuais e refinar sua estrutura granular. Se a transição for completa, então se diz que ocorreu um recozimento total”.  
(SHIGLEY, 2011, pág. 71)

### **2.9.7.2 Têmpera**

A têmpera é denominada quando a velocidade de resfriamento é controlada, assim estabelecendo a sua dureza. A tempera branda é conseguida pelo resfriamento ao ar, assim alcançando a normalização. As duas maneiras de se obter a tempera são óleo e água. A em óleo é bastante devagar, mas ela faz que não ocorram as trincas ocorridas pela expansão rápida do material tratado. Já em água é utilizada em aços carbono, de baixa liga e com médio teor de carbono.

Conforme Shigley (2011, p. 71): “A eficácia da têmpera depende do fato de que, quando resfriada a austenita, ela não se transforma instantaneamente em perlita, mas requer tempo para iniciar e completar o processo”. Assim como a sua transformação para em torno de 425°C, ela consegue ser rejeitada diminuindo sua temperatura de maneira rápida. Você obtém a martensita através da tempera, pois quando se resfria rapidamente o material para aproximadamente 205°C, a austenita se transforma em martensita. A martensita é a formação mais resistente e dura do aço, sendo uma solução sólida e excessivamente farto de carbono.

### **2.9.7.3 Revenimento**

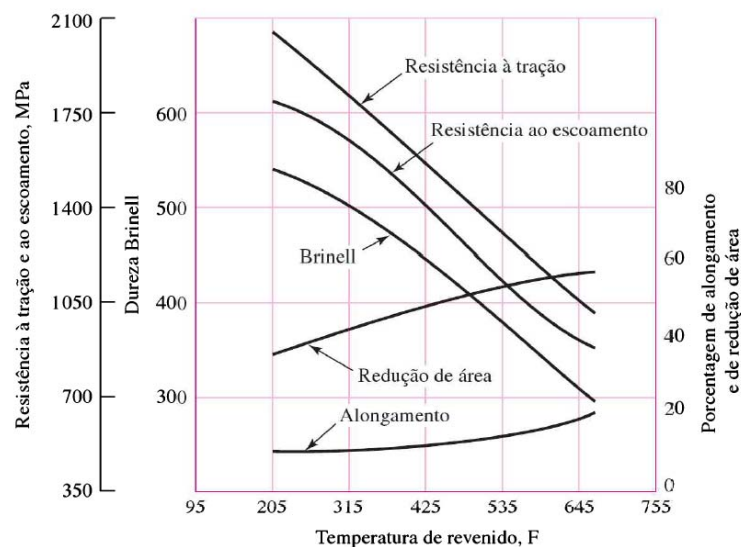
No momento em que o corpo de prova é absolutamente endurecido, ele fica muito frágil e duro, e tem altas tensões residuais. O aço não é estável, assim ele se contrai com o desgaste, isso se aumenta quando existem aplicações de cargas externas, porque as tensões influenciam na instabilidade de um material. Essas

tensões podem ser atenuadas perante a combinação de alívio de tensão e o amolecimento, conhecido como revenimento.

Em seguida ao endurecimento através da tempera em uma escala menor que a temperatura crítica, ele é aquecido novamente durante um certo tempo para então ser deixado ao ar para ser resfriado. A temperatura de seu reaquecimento vai depender do grau de dureza e da sua composição desejada. Forma-se assim os cristais de carboneto por causa da liberação de carbono da martensita. Assim fica conhecida a martensita revenida.

A conclusão do tratamento de temperatura de um aço baixa liga sobre os diferentes tipos de propriedades mecânicas, é mostrado na figura 17.

Figura 17 - Efeito do histórico termomecânico sobre as propriedades mecânicas do aço AISI 4340



Fonte: Shigley (2009).

### 2.9.8 Aços Liga

No relato de Shigley (2011, p. 73):

“Embora um aço-carbono simples seja uma liga de ferro e carbono com pequenas quantidades de silício, enxofre, manganês e fósforo, o termo aço-liga emprega-se quando um ou mais elementos além do carbono são inseridos em quantidades suficientes para alterar substancialmente suas características”.

Assim sabemos que aços liga não tem somente propriedades físicas almeçadas, mas sim dão importância para o seu tratamento térmico.

#### **2.9.8.1 Cromo**

Se adicionarmos cromo, temos como resultado a formação de carbonetos que são muito duros, embora este resultado do aço seja mais dúctil que outro de mesma formação, tendo esta diferença no trivial aumento da taxa de carbono. Faz com que a estrutura granular fique mais refinada, de maneira que a sua combinação aumente os efeitos da sua dureza e tenacidade. Conseqüentemente, o cromo é um componente muito importante para a liga.

#### **2.9.8.2 Níquel**

Se o aço tiver níquel adicionado faz também que o seu ponto eutectoide é deslocado para a esquerda, assim como o aumento do intervalo crítico de sua temperatura. Solúvel em ferrita e não tem formação de óxidos ou carbonetos, assim aumenta a resistência sem baixar a ductilidade. O níquel é regularmente usado em combinações com o cromo, para ter ductilidade e tenacidade disponíveis pelo níquel e a dureza e resistência ao desgaste pelo cromo.

#### **2.9.8.3 Manganês**

Quando se tem um aço que trabalha como agente de dessulfuração e desoxidante, porém tendo a atenção que se o valor de enxofre for pequeno e o do manganês for maior que 1%, a classificação do aço muda para liga de manganês. O manganês faz com que a região eutectoide tenha um deslocamento para a esquerda, abaixando o período crítico de temperatura.

#### **2.9.8.4 Silício**

Quando o aço funciona com agente desoxidante, o silício é acrescentado. Quando em aços de carbono de tamanho pequeno, ele transforma o material em frágil, com alta permeabilidade magnética. O silício é empregado para estabilizar carbonetos junto com outros elementos de liga, cromo vanádio, cromo e manganês.

#### **2.9.8.5 Molibdênio**

Em alguns casos é utilizado sozinho, mas em sua maioria é empregado com a combinação de cromo, níquel ou os dois. Em sua função dissolve e forma carbonetos, em ferrita, de maneira que acrescente tenacidade e dureza. Aumenta o tempo do intervalo crítico da temperatura e abaixa consideravelmente o seu ponto de transformação, sendo mais eficaz na produção das características do endurecimento ao ar e ao óleo.

#### **2.9.8.6 Vanádio**

O vanádio tem uma inclinação muito forte para a criação de carbonetos, então, ele é utilizado em pequenas proporções. É um agente bastante desoxidante e produtor de grãos finos. Ele concede ao aço um maior período de endurecimento e sua liga pode ser endurecida com uma temperatura maior. É usado em ferramentas, pois é bastante difícil amolecer um aço com vanádio por revenimento.

#### **2.9.8.7 Tungstênio**

O tungstênio também é muito utilizado em aços de ferramentas, pois sempre mantém sua dureza, mesmo aquecida a altas temperaturas. Produzindo uma estrutura fina e densa, concede dureza e tenacidade. Tem o efeito parecido com o molibdênio, defere pelo fato de quando é adicionado, é em quantidades elevadas.

