

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ – FAG
JONAS MARTINS DA ROSA

**ANÁLISE DE FALHA POR MOMENTO TORSOR DE UM MATERIAL DE AÇO
CROMO VANÁDIO ATRAVÉS DE CÁLCULO ANALÍTICO, MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS E MÉTODOS EMPÍRICOS.**

CASCADEL
2018

JONAS MARTINS DA ROSA

**ANÁLISE DE FALHA POR MOMENTO TORSOR DE UM MATERIAL DE AÇO
CROMO VANÁDIO ATRAVÉS DE CÁLCULO ANALÍTICO, MÉTODO DE
ELEMENTOS FINITOS E MÉTODOS EMPÍRICOS.**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de conclusão de curso II, do curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz – FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

**Professor Orientador Me. Eng. Mec. Carlos
Alberto Breda**

CASCADEL

2018

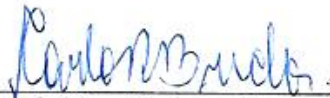
FACULDADE ASSIS GURGACZ - FAG

JONAS MARTINS DA ROSA

**ANÁLISE DE FALHA POR MOMENTO TORSOR DE UM MATERIAL DE
AÇO CROMO VANÁDIO ATRAVÉS DE CÁLCULO ANALÍTICO, METODO
DE ELEMENTOS FINITOS E METODOS EMPÍRICOS.**

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica, da FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Carlos Alberto Breda.

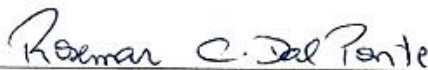
BANCA EXAMINADORA



Orientador Prof.^a Msc. Carlos Alberto Breda.
Faculdade Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico



Professor Msc. Roberson Roberto Parizotto.
Faculdade Assis Gurgacz – FAG
Engenheiro Mecânico



Professora Msc. Rosemar Cristiane Dal Ponte.
Faculdade Assis Gurgacz – FAG
Cientista da Computação

Cascavel, 06 de dezembro de 2018

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus que iluminou meu caminho nesta caminhada, também a minha família e a Engenharia Mecânica.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida.

Agradeço a minha família pelo apoio incondicional e por entender a minha ausência durante esta longa caminhada e por acreditar em minha formação.

Agradeço aos colegas e amigos que por muitas vezes involuntariamente prestaram apoio.

Agradeço a todos os professores, em especial ao colegiado de Engenharia Mecânica, Sergio Rodrigues Henrique Mota, Roberson Roberto Parizotto, Elizeu Avelino Zanella Junior, José Claudio Terra Silveira, José Sebastião Garcia, Geovane Duarte Pinheiro, Rogério Luiz Ludegero, Carlos Eduardo Goulart Ferreira.

Ao Professor orientador, Carlos Alberto Breda, pela orientação para o desenvolvimento deste trabalho e pela grande dedicação ao longo do curso de Engenharia Mecânica.

RESUMO

A falha é um evento indesejável, além de ser prejudicial ao ponto de vista econômico, podem trazer riscos aos usuários. A necessidade de se conhecer a origem da falha é importante para que essa situação não venha ocorrer no futuro. A análise de falhas utiliza diversas técnicas na investigação da causa raiz por trás da falha de uma peça ou equipamento. Com esse intuito, o presente trabalho apresenta de forma investigativa a análise de falha de um componente fraturado, utilizado em ferramenta torquímetro. A metodologia se dá através de método de cálculo analítico de resistência de materiais, método de elemento finito e ensaios laboratoriais, comparando os resultados com as normas que regem a manufatura deste componente.

Palavras-chave: Torque, adaptador de soquete, MEF.

ABSTRACT

Failure is an undesirable event, harmful to the economic point of view, may bring risks to users. The need to know the origin of the fault is important so that this situation does not occur in the future. The failure analysis uses several techniques in investigating the root cause behind the failure of a piece of equipment. To that end, this work presents investigative order to failure analysis of a fractured component, used in torque wrench tool. The methodology is based on an analytical method of calculation of materials resistance, finite element method and laboratory tests, comparing the results with the norms governing the manufacture of this component.