## **2.10 Critério de Falha**

Qualquer tipo de alteração, seja na forma, tamanho ou em suas características de uma peça ou da máquina que a faça incapaz de realizar suas funções, devem ser avaliadas como falha mecânica. A imperfeição de uma peça ou de uma máquina em trabalhar perfeitamente pode ser causada por qualquer uma ou combinações das muitas diferentes respostas a cargas e meio ambiente, quando em serviço. Exemplificando, um erro pode ser produzido por excesso ou mínima deformação elástica. Um componente estrutural que fratura ou um pino de cisalhamento que não cisalha, quando em condições de sobre carga, cada um constitui uma falha, sendo assim:

“[...] o encadeamento de uma trinca devida a um carregamento variável, ou um meio ambiente agressivo, pode levar à falha após um período, se a deflexão excessiva resultante ou fratura da peça interferir com o funcionamento adequado”. (COLLINS, 2006, p. 18).

### **2.10.1 Métodos de Falha Mecânica**

Os métodos de falha são procedimentos efetivos que combinam ou que ocorrem para realizar a falha, as falhas mais usualmente observadas em peças e máquinas são:

“[...] escoamento, ruptura, fadiga de baixo ciclo, flambagem, choque térmico, fretagem por impacto, fadiga por fretagem, flambagem por influência, fluência, corrosão sob tensão, fadiga térmica, desgaste por fretagem, deformação elástica induzida por força e/ou temperatura, corrosão por pites, dano por hidrogênio, desgaste por atrito, lixiviação seletiva, fadiga de alto ciclo, corrosão biológica, desgaste abrasivo, corrosão por erosão, desgaste por deformação, corrosão galvânica, fadiga por impacto, fadiga por fretagem, desgaste por fadiga superficial, fadiga superficial, corrosão por cavitação, corrosão sob tensão, desgaste por contato e aderência, relaxação térmica, fadiga associada à corrosão, desgaste corrosivo, endentação, fadiga por impacto, ruptura por tensão, desgaste por impacto, corrosão associada à fadiga, corrosão intergranular, escoamento, fratura frágil, fadiga e fluência combinadas, desagregação, fratura por impacto, ruptura dúctil, corrosão por

fretagem, desgaste adesivo, dano por radiação, corrosão e desgaste”.  
(COLLINS, 2006, p. 18).

## **2.11 Utilização e Características de Uniões em Montagens de Máquinas**

Teoricamente estruturas e máquinas, pequenas e grandes, são montadas a partir de partes individuais, que são produzidas separadamente, e unidas para constituir o conjunto completo. O projetista deve ter uma atenção redobrada para suas conexões e uniões entre as partes de uma vez que elas sempre representam interrupções geométricas que propendem ao rompimento do fluxo regular de forças. As tensões nas suas uniões são aumentadas (devido a sua concentração de tensões), ou uma geometria “relevante” que deve ser empregada para precaver as altas tensões locais. Dois materiais em contato, também podem envolver interações adversas, também podem ajudar para os desalinhamentos nocivos, quase sempre consistem em potenciais locais de falha, e diversas vezes apresentam muito mais que a metade do valor da máquina, assim deve analisar que: “[...] caso a análise das uniões, projeto, e custos de montagem estejam incluídos”. (COLLINS, 2006, p. 282).

## **2.12 Modos Prováveis de Falha**

As uniões, envolvem no mínimo dois elementos, com uma área de interação entre eles, e m meio de fixação ou fixadores utilizados para mantê-los juntos (exceto para uniões móveis), a identificação dos modos prováveis de falha é mais complicada que a usual. Isto pois a falha pode ocorrer em qualquer um destes elementos perto da superfície de contato, nos componentes no meio de fixação ou nos componentes fixação, falha pode começar principalmente devido aos contatos interfaciais. A partir desta perspectiva dos modos de falha prováveis, sugere que os modos dominantes de falhas podem ser por falha por deformação plástica, fadiga em componentes, fadiga associada à corrosão, fixadores, fadiga por fretagem gerada por movimentos relativos cíclicos de pequena amplitude na interface, deformação elástica, corrosão, corrosão sob tensão, fluência, ruptura por tensão, ruptura dúctil ou fratura frágil.

### **2.13 Cargas Variáveis, Acúmulo de Dano a Vida à Fadiga**

Segundo Collins (2006, p. 192) “na engenharia moderna, cargas que se repetem, cargas rapidamente aplicadas e cargas variáveis são de longe mais comuns do que as cargas estáticas ou quase estáticas”. Além desta informação, na maioria das condições de um projeto de engenharia, as peças das máquinas estão sujeitas a cargas cíclicas ou variáveis. Estas cargas influenciam as tensões variáveis ou cíclicas que, por várias vezes, tornam-se em falha por motivo de fadiga. A fadiga é um método de falha gradativo em que envolve a inicia com uma trinca, e aumenta até esta atingir um tamanho instável, ocorrendo a divisão muita das vezes catastrófica de duas ou mais seguimentos da peça. As mudanças que ocorrem nas características dos materiais, são difíceis de detectar, e a falha por fadiga porre acontecer sem nenhum aviso prévio. Períodos de inatividade, já com a tensão de fadiga removida, não leva a nenhum tipo de melhora, ou a recuperação considerável dos efeitos da solicitação cíclica anterior. “Portanto, o dano produzido durante o processo de fadiga é cumulativo”. (COLLINS, 2006, p. 193).

### **2.14 Materiais e Procedimentos de Fabricação dos Elementos de Fixação**

Os materiais destinados para fabricação de parafusos são normalmente selecionados de acordo com de acordo as características de resistência como peso, resistência à corrosão, propriedades magnéticas, expectativa de vida, custo e temperatura de operação envolvida. O avanço é realizado a frio para diâmetros de até  $\frac{3}{4}$  in e a quente para dimensões maiores. A formação da rosca se dá geralmente por laminação entre moldes que forçam o material a se formar a frio no contorno rosqueado das ranhuras dos moldes. Geralmente as roscas são formadas por meio de laminação entre moldes com contorto rosqueado das ranhuras e que forçam a formação do material a frio. As roscas assim formadas são mais resistentes ao impacto e à fadiga do que as cortadas através do trabalho a frio, às tensões residuais (compressivas) mais favoráveis na base da rosca e a uma conformação de grãos mais favorável. Devido a essas vantagens os parafusos de alta resistência devem possuir rosca laminada. Se as roscas forem laminadas após um tratamento térmico, de modo

que o trabalho de endurecimento superficial resultante e as tensões residuais favoráveis não sejam perdidos apresentarão uma maior resistência à fadiga.

Os parafusos também são fabricados de alumínio (as ligas mais comumente utilizadas são 2024-T4, 2111-T3 e 6061-T6) latão, cobre, níquel, Monel (liga natural de níquel e cobre); Inconel (liga de níquel, cromo e ferro), aço inoxidável, titânio, berílio e diversos plásticos. Para muitas aplicações, o material do elemento de fixação deve ser considerado em consonância com os problemas de potencial corrosão associado ao ambiente e outros metais envolvidos. Além disso, revestimentos apropriados devem ser considerados para a proteção contra corrosão e para redução do desgaste e atrito da rosca.

## 2.15 Fratura

A fratura baseia-se na divisão do corpo em duas partes ou mais a uma tensão imposta que tenha natureza estática (isto é, constante ou que altera lentamente ao longo do tempo) e a temperaturas que são baixas quando comparadas a temperaturas de fusão do material. A tensão que se aplica pode ser de tração, compressão, cisalhamento ou torcional. Para assuntos na engenharia, são possíveis dois modos de fratura: dúctil e frágil. A divisão se constitui na capacidade de algum material em tentar uma deformação plástica. Os materiais dúcteis apresentam grandes absorção de energia antes da ocorrência plástica com baixa absorção de energia seguindo uma fratura frágil. Frágil e dúctil são termos relativos; se uma fratura é de um modo ou de outro, depende da situação (CALLISTER, 2000).

Uma outra propriedade mecânica importante é a ductilidade. Ela corresponde o nível de deformação plástica que a fratura suportou, e pode ser dita pela quantidade tanto como alongamento percentual como a diminuição da área percentual. A porcentagem da deformação plástica é definida como AL% no momento da fratura, ou:

$$AL\% = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

Equação 7: Alongamento percentual para deformação plástica

$l_f$  é o comprimento no momento da fratura e  $l_0$ , o comprimento útil original. Uma vez que uma proporção significativa da deformação plástica no momento da fratura está confinada à região do pescoço, a magnitude AL% dependerá do comprimento útil do corpo de prova. Quanto menor for  $l_0$ , maior será a fração do alongamento total relativa ao empescoçamento e, conseqüentemente, maior será o valor de AL%. Portanto, o valor de  $l_0$  deve ser especificado quando os valores do alongamento percentual forem citados: na maioria das vezes, ele é de 50 mm e/ou 2 polegadas. A redução da região percentual, RA%, é dita como sendo:

$$RA\% = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

Equação 8: Redução da área percentual

Onde  $A_0$  é a área original da seção reta e  $A_f$  é a área da seção reta no ponto de fratura.

## 2.16 Fratura Dúctil

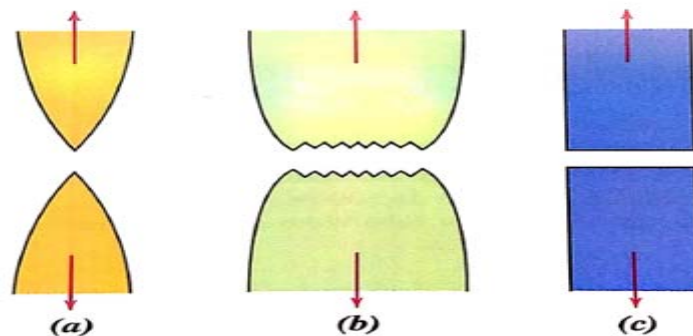
A fratura dúctil é assim caracterizada pela deformação plástica próximo de uma trinca que está crescendo. O processo continua de forma relativamente devagar à medida no qual o comprimento da trinca se prolonga. Uma trinca como está característica é usualmente chamado de estável. Isso significa que ela suporta a qualquer extensão que seja adicionada a menos que tenha um crescimento na tensão aplicada. Complementarmente, existirá a evidência de alguma deformação generalizada significativa na superfície da fratura (exemplos como: torção e fratura). Por dois motivos a fratura dúctil é frequentemente preferível:

- Quando existe o surgimento de deformação plástica é um alerta que uma fratura é iminente, deixando que medidas preventivas sejam tomadas.
- Muita energia de deformação é imposta para convencer uma fratura dúctil, visto que os materiais dúcteis são comumente mais tenazes.

Tanto no nível macroscópico como no nível microscópico, as regiões de fratura dúctil terão suas próprias características próprias diferentes. A figura (a) é vista em

metais sólidos que são macios, exemplos como: chumbo puro e o ouro puro a temperatura ambiente. Materiais altamente dúcteis empescoçam até uma fratura pontual, exibindo teoricamente uma redução de 100% na superfície. Na figura (b) indica o tipo mais usual de perfil de fratura de tração para os metais dúcteis, a fratura é entendida somente pela quantidade controlada de empescoçamento”.

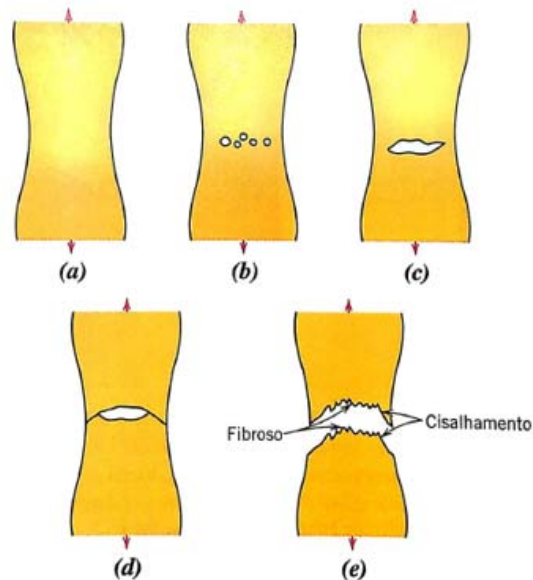
Figura 18 - (a) Fratura extremamente dúctil cuja imagem empescoça até um único ponto. (b) Fratura levemente dúctil a seguir de algum empescoçamento. (c) Fratura frágil isenta de deformação plástica.



Fonte: Callister (2000).

O processo de fratura acontece diversas vezes em diferentes etapas. Primeiro, após o empescoçamento ter iniciado, pequenas cavidades, ou microvazios se unem no interior da seção reta, conforme a figura (b). Logo após à medida que a deformação continua, os microvazios aumentam em tamanho, se juntam e coalescem para gerar uma trinca elíptica, que tenha o seu eixo bem alongado que forma o ângulo reto com à direção da tensão. A trinca continua crescendo em uma direção paralela a seu eixo principal através desse processo de coalescência de microvazios representado pela figura (c). Por fim, a fratura se sucede por uma propagação rápida de uma trinca ao redor do perímetro externo do pescoço representado pela figura (d), por deformação cisalhante em um ângulo por volta de  $45^\circ$  com o eixo de tração (este é o ângulo no qual a tensão cisalhante é máxima), (CALLISTER 2000).

Figura 19 - Estágios na fratura taça e cone. (a) Empescoçamento inicial. (b) Pequena formação de cavidades. (c) Aderência de cavidades para formar a trinca. (d) Ampliação de trinca. (e) Fratura final por cisalhamento em um ângulo de 45° em relação à direção de tração



Fonte: Callister (2000).