Key-words: Torque, coupler, FEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Componente Fraturado 1	15
Figura 2: Componente Fraturado 2	15
Figura 3: Parafuso Allen M22 x 100mm	16
Figura 4: Torquímetro de estalo 3550-20 TorcoFlex-K.....	17
Figura 5: Adaptador de soquete 12,7mm	18
Figura 6: Distorção momento de torção	24
Figura 7: Distorção momento de torção seção não circular	24
Figura 8: Diagrama fator K_T para tração	26
Figura 9: Gráfico Tensão x Deformação.....	28
Figura 10: Fratura Frágil.....	29
Figura 11: Fratura Dúctil.....	30
Figura 12: Elementos e nós MEF	31
Figura 13: Desenho dimensional conforme norma ISO 1174.....	34
Figura 14: Espessura da parede do canal da esfera.....	35
Figura 15: Desenho dimensional adaptador de soquete	36
Figura 16: Desenho 3D adaptador de soquete.....	36
Figura 17: Propriedade ASTM A231 <i>Solidworks</i> ®.....	37
Figura 18: Malha fina aplicada ao componente	37
Figura 19: Durometrô digital	38
Figura 20: Lixadeira Polipan 2.....	39
Figura 21: Microscópio metalográfico.....	40
Figura 22: Geometria do corpo referencia fator K_T	40
Figura 23: Máxima tensão cisalhante MEF	43
Figura 24: Volume com maior tensão MEF	43
Figura 25: Resultados durometrô	44
Figura 26: Resultado metalografia	45
Figura 27: Metalografia 100x - ASTM A231	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades parafuso Allen.	16
Tabela 2: Classificação dos Aços	20
Tabela 3: Composição química Aço cromo Vanádio	21
Tabela 4: Propriedades mecânicas Aço cromo Vanádio.	22
Tabela 5: Fator de relação altura e largura para torção não circular.	25
Tabela 6: Comparação resultados analíticos, MEF e Norma ISO 6791	44

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1: Valores máximos de torque	18
QUADRO 2: Tabela dimensional conforme norma ISO 1174.....	35

LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 1: Cálculo da tensão mecânica.....	23
EQUAÇÃO 2: Cálculo do momento torsor.....	23
EQUAÇÃO 3: Cálculo da tensão cisalhante não circular	25
EQUAÇÃO 4: Cálculo do ângulo de torção	25
EQUAÇÃO 5: Cálculo do fator de concentração de tensão normal	26
EQUAÇÃO 6: Cálculo do fator de concentração de tensão cisalhante	27
EQUAÇÃO 7: Cálculo do fator de concentração de tração	27

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ISO	International Organization for Standardization
DIN	Deutsches Institut für Normung
ASTM	American Society for Testing and Materials
SAE	Society of Automotive Engineers
ANSI	American Iron and Steel Institute
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
MEF	Método dos elementos finitos
σ	Tensão mecânica
F	Força
τ	Momento torsor
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão normal máxima
σ_n	Tensão normal
τ_{max}	Tensão cisalhante máxima
τ_n	Tensão cisalhante normal
α	Fator relação altura largura
T	Torque
ϕ	Ângulo de torção
η	Fator relação altura largura para ângulo de torção
G	Módulo de elasticidade ao cisalhamento
K_T	Fator de concentração tensão normal
K_C	Fator de concentração tensão cisalhante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	15
1.2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
1.2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO	15
1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	16
2.1 ANÁLISE DO CASO	16
2.2 ELEMENTO DE FIXAÇÃO	17
2.3 FERRAMENTA TORQUÍMETRO	18
2.4 ADAPTADOR SOQUETE.....	19
2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS	20
2.5.1 NORMATIZAÇÃO.....	20
2.5.2 AÇO-LIGA	20
2.5.3 AÇO-LIGA CROMO VANÁDIO.....	21
2.5.3.1 CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL.....	21
2.5.3.2 COMPOSIÇÃO	22
2.5.3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	22
2.5.3.4 OBTENÇÃO	23
2.6 TENSÃO E DEFORMAÇÃO MECÂNICA.....	23
2.6.1 TENSÃO MECÂNICA.....	23
2.6.2 MOMENTO TORÇOR	24
2.6.3 MOMENTO TORÇOR NÃO CIRCULAR	25
2.6.4 CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO	27
2.6.5 FATOR DE CONCENTRAÇÃO	27
2.7 DEFORMAÇÃO MECANICA.....	29
2.7.1 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA	29
2.7.2 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA	29
2.7.3 RUPTURA.....	30
2.7.3.1 FRATURA FRÁGIL.....	30
2.7.3.2 FRATURA DÚCTIL.....	31
2.8 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS (FEM).....	31

2.8.1 ORIGEM.....	31
2.8.2 ANÁLISE DO MÉTODO	32
2.8.3 APLICAÇÃO MEF	33
2.9 ANÁLISE TECNOLÓGICAS POR ENSAIO.....	33
2.9.1 ENSAIO DE DUREZA	33
2.9.1.1 DUREZA ROCKWELL.....	33
2.9.2 ENSAIO METALOGRÁFICO	33
2.9.2.1 LIXAMENTO.....	34
2.9.2.2 LIMPEZA	34
2.9.2.3 POLIMENTO	34
2.9.2.4 ATAQUE QUÍMICO.....	34
3 METODOLOGIA.....	35
3.1 DETERMINAÇÃO GEOMÉTRICA DO COMPONENTE.....	35
3.2 CÁLCULO ANÁLITICO DE TORÇÃO	36
3.3 MODELAGEM DO COMPONENTE	37
3.4 ANÁLISE MÉTODO ELEMENTOS FINITOS	38
3.5 ENSAIO DE DUREZA E METALOGRÁFICO.....	39
3.5.1 ENSAIO DE DUREZA.....	39
3.5.2 ENSAIO METALOGRÁFICO	39
3.5.2.1 LIXAMENTO.....	39
3.5.2.2 POLIMENTO	40
3.5.2.3 ATAQUE QUÍMICO	40
3.5.2.4 ANÁLISE MICROSCÓPICA	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 CÁLCULO ANALÍTICO DE TORÇÃO	41
4.2 ANÁLISE MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS	43
4.3 COMPARAÇÃO RESULTADOS ANALÍTICOS, MEF E NORMA.....	45
4.4 RESULTADO ENSAIO DE DUREZA	45
4.5 COMPARAÇÃO ENSAIO METALOGRÁFICO	46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	47
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	48
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

A ferramenta é a prova que o homem iniciou sua evolução há pelo menos dois milhões de anos. Desde o tempo Paleolítico (idade da pedra) o homem produz suas próprias ferramentas que os auxiliaram nas mais diversas tarefas.

Entretanto, na história das ferramentas, o homem consegue dar um gigantesco passo á cerca de mil e duzentos anos com o domínio da técnica de fusão e tratamento do ferro. Este avanço proporcionou o uso de diversas ligas, com as mais diferentes propriedades e usabilidades.

O aço cromo vanádio é um tipo especial de aço formado por diferentes ligas. Suas propriedades físicas, químicas e mecânicas lhe permite ser utilizado na fabricação de ferramentas, molas de alto diâmetro e outras aplicações que necessitam de altas tensões. O aço cromo vanádio é padronizado na nomenclatura industrial internacional como ASTM A-231 e possui similaridade e equivalência com outros tipos de ligas.

A grande maioria das ferramentas manuais é fabricada em aço cromo vanádio, inclusive o torquímetro e seus componentes intercambiáveis como soquetes e adaptadores de soquetes.

O presente trabalho aborda um estudo de caso, uma análise investigativa de falha por cisalhamento ocorrido em um componente de interligação entre o torquímetro e o soquete de aperto. Esta análise será efetuada através de cálculos analíticos, métodos de elementos finitos e métodos empíricos por meio de ensaios de dureza e metalografia.

1.1 JUSTIFICATIVA

A não conformidade em materiais e o mau uso ferramentas geram paradas e gastos desnecessários, além de riscos aos usuários. Analisar de forma científica a falha ocorrida em um material específico e poder comprovar através de engenharia investigativa e pericial se ocorreu um erro operacional ou imperfeição do material analisado.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a resistência á torção de uma peça com material específico através de cálculos analíticos e estudo pelo método dos elementos finitos, comparando os resultados. Verificar através de ensaios de laboratório o componente fraturado e comparar os resultados com normas e literatura existente.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter resultados através de cálculos de deformação por torção;
- Elaborar um modelo tridimensional idêntica à fraturada, através de um software CAD específico;
- Executar análise por meio de elementos finitos do modelo tridimensional;
- Preparar a peça fraturada como corpo de prova;
- Realizar teste de Dureza HCR;
- Realizar análise metalográfica;
- Comparar dureza do corpo de prova com a norma ASTM A231 e equivalentes;
- Comparar os resultados entre norma, cálculo analítico e análise computacional.

1.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O estudo delimita-se na geometria e material em que é fabricado o componente fraturado e sua aplicação no estudo do caso. A análise laboratorial conta apenas com a amostra que sofreu a fratura.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANÁLISE DO CASO

O caso, fonte do estudo, ocorreu em um fabricante de equipamentos agroindustriais, localizada em Cascavel no oeste do Paraná. Por questão de sigilo esta será denominada de empresa X.

Durante o processo de fixação de um conjunto aparafusado, foi utilizado ferramenta torquímetro e parafusos do tipo Allen, figura 3. Ao executar o processo de aperto foi constatada a falha e consequentemente quebra do adaptador de soquete, representada nas figuras 1 e 2.



Figura 1: Componente Fraturado 1.

Fonte: Elaborada pelo autor



Figura 2: Componente Fraturado 2.

Fonte: Elaborada pelo autor

2.2 ELEMENTO DE FIXAÇÃO

O elemento de fixação utilizado na interligação aparafusada é um parafuso do tipo cabeça cilíndrica com sextavado interno (Allen) figura 3, fixado diretamente na estrutura do equipamento. O parafuso possui diâmetro nominal de Ø22mm e comprimento de 100mm, rosca parcial e classe de resistência 12.9 conforme norma DIN 912/ ISO 4762, apresentada na tabela 1.

Tabela 1: Propriedades parafuso Allen.

Parafuso cabeça cilíndrica com sextavado interno (DIN 912 / ISO 4762)	
Diâmetro nominal	22mm
Tipo de rosca	Métrico
Passo da rosca	2,5mm
Resistência à tração	1220N/mm ²
Limite de escoamento	1098N/mm ²
Torque de aperto	937,5N/m
Tensão	234378N

Fonte: DIN 912 (1983).



Figura 3: Parafuso Allen M22 x 100mm.

Fonte: CISER (2008)

2.3 FERRAMENTA TORQUÍMETRO

Segundo (ERJAVEC 2009) o torquímetro ou chave dinamométrica é uma ferramenta de precisão utilizada para ajustar o torque de aperto em porcas e parafusos. Normalmente possui forma de alavanca e adaptador e porta soquetes para diversas medidas.