## 2.17 Fratura Frágil

Segundo Callister (2000, p.235) fratura frágil acontece sem que o material apresente qualquer tipo de deformação visível e através de uma rápida propagação de trinca. O sentido do movimento da trinca está próximo de ser perpendicular à direção da tensão de tração aplicada produzindo assim uma superfície de fratura plana, conforme está indicado na figura 20 a seguir:

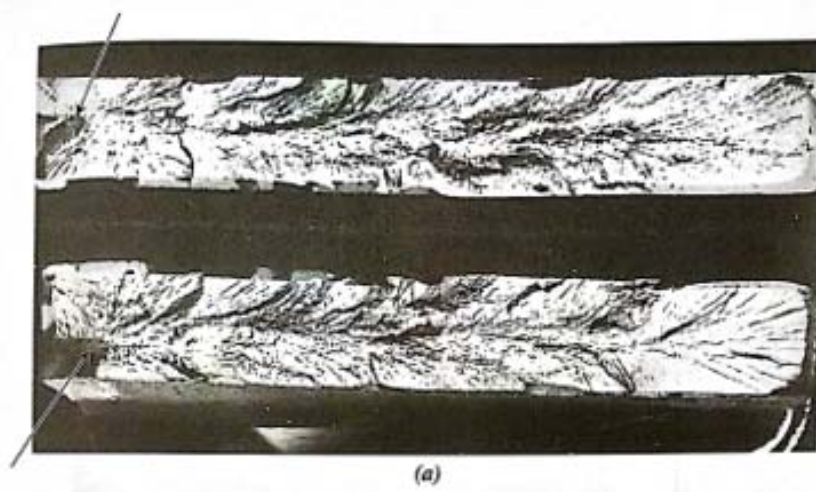
Figura 20 - Tensão aplicada em superfície de fratura relativamente plana



Fonte: Callister (2000).

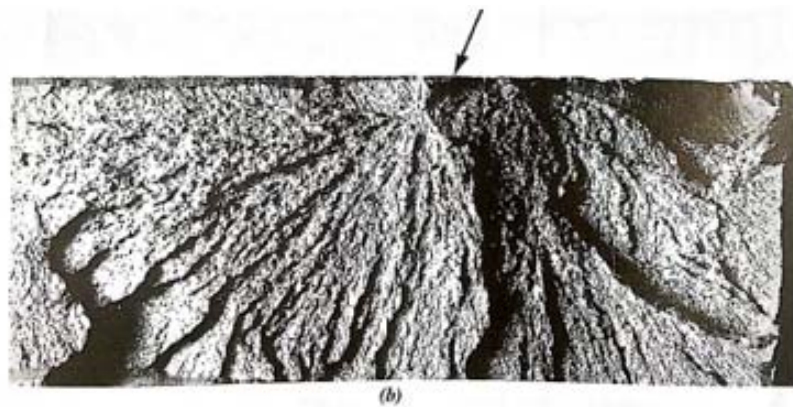
Superfícies de materiais que sofreram fratura frágil tem seus padrões de distinção, ou seja, não haverá nenhum sinal de deformação plástica. Podemos perceber em algumas peças de aço por exemplo, marcas de sargento com um formato em V formadas próximo ao centro da seção reta da fratura, a qual aponta para trás na direção do ponto onde a trinca iniciou figura 21 (a). Outras superfícies de fratura frágil possuem nervuras, linhas que se propagam do ponto de origem da trinca concordando com um padrão na forma de um leque figura 22 (b). Com frequência, ambos os padrões de marcação serão suficientemente grosseiros para serem observáveis a olho nu. Para materiais de granulação fina e com uma elevada dureza, não irá existir padrões de fratura que possam ser diferenciados. A fratura frágil que ocorre nos materiais amorfos, como cerâmica e vidro, ocasiona uma superfície brilhante e lisa.

Figura 21 - Superfície de fratura frágil



Fonte: Callister (2000).

Figura 22 – Superfície de fratura frágil



Fonte: Callister (2000).

## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Material do Parafuso**

O parafuso em análise é fabricado em aço liga, que contém em sua composição, além de ferro e carbono outros elementos tais como manganês, fósforo, enxofre, silício, níquel, cromo, titânio, nióbio, alumínio e molibdênio como mostra a análise química tabela 1 em quantidades significativas que podem alterar as propriedades mecânicas e químicas do material.

Geralmente esses materiais são utilizados para aumentar a resistência mecânica e dureza, as propriedades químicas do material são de acordo com sua utilização.

### **3.2 Classe de Resistência do Parafuso**

O parafuso M27 com classe de resistência 12.9 pode ser definido da seguinte forma:

M em maiúscula significa a métrica da rosca seguido pelo diâmetro do parafuso, ou seja, M27 defini uma rosca métrica com 27 mm de diâmetro. A classe de resistência do parafuso vem identificada em sua cabeça representada por um código. É muito importante saber interpretar, pois com esse código podemos ter ideia da classe de resistência do parafuso e do torque máximo de aperto necessário. Se o parafuso é um 12.9 o número 12 multiplicado por 100 representa o mínimo de resistência a tração por exemplo  $12 \times 100 = 1200 \text{ N/mm}^2$  e o .9 representa 90% da tração, então 90% do limite de resistência a tração encontramos o limite de escoamento 90% de 1200 é igual a  $1080 \text{ N.mm}^2$ .

Outro ponto que deve ficar bem claro é que quanto menor for a classe de resistência, conseqüentemente maior será a ductilidade do parafuso, por isso é importante se ter em mente todas essas informações para que se possa aplicar um

torque correto, porque se um torque excessivo for aplicado pode vir a espanar o fio da rosca, quebrar o parafuso ou até mesmo empenar a peça que será fixada.

### **3.3 Ensaio de Dureza**

Foi realizado o ensaio de dureza Rockwell com o Durômetro Pantec Rockwell modelo RASN-RS de dureza Rockwell normal, figura 23. Nesse tipo de ensaio a carga é aplicada por etapas, onde primeiramente foi aplicada uma pré-carga de 10 kgf para garantir um contato firme entre penetrador e a amostra, em seguida foi utilizado uma carga de 150 kgf para medir a dureza do material.

Os valores representam a dureza obtida no ensaio, HR indica que é um ensaio Rockwell e C representa a escala. Como foi utilizado um penetrador cônico de diamante a escala a ser utilizada para a leitura do resultado no mostrador do durômetro deve ser a de cor preta, caso fosse utilizado um penetrador esférico a leitura deveria ser feita na escala de cor vermelha no mostrador do equipamento.