O torquímetro possui dispositivo que possibilita o ajuste do torque de acordo com o necessário especificado em norma ou projeto sem correr o risco de danificar o material. Quando a força necessária é aplicada, o dispositivo emite algum tipo de aviso para o operador sustar a operação. Existem vários tipos de torquímetros com diferentes sistemas de aviso.

O equipamento utilizado na empresa X, é um torquímetro do tipo estalo, modelo 3550-20 TorcoFlex-K fabricado pela empresa *Gedore* com capacidade de aperto entre 20 á 200Nm com precisão de $\pm 3\%$, possui acionamento automático e de curto caminho, tátil (vibração) e sinal sonoro. Para encaixe de ferramentas possui adaptador de soquete tamanho 12,7mm, figura 4 (Gedore 2018).



Figura 4: Torquímetro de estalo 3550-20 TorcoFlex-K.

Fonte: GEDORE (2018).

2.4 ADAPTADOR DE SOQUETE

O adaptador de soquete ou quadrado de encaixe é o componente de interligação entre a catraca do torquímetro e o soquete. Este acessório tem a função de transferir o torque aplicado no torquímetro para os intercambiáveis soquetes, ilustrado na figura 5.

Este componente possui travamento através de esferas conforme norma ISO 1174. O adaptador de soquete é fabricado em aço cromo vanádio (ASTM A231) e suas dimensões estão diretamente ligadas à capacidade de torque máximo do torquímetro conforme a norma ISO 6791, quadro 1 (Gedore 2018).



Figura 5: Adaptador de soquete 12,7mm.

Fonte: GEDORE (2018)

Quadro 1: Valores máximos de torque.

Square output drive nominal size ^a	Hexagonal output drive nominal size ^b	Maximum torque value N·m
—	3	4
—	4	10
—	5,5	25
6,3	6,3	30
—	8	70
10	—	135
—	11,2	200
12,5	12,5	340
20	—	1 000
25	—	2 100
^a Dimensions in accordance with ISO 1174-1.		
^b Dimensions in accordance with ISO 1173.		

Fonte: ISO 6791 (2017)

2.5 CLASSIFICAÇÃO DOS AÇOS

2.5.1 NORMATIZAÇÃO

Os aços podem ser classificados de diversas formas, como por exemplo: a forma do produto semiacabado, pelo procedimento de desoxidação e pela composição química, ou seja, pelo teor de carbono ou pelo teor de elemento de liga que o aço possui.

A gama de aços existentes é muito extensa, pois além dos aços simples com teor variável de carbono, é muito grande a quantidade de aços ligados. Para facilitar sua seleção as associações especializadas classificam os aços pela sua composição química, dando origem aos sistemas SAE (*Society of Automotive Engineers - EUA*); ANSI (*American Iron and Steel Institute- EUA*); DIN (*Deutsches Institut für Normung - Alemanha*) e ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

O sistema brasileiro ABNT baseia-se na norma americana SAE. Nesse sistema, os vários tipos de aço até 1% de carbono, com os elementos comuns como: manganês, silício, fósforo e enxofre ou com a presença de elementos de liga em baixo teor são identificados por quatro algarismos, sendo que os dois últimos correspondem o teor de carbono médio e os dois primeiros indicam a presença ou não de elementos de liga. Sendo assim, os aços-carbono são identificados pelo algarismos iniciais 1 e 0, o que for diferente desta numeração inicial indica um novo aço com presença de outros elementos de liga não comuns (CHIAVERINI 1986).

2.5.2 AÇO- LIGA

Segundo (CHIAVERINI 1986), a introdução de outros elementos se dá quando é desejado promover mudanças microestruturais que, por sua vez, promovem mudanças nas propriedades físicas e mecânicas, permitindo que o material possa alcançar efeitos específicos, como: aumento da dureza, resistência mecânica, resistência à corrosão, resistência ao desgaste, redução de peso e melhorar as propriedades elétricas e magnéticas.

Os aços-liga são designados de acordo com o elemento predominante, podendo ser: níquel, cromo, manganês, tungstênio, molibdênio, vanádio silício, cobalto e alumínio. De acordo com a ABNT os aços-liga também são identificados por uma serie de algarismos, onde os dois primeiros indicam os elementos de liga predominantes nos aços, como por exemplo, o aço ABNT 4150 que possui 0,50% de carbono e cromo molibdênio em sua liga, tabela 2.

Por apresentarem propriedades distintas e abrangentes, os aços-liga podem ser encontrados em todos os seguimentos industriais, desde indústria naval, petrolífera, aeronáutica, automobilística e civil (CHIAVERINI 1986).

Tabela 2: Classificação dos Aços

TIPO	CLASSE	DESIGNAÇÃO	TEOR APROXIMADO DE ELEMENTOS (%)
AÇOS-CARBONO	10XX	CARBONO	Mn - máximo 1,00%
	11XX	RESSULFURADO	--
	12XX	RESSULFURADO E REFOSFATADO	--
	14XX	AÇO COM ADIÇÃO DE NIÓBIO	Nb 0,10%
	15XX	CARBONO	Mn entre 1,00 e 1,65%
AÇOS-LIGA	13XX	MANGANÊS	Mn - 1,75%
	23XX	NÍQUEL	Ni-3,5%
	31XX	NÍQUEL-CROMO	Ni - 1,25% e Cr-0,65%
	41XX	CROMO-MOLIBIDÊNIO	Cr entre 0,60 e 0,95%
	43XX	CROMO-NÍQUEL-MOLIBIDÊNIO	Ni-1,8% Cr-0,50% Mo-0,25%
	50XX	CROMO	Cr entre 0,27 e 0,65%
	61XX	CROMO-VANÁDIO	Cr- 0,50 V 0,15
	86XX	CROMO-NÍQUEL-MOLIBIDÊNIO	Cr-0,50% Ni-0,55% Mo-0,20%
	92XX	SILÍCIO	Si-2,00% Mn-0,85%

Fonte: CHIAVERINI (2005)

2.5.3 AÇO-LIGA CROMO VANÁDIO

2.5.3.1 CARACTERÍSTICAS

O aço cromo vanádio é um tipo de aço-liga especial, que possui em sua composição a combinação de varias outras ligas. Este aço é normatizado pela norma ANSI, e classificado como ASTM A-231 que possui equivalência com o aço ABNT 6150. As propriedades físicas, químicas e mecânicas deste aço lhe atribuem características específicas de tolerância à cargas, resistência

à corrosão e um aumento significativo de dureza. Por sua característica específica esse aço é comumente utilizado na fabricação de ferramentas, fios de molas de grandes diâmetros e outras aplicações que exigem grande tensão (CHIAVERINI 1986).

2.5.3.2 COMPOSIÇÃO

A composição do aço cromo vanádio é constituída de uma grande quantidade de cromo (Cr) cerca de 0,8% e 1,10%, e aproximadamente 0,18% de vanádio (V) com 0,9% de manganês (Mn). Outras substancias encontradas nesta liga incluem 0,5% de carbono (C), 0,3% de silício (Si) e traços de outros metais, tabela 3 (SILVA 1988).

Tabela 3: Composição química Aço cromo Vanádio

ELEMENTO QUIMICO	CONCENTRAÇÃO (%)
CARBONO (C)	0,48-0,53
CROMO (Cr)	0,80-1,10
ENXOFRE (S)	0,040 (Máx)
FÓSFORO (P)	0,040 (Máx)
MANGANÊS (Mn)	0,70-0,90
SILÍCIO (Si)	0,15- 0,30
VANÁDIO (V)	0,15 (Min)
FERRO (Fe)	RESTANTE

Fonte: ASTM A 231/A 231M (2002)

2.5.3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS

O aço cromo vanádio possui alta resistência á fadiga e desgaste. Seu índice de dureza dentro da escala Rockwell varia entre 41-55HRC, sua força de tensão mínima ou resistência à tração é particularmente alta se comparada a outras ligas, e está normalmente entre 1500 e 2000Mpa. O módulo de torção, responsável por avaliar a rigidez do material é de 80000Mpa, tabela 4 (ASTM-A231 2002).

Tabela 4: Propriedades mecânicas Aço cromo Vanádio.

LIMITE DE ESCOAMENTO (Mpa)	415
RESISTENCIA Á TRAÇÃO (Mpa)	2000
MÓDULO DE ELASTICIDADE (Mpa)	200000
MODULO DE TORÇÃO (Mpa)	80000
DUREZA ROCKWELL (HRC)	41-55
DUREZA BRINELL	190
PESO ESPECIFICO (Kg/m ³)	7800

Fonte: ASTM A 231/A 231M (2002)

2.5.3.4 OBTENÇÃO

O vanádio (V) não é um ferro em estado nativo, este material está presente em cerca de 65 minerais diferentes como: petróleo, carvão, patrolita, bauxita, carnotita, vanadinita e também pode ser encontrado em minérios de ferro e rochas vulcânicas. A maior parte das reservas do elemento vanádio (V) está localizado na Rússia, China e África do Sul.

O cromo (Cr) em estado natural encontra-se combinado com o oxigênio no óxido de cromo. Sua obtenção é feita à partir da cromita Fe (CrO₂), aquecendo em presença de alumínio ou silício. Cerca de metade da extração mundial da cromita estão localizada na África do Sul, Índia, Turquia e Cazaquistão (SILVA 1988).