Tabela 1 - Escala Rockwell

ESCALA DE DUREZA ROCKWELL NORMAL E APLICAÇÕES					
ESCALA	COR DA ESCALA	CARGA MAIOR	PENETRADOR	FAIXA DE UTILIZAÇÃO	CAMPO DE APLICAÇÃO
A	preta	60	diamante cone 120°	20 a 88 HRA	Carbonetos, folhas de aço com fina camada superficial endurecida
C	preta	150	diamante cone 120°	20 a 70 HRC	Aço, titânio, aços com camada endurecida profunda, materiais com HRB>100
D	preta	100	diamante cone 120°	40 a 77 HRD	Chapas finas de aço com média camada endurecida
B	vermelha	100	esfera aço 1,5875 mm	20 a 100 HRB	Ligas de cobre, aços brandos, ligas de alumínio, ferro maleável etc.
E	vermelha	100	esfera aço 3,175 mm	70 a 100 HRE	Ferro fundido, ligas de alumínio e de magnésio
F	vermelha	60	esfera aço 1,5875 mm	60 a 100 HRF	Ligas de cobre recozidas, folhas finas de metais moles
G	vermelha	150	esfera aço 1,5875 mm	30 a 94 HRG	Ferro maleável, ligas de cobre-níquel-zinco e de cobre-níquel
H	vermelha	60	esfera aço 3,175 mm	80 a 100 HRH	Alumínio, zinco, chumbo
K	vermelha	150	esfera aço 3,175 mm	40 a 100 HRK	Metais de mancais e outros muito moles ou finos

Fonte: site Rafael Mascarenhas, 2016.

Figura 23 - Durômetro de bancada Pantec Rockwell modelo RASN-RS



Fonte: Autor (2019).

### 3.4 Ensaio Metalográfico

Através da observação metalográfica consegue-se antever ou definir os comportamentos e as propriedades de uma peça metálica, conseguimos conhecer toda a estrutura deste material, os seus componentes macroestruturais ou microestruturais, assim como a morfologia e a formação destes. Procura listar toda a estrutura interna no material, com suas propriedades físicas que podem ser.

Micrografia:

“[...] consiste no exame do aspecto de uma peça ou amostra metálica, segundo uma seção plana devidamente polida e, em geral, atacada por um reativo apropriado. O aspecto, assim obtido, chama-se macroestrutura. O exame é feito à vista desarmada ou com auxílio de uma lupa”. (COLPAERT, 2008, p. 67).

Macrografia:

“[...] que examina o aspecto de uma superfície após devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio tem-se uma ideia do conjunto, referente à homogeneidade do material, a distribuição e natureza das falhas, impureza e ao processo de fabricação. (CARDOSO, 2009, p. 37).

### 3.5 Preparação do corpo de prova

O processo da macrografia engloba os seguintes estágios:

- Escolher a região da seção a ser estudada: que ficará à escolha do operador, e pelas informações que se deseja obter e por outras ponderações da peça em análise. Deve-se realizar um corte na transversal, se o seu objetivo for verificar a origem do material, a intensidade da secção, a homogeneidade e a forma de segregação, a existência de vazios, entre outros fatores, já um corte longitudinal será realizado quando necessitasse se a peça é forjada, fundida laminada, torneada, solda de barra, estampada, tratamentos térmicos, entre outros fatores.
- Ter uma superfície polida e plana no lugar escolhido; que engloba duas etapas:
  - Primeiro o corte pode ser realizado com uma serra, também podemos usar um cortador de disco abrasivo; quando estes meios não são possíveis, também podemos usar o desbaste do material.
  - Segundo inicia-se o polimento com lixa, em direção aos riscos presentes no material; conseqüentemente sempre vai passando para lixa mais fina, mudando a direção de 90° a cada troca de lixa.

Após, ataque esta superfície por um reativo químico, que é indispensável para colocar em evidência outras heterogeneidades. De acordo com a finalidade da análise e o material, podem ser usados diversos reativos.

### 3.6 Metalografia

O corpo de provas foi retirado de um parafuso M27 de classe 12.9 apresentado na figura 24, parafuso utilizado como elemento de fixação do rolamento de giro de uma *Stacker Reclaimer*.

Figura 24 - Corpo de prova



Fonte: Autor (2019).

### 3.6.1 Lixamento

Os corpos de prova para metalografia foram cortados em uma cortadora metalográfica modelo C M40 Figura 25 e embutidas em baquelite marrom, figura 26, em uma embutidora TECLAGO EM-30D, figura 27 ambas pertencentes ao laboratório de metalografia do UNIFOA. Após, foram lixadas em uma lixadeira metalográfica AROTEC (figura 28) – laboratório de metalografia do UNIFOA, obedecendo a sequência de lixamento modelo, com a utilização de lixas d'água, que vão desde o n° 400, em seguida 600, 800, 1200 até 1500, onde após cada troca de lixa, a amostra foi girada a 90° da posição anterior e lixada até que não apresentasse riscos referentes à lixa anterior.

Figura 25 - Cortadora Metalográfica Modelo C M40



Fonte: Autor (2019).

Figura 26 - Amostra embutida



Fonte: Autor (2019).

Figura 27 - Embutidora TECLAGO EM-30D



Fonte: Autor (2019).

Figura 28 - Lixadeira metalográfica AROTEC



Fonte: Autor (2019).

### 3.6.2 Polimento

Após o lixamento os corpos de provas foram polidos no mesmo equipamento, que também é politriz, com um pano de polimento de  $1\mu\text{m}$  e utilizado como abrasivo, pó de alumina de  $0,03\mu\text{m}$  dissolvido em água. As amostras foram polidas até ficarem espelhadas.

### 3.6.3 Ataque químico

Logo após o polimento, as amostras foram então atacadas com Nital 3%.

### 3.7 Microscopia Óptica

A microscopia óptica foi realizada com o auxílio do microscópio óptico da marca Opton conforme a figura 29.

Figura 29 - Microscópio Óptico



Fonte: Autor (2019).

### 3.8 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para amplificar o estudo do corpo de prova a ser analisado foi utilizado o MEV, modelo TM 3000 da HITACHI conforme figura 30, localizado no laboratório de metalografia do UNIFOA, onde foi realizado uma análise de superfície com a amostra embutida e outra análise da superfície da fratura do parafuso como apresentado na figura 31. Ambas as amostras foram retiradas do mesmo corpo de provas, parafuso M27 classe 12.9.

*Figura 30 - Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Modelo TM 3000*



Fonte: Autor (2019).

Figura 31 - Corpo de prova utilizado para análise de fratura



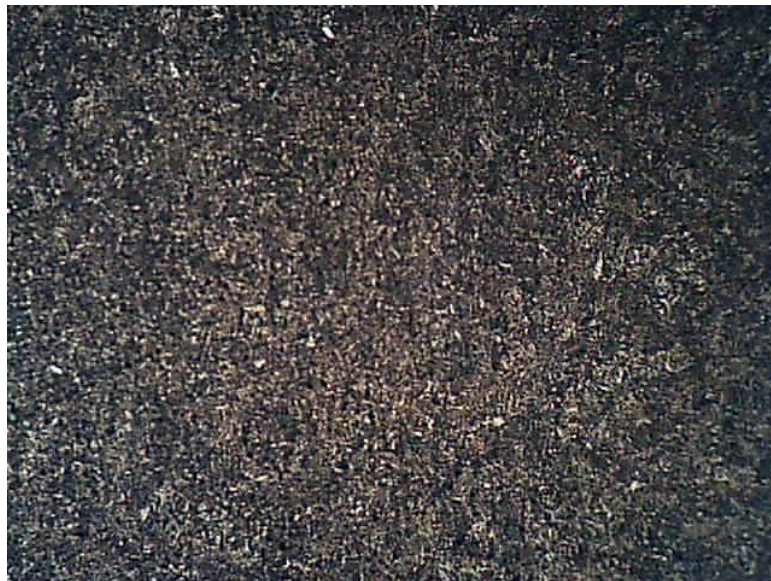
Fonte: Autor (2019).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Resultados Metalográficos

De acordo com as imagens obtidas nos ensaios metalográficos, pode-se observar a presença de martensita, resultado de um material temperado. Como esse material foi utilizado para compor os parafusos que atua como elemento de fixação do rolamento de um *Stacker Reclaimer*, fez-se necessário um material de maior dureza e alta resistência, características de um material que possui uma microestrutura martensítica, figura 33 e figura 34.