2.6 TENSÃO E DEFORMAÇÃO MECÂNICA

2.6.1 TENSÃO MECÂNICA

Segundo (JOHNSTON 1989), a tensão mecânica é o valor de distribuição de forças por unidade de área. E esta pode ser representada por σ (sigma) e é dada pela relação:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Onde:

σ : Tensão mecânica (MPa)

F: Força (N)

A: Área (m²)

Conforme acrescenta (HIBBELER 2004) a tensão é uma medida de intensidade de forças agindo em uma secção transversal de um corpo material deformável, podendo variar em relação ao ponto de inércia do objeto ou a sua reação de apoio. Deste modo, as tensões mecânicas podem ser classificadas das seguintes formas:

- Tração
- Compressão
- Cisalhamento
- Flexão
- Torção

2.6.2 MOMENTO TORÇOR

Segundo (HIBBELER 2004), o momento de torção é uma tensão atuada pela aplicação do torque. Este esforço tende a torcer o elemento em torno de seu eixo longitudinal gerando tensões de cisalhamento e é expressa pela seguinte relação:

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (2)$$

Onde:

τ : momento torsor (MPa)

T: torque (N.m)

r: raio (mm)

j: momento de inércia polar (mm⁴)

A distorção do momento de torção pode ser representada pela figura 6.

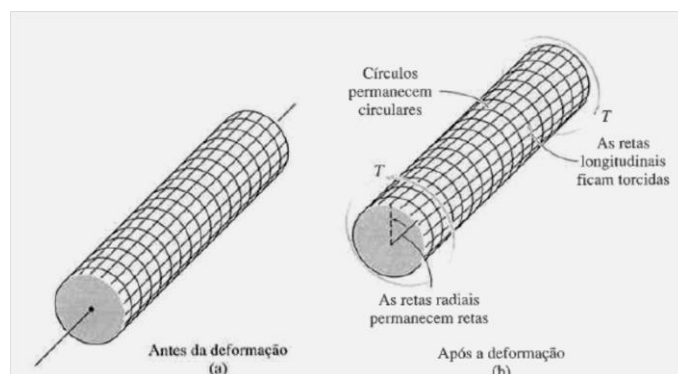


Figura 6: Distorção momento de torção.

Fonte: JOHNSTON (1989).

2.6.3 MOMENTO TORÇOR NÃO CIRCULAR

De acordo com (JOHNSTON 1989), as barras de seção retangular não seguem o mesmo raciocínio de distribuição de tensões. Em um perfil circular, a tensão cisalhante varia de forma linear a partir do centro a seção, e em um perfil retangular o valor máximo de tensão ocorre ao centro da maior fase do perfil que é o ponto externo mais próximo do centro da peça conforme figura 7.

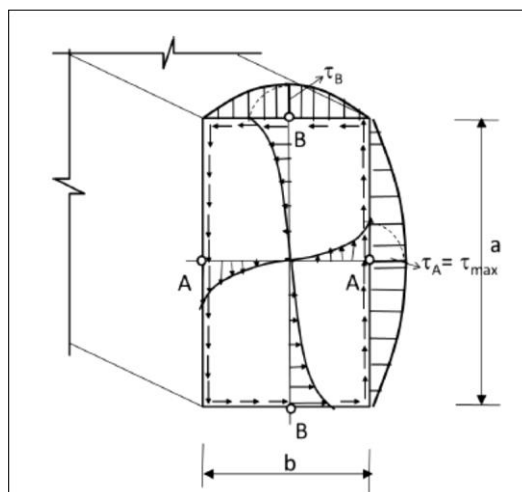


Figura 7: Distorção momento de torção seção não circular.

Fonte: JOHNSTON (1989).

A tensão cisalhante máxima exercida em seções não circulares submetida à torção é dada pela relação 3.

$$\tau_{max} = \frac{T}{\alpha \cdot a \cdot b^2} \quad (3)$$

Onde:

τ_{max} : Tensão cisalhante máxima (MPa)

T: torque (N.m)

α : fator relação altura largura (adimensional)

a: altura (mm)

b: largura (mm)

O ângulo de torção de uma seção não circular é dado pela seguinte expressão 4.

$$\phi = \frac{TL}{\eta \cdot ab^3 \cdot G} \quad (4)$$

Onde:

Φ : ângulo de torção (rad)

T: torque (N.m)

L: comprimento (mm)

η : fator relação altura largura para ângulo de torção (adimensional)

G: módulo de elasticidade ao cisalhamento (GPa)

Os valores de α e η representam uma relação entre largura e altura do perfil, são validos somente se a divisão de a sobre b for maior ou igual a 1, conforme tabela 5.

Tabela 5: Fator de relação altura e largura para torção não circular.

a/b	1	1,5	1,75	2	2,5	3	4	6	8	10	∞
α	0,208	0,231	0,239	0,246	0,258	0,267	0,282	0,298	0,307	0,312	0,333
η	0,140	0,166	0,195	0,229	0,249	0,263	0,281	0,297	0,307	0,312	0,333

Fonte: JOHNSTON (1989).

2.6.4 CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Segundo afirma (PILKEY 2007), um objeto é mais resistente quando as tensões aplicadas a ele são transmitidas uniformemente. As concentrações de tensões são todas as mudanças no campo das tensões causadas por descontinuidades ou mudanças de seção existentes no objeto como: furos, entalhes, rasgos de chaveta, ranhuras, etc.

Essa descontinuidade pode causar deformações no objeto ou a falha do mesmo tendo em vista a propagação de trincas que podem ocorrer em torno destes concentradores.

Toda concentração de tensão pode ser avaliada pelo tipo de tensão que esta sendo aplicada juntamente com a geometria do objeto e do formato da descontinuidade. Para cada tipo de geometria e tensões é adotado o fator de concentração de tensão teórico (BUDYNAS 2011).

2.6.5 FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO

Os fatores de concentração de tensão são utilizados para simplificar a análise complexa de tensão, esses fatores são obtidos a partir de técnicas experimentais ou por meio de método dos elementos finitos.

Conforme cita (PILKEY 2007), fator de concentração é definido pela razão máxima de tensão no segmento descontinuo e a tensão nominal que lá atua sem a concentração de tensão, essa relação é dada pelas expressões 5 e 6. Em que K_T é usado para as tensões normais e K_C , para as tensões cisalhantes.

$$K_T = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_n} \quad (5)$$

Onde:

K_T : fator de concentração tensão normal (adimensional)

$\sigma_{m\acute{a}x}$: tensão normal máxima (MPa)

σ_n : tensão normal (MPa)

$$K_C = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\tau_n} \quad (6)$$

Onde:

K_C : fator de concentração tensão cisalhante

$\tau_{m\acute{a}x}$: tensão cisalhante máxima (MPa)

τ_n : tensão cisalhante normal (MPa)

Os fatores de concentração K_T e K_C são normalmente fornecidos através de gráficos disponíveis em literatura própria. Em caso que ocorra a falta de diagramas específicos, é recomendada uma fórmula geral ou com base no gráfico de tração conforme figura 8, com decréscimo de 20% para os casos de flexão e 25% para os casos de torção (MORAES 1978).

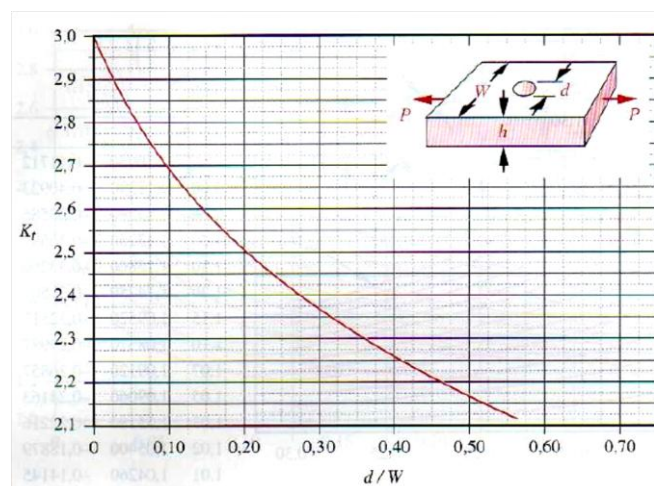


Figura 8: Diagrama fator K_T para tração.

Fonte: BUDYNAS (2011).

A relação geral do fator de concentração K_T aplicado ao esforço de tração é dada pela expressão 7.

$$K_T = 3,00 - 3,13 \left(\frac{d}{w} \right) + 3,66 \left(\frac{d}{w} \right)^2 - 1,53 \left(\frac{d}{w} \right)^3 \quad (7)$$

Onde:

K_T : fator de concentração tensão normal (adimensional)

d: diâmetro da seção (mm)

w: largura da seção (mm)

2.7 DEFORMAÇÃO MECÂNICA

De acordo com (HIBBELER 2004) as deformações em um objeto rígido, são mudanças ou desvios em sua forma geométrica que possa causar variação ou ruptura de sua forma originária. Essa distorção ocorre através de ações externas como, tensões ou variações térmicas. As deformações por tensão são classificadas em três tipos: deformação elástica, deformação plástica e de ruptura.

2.7.1 DEFORMAÇÃO ELÁSTICA

A deformação elástica ou transitória é uma distorção não permanente, significa que a carga aplicada é liberada e a peça retorna a forma original não ocorrendo deslocamento em átomos ou moléculas (CALLISTER 2012).

2.7.2 DEFORMAÇÃO PLÁSTICA

De acordo com (CALLISTER 2012) a deformação plástica é o regime em que ocorre a mudança dimensional permanente em que o corpo não retorna ao estado original. Essa deformação ocorre quando a tensão a que o corpo esta submetido ultrapassa os limites de deformação elástica causando um deslocamento dos átomos e moléculas para novas posições no reticulado, representado graficamente pela figura 9.

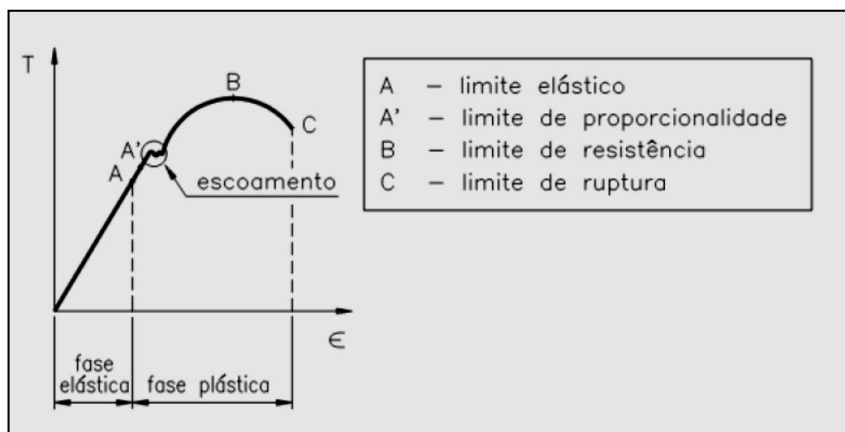


Figura 9: Gráfico Tensão x Deformação.