Figura 32 – Microestrutura martensítica. Aumento de 100x



Fonte: Autor (2019).

Figura 33 – Microestrutura martensítica. Aumento de 200x

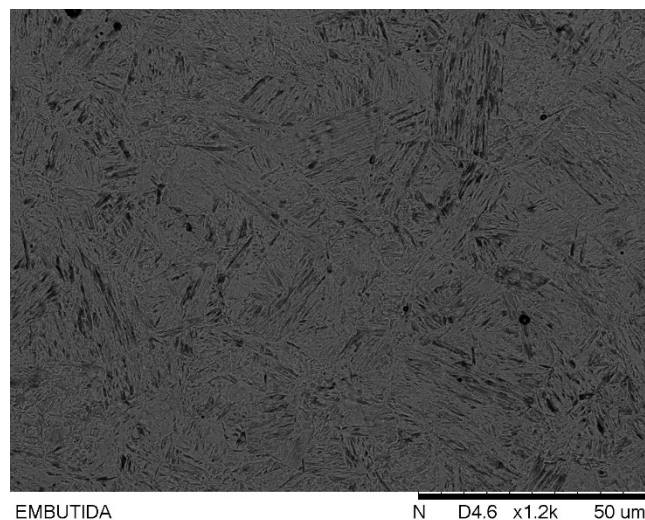


Fonte: Autor (2019).

#### 4.2 Resultados da Microscopia Eletrônica de Varredura

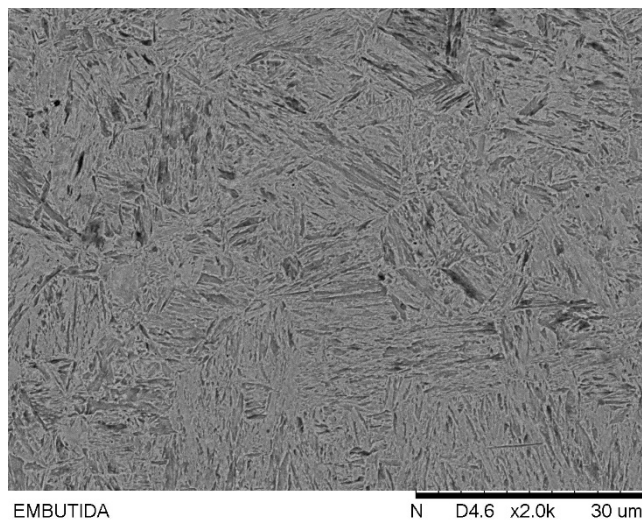
Com a análise no microscópio eletrônico de varredura, foi possível obter uma análise mais precisa da microestrutura do material. Como mostra as figuras 34 e 35.

Figura 34 – Microestrutura martensítica



Fonte: Autor (2019).

Figura 35 – Microestrutura martensítica

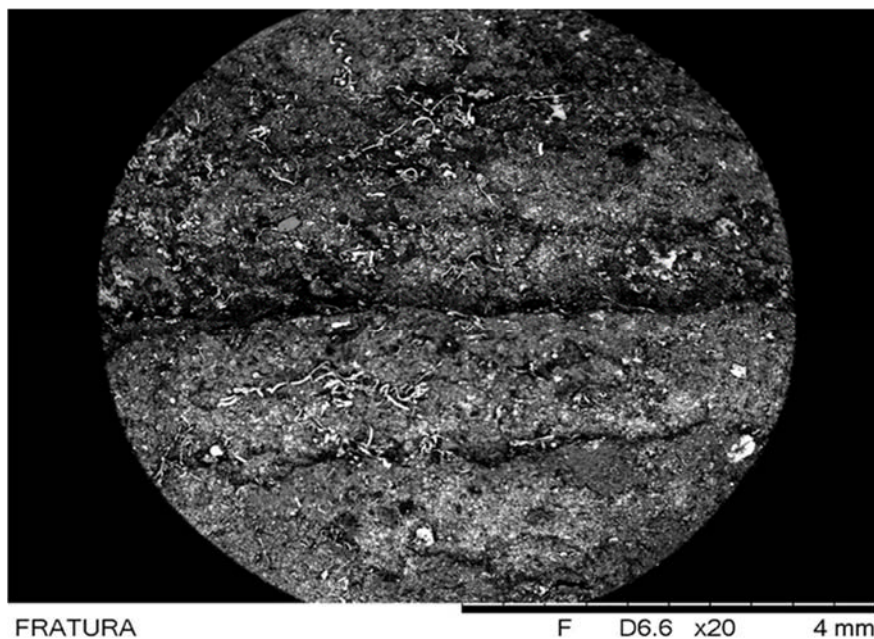


Fonte: Autor (2019).

Os resultados confirmam a microestrutura martensítica, com pequenas ripas em forma de agulhas, sendo característica da mesma.

#### 4.3 Resultado de Análise na Superfície da Fratura

Figura 36 - Superfície da fratura



Fonte: Autor (2019).

A superfície não apresentou muitas cavidades profundas e tem um aspecto regular, logo podemos perceber que o tipo de fratura é frágil, levando em conta que a

fratura frágil ocorre pela rápida propagação da trinca e sem alguma deformação plástica.

#### 4.4 Análise de Falha

Figura 37 – Superfície da fratura



Fonte: Autor 2019

É possível ver por meio das fraturas que o início e propagação se estende até uma determinada profundidade no material, a partir daí o material não resistiu mais as tensões imposta e terminou se rompendo por tração. O ponto início da trinca ocorreu no raio do filete da rosca. Não foi possível observar marcas de praia na amostra, porém é possível observar na figura um aspecto de fratura frágil no material, característica da microestrutura martensítica, figura 37.

## 4.5 Análise Química

Na tabela 2 são apresentados os resultados obtidos através da espectrografia óptica.

Tabela 2 - Composição química do Aço Liga (%p/p)

Elemento	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Ti	Nb	Al	Mo
Unidade/ identificação	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Amostra única	0,406	0,769	0,022	0,029	0,206	0,020	0,768	0,003	0,001	0,038	0,157

Fonte: Autor (2019).

Os resultados da análise por espectrometria mostram que a composição química do material baseado nas quantidades de C, P e S atende as especificações do parafuso conforme norma DIN ISO 898 classe 12.9 como mostra na tabela 3.

Tabela 3 - Composição química ISO 898

Norma	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	V	Ti
<b>DIN ISO 898</b>	<b>0,20</b>	-	-	<b>0,35</b>	<b>0,35</b>	-	-	-	-	-
<b>Classe 12.9</b>	<b>0,5</b>		<b>máx</b>	<b>máx</b>						

Fonte: Indufix (2019).

## 4.6 Dureza do Material

Foram realizados os ensaios em diversos pontos do corpo de prova, onde foram obtidos os seguintes valores conforme tabela 4:

Tabela 4 - Valores do ensaio de dureza Rockwell

<b>Ensaio de Dureza Rockwell</b>			
<b>Valor 1</b>	<b>Valor 2</b>	<b>Valor 3</b>	<b>Valor da Dureza</b>
44 HRC	42 HRC	43 HRC	43 HRC

Fonte: Autor (2019).

De acordo com os resultados obtidos o material atende as especificações solicitadas de acordo com a norma DIN ISO 898 que determina uma dureza entre 39 – 44 HRC, característica de um material Martensítico revenido.

A capacidade de um material penetrar o outro é uma das maneiras de avaliar a dureza do material, sendo possível também avaliar o grau de endurecimento através de tratamentos térmicos. O certo que material do parafuso em análise foi submetido ao tratamento de tempera e conseqüentemente teve a sua dureza elevada, no entanto tornou-se necessário aplicar o processo de revenimento para eliminar os inconvenientes e corrigir a dureza, atendendo assim o especificado em norma para a classe de resistência 12.9.

A classe de resistência do parafuso vem identificada em sua cabeça representada por um código, como o caso do parafuso em análise que é um 12.9, através desse código podemos ter ideia da classe de resistência do parafuso e do torque máximo de aperto necessário. Se o parafuso é um 12.9 o número 12 multiplicado por 100 representa o mínimo de resistência a tração por exemplo  $12 \times 100 = 1200 \text{ N/mm}^2$  e o .9 representa 90% da tração, então 90% do limite de resistência a tração encontramos o limite de escoamento 90% de 1200 é igual a  $1080 \text{ N.mm}^2$ . Os parafusos M27 que representam a classe de resistência 12.9, tendo como significado a letra M que significa a métrica da rosca seguido pelo diâmetro do parafuso, ou seja, M27 defini uma rosca métrica com 27 mm de diâmetro.

Segundo as literaturas e ensaios feitos em parafusos, quanto menor for a classe de resistência maior será a ductilidade do parafuso, tornando-se importante a aplicação do torque correto e de acordo com a classe a ser utilizada.

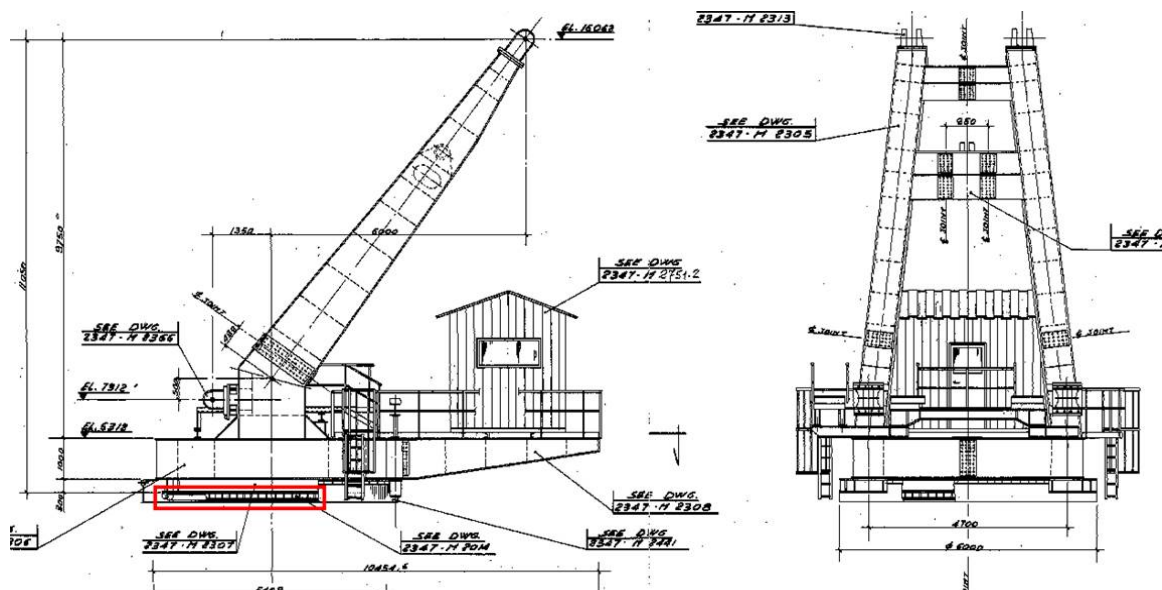
## 5 ANÁLISE DO SISTEMA

### 5.1 Análise da Estrutura do Rolamento

De acordo com o catálogo do fabricante Rothe Erde, os acionamentos de giro acionado por parafuso são compostos por rolamento de giro de rolos ou de esferas, linha de transmissão e uma carcaça totalmente fechada e vedada.

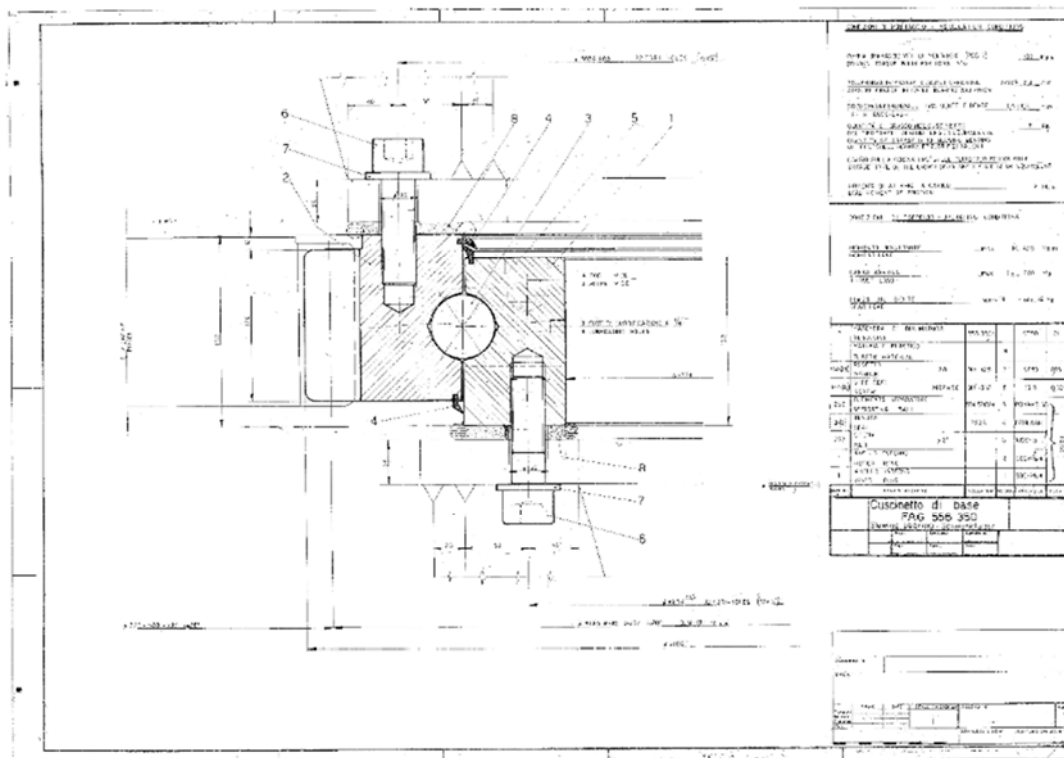
Na figura 38 ilustra onde o elemento de giro está localizado, já na figura 39 indica parte do componente de giro da máquina, onde o parafuso está localizado. Dentre os componentes há o elemento de fixação, elemento de vedação e uma chapa entre eles, de acordo com a fabricante Rothe Erde uma das maiores neste seguimento, os rolamentos de giro necessitam de uma alta rigidez no sistema, utilizando parafusos adequados e preferencialmente projetados, outro ponto importante é que momento algum cita a necessidade da utilização de elementos de vedação entre parafuso e rolamento. Nesse caso, o elemento de vedação por ser um elastômero acaba sendo esmagado devido a força aplicada no sistema evitando assim a perfeita conexão e rigidez necessária que o sistema demanda, podendo ser um dos responsáveis da fratura do parafuso.

Figura 38 – Localização do Parafusos no Sistema



Fonte: Autor 2019.

Figura 39 – Sistema Parafuso e Rolamento



Fonte: Autor (2019).

Dentre a montagem do rolamento também foi utilizada chapas de aço ASTM A36 sendo que para uma perfeita conexão entre parafuso e rolamento torna-se necessário uma chapa mais rígida, para que a mesma não sofra deformações. Essas chapas estão localizadas na parte superior e inferior do rolamento como mostra a figura 38, tendo o parafuso como elemento de fixação entre elas. A chapa é um dos componentes que recebe elevada tensão, frequentemente, solicitada a carregamentos repetitivos ao logo do tempo e, essas tensões podem resultar no dano do material. O aço ASTM A36 é um material de média resistência e propicio para projetos de grande responsabilidade, porém não se dispensa a possibilidade da troca das chapas por outras com combinação de maior resistência média e resistência a fratura, como o aço GGD SAE 4140.

## 6 CONCLUSÃO

O parafuso analisado atendeu as especificações DIN ISO classe 12.9 conforme sua identificação em termos de microestrutura, composição química e dureza. O tipo de fratura foi frágil e não foi observado marcas de praia característica de modo por fadiga, sendo assim o mesmo sofreu um esforço acima da sua capacidade de resistência.

Uma observação bastante relevante é a alteração do projeto, no desenho do projeto os parafusos especificados são parafusos do tipo M27 de classe 10.9, porém um dos parafusos fraturados submetido em análise, que operavam na máquina é de classe 12.9, ou seja já foi realizada a substituição por parafusos com maior resistência, sendo assim é provável que o problema não esteja relacionado com o parafuso já que foi substituído por um de classe de resistência maior e o mesmo veio a fraturar

Mediante tal problema é necessário que haja de imediato a substituição de todos os parafusos sem exceção, e instalar novos da mesma categoria, pois modificar o parafuso poderia não ser viável, já que ele atende as especificações e se fosse alterado teria que modificar o projeto. Visto que, o sistema operava com 72 parafusos e 24 fraturam, ou seja, os 48 restantes estão trabalhando com uma carga superior ao permitido, o que pode agravar ainda mais o problema e de forma mais rápida os que ainda restam e levar a uma série de problemas como acidentes e parada na produção.

Outro ponto importante a se levar em consideração são as chapas que é utilizada no sistema de fixação que podem ser de um material não tão rígido, e devido ao torque do parafuso e por trabalhar com uma carga muito elevada, a chapa pode vir a deformar impedindo a correta união do parafuso e rolamento, levando em conta o longo período que as chapas estão sujeita a tensões. Com isso sugerimos a substituição com melhorias de usinagem da chapa ou por uma com rigidez mais elevada, onde os parafusos serão fixados.

No momento da montagem o ideal é que se faça a fixação dos parafusos em X para uma correta união, aplicando um torque correto e uniforme em todos os parafusos, pois um torque ineficiente pode causar o afrouxamento dos parafusos devido vibrações, desgaste anormal dos componentes e vazamento das juntas, já um

torque muito elevado pode fazer com que os parafusos frature no momento do torque ou quando forem submetidos a variações de cargas.

No desenho da estrutura, figura 39, consta um O'Ring no sistema, composto por um material elastômero e de acordo com o que foi analisado não há a necessidade da utilização de um O'Ring segundo a fabricante de rolamentos Rothe Erde, pois os rolamentos de giro precisam de uma perfeita fixação e rigidez. Devido ao material ser um elastômero, quando aplicada uma força no sistema o mesmo é esmagado, perdendo sua espessura e provocando folgas podendo assim impedir a perfeita conexão parafuso e rolamento, então sugerimos a retirada do mesmo para que assim o rolamento esteja em contato direto com a chapa e garanta uma maior rigidez do sistema.

## 7 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

BUDYNAS, Richard G; NISBETT, J Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. 8. ed. São Paulo: Amgh, 2011.

A. COLLIN, Jack. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Gen Ltc, 2006.

CALLISTER JUNIOR, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência dos Materiais**. 9. ed. Rio de Janeiro: Gen Ltc, 2016.

PARKER SEALS **Manual do O'Ring**. São Paulo, 1997. Disponível em <http://www.tecnoflexpe.com.br/wpcontent/uploads/2017/02/ORings-Catálogo-5700-BR.pdf>. Acesso em 05 maio. 2019.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2008.

INDUFIX. **Composição Química**. São Paulo, 2016. Disponível em <http://www.indufix.com.br/material-apoio-tecnico-parafusos/composicao-quimica-normas-de-materiais-para-parafusos/>. Acesso em 30 abril. 2019.

Instituto Federal. **Elementos de Máquinas**. São Mateus, 2011. [http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC038/Prof.Jorge\\_Erthal/Referencia%20complementar/apostilas/Apostila%20Elementos%20de%20Maquinas%20IFES.pdf](http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC038/Prof.Jorge_Erthal/Referencia%20complementar/apostilas/Apostila%20Elementos%20de%20Maquinas%20IFES.pdf). Acesso em 20 abril. 2019.

LIMA, Alex Gutierrez de; CUNHA, Kayan Alcantara da Silva; CARVALHO, Matheus Costa. **Fadiga em Componentes Mecânicos: Estudo para Redução de Perdas**

**Econômicas e de Vidas.** 2011. 14 f. Associação Educacional Dom Bosco, São Paulo, 2011. Disponível em: <<https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos18/12326138.pdf>>. Acesso em: 30 maio. 2019.