Fonte: JOHNSTON (1989).

2.7.3 RUPTURA

A ruptura ou fratura é a separação de um corpo em duas partes ou mais diante a ação de uma tensão. Essa ruptura pode ocorrer pela tensão estática que varia lentamente ao longo do tempo, pode ocorrer devido à fadiga quando é imposta tensões cíclicas, ou fluência, quando o corpo está sujeito a temperaturas elevadas. As fraturas são classificadas em dois tipos: fratura frágil e dúctil (CALLISTER 2012).

2.7.3.1 FRATURA FRÁGIL

Segundo (CALLISTER 2012) a fratura frágil ocorre sem nenhuma deformação prévia e surge devido à rápida propagação de uma trinca, normalmente apresentada na direção perpendicular da tensão aplicada. A aparência da seção rompida apresenta característica própria e ausência de deformação plástica, conhecida como "marca de sargento" dificilmente podendo ser observadas a olho nu. A figura 10 representa uma seção onde ocorreu uma fratura frágil.



Figura 10: Fratura Frágil.
Fonte: CALLISTER (2012).

2.7.3.2 FATURA DÚCTIL

A fratura dúctil ocorre após a deformação plástica extensa à medida que a trinca se propaga em um processo relativamente lento. A superfície da seção de uma fratura dúctil possui características distintas pela tensão aplicada, podendo ser observada a deformação plástica do corpo tanto ao nível macroscópico quanto microscópico, observada na figura 11 (CALLISTER 2012).

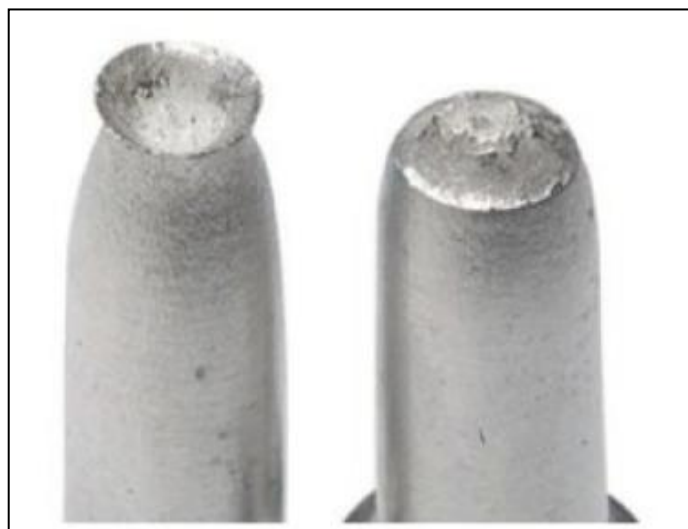


Figura 11: Fratura Dúctil.
Fonte: CALLISTER (2012).

2.8 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF)

2.8.1 ORIGEM

O método de elementos finitos (MEF) teve origem em 1955 como evolução para as análises matriciais utilizadas na indústria aeronáutica. Os primeiros elementos foram desenvolvidos por engenheiros aeronáuticos para análise de tensões em asas de aviões (FISH 2007).

Em 1965 a NASA criou o projeto *NASTRAN*, desenvolvido para gerar um programa que possibilita um amplo conjunto de análise de tensões em duas ou três dimensões, em vigas ou elementos de casca como fuselagem de aviões (FISH 2007).

O MEF obteve grande difusão a partir da década de 80 quando ocorreu a proliferação dos microcomputadores. Com esse avanço o MEF chega às mãos da generalidade de projetistas e abre caminho para o surgimento de outros *softwares* da área (FILHO 2005).

2.8.2 ANÁLISE DO MÉTODO

O corpo analisado é submetido a carregamentos e restrições, esta mesma geometria é subdividida em diversas partes, denominadas elementos. Esses elementos facilitam a análise de problemas complexos, possibilitando ao computador executar os cálculos com maior eficiência.

Os elementos podem apresentar diversas formas de acordo com o tipo e dimensão do problema, tais como a triangular, quadrilateral, etc. O método sugere que o numero infinito de variáveis desconhecidas seja substituído por esses elementos com comportamento bem definido (FISH 2007).

Segundo (VAZ 2011) os elementos finitos quando conectados entre si recebem a denominação de "nós", a junção entre os elementos e os nós são denominados de "malhas". Essas malhas subdividem a geometria facilitando a aproximação de métodos numéricos e de comportamento físico do corpo, conforme ilustra a figura 12. A precisão desta análise depende do tamanho dos elementos da malha, ou seja, quanto menor for o elemento, maior será a precisão da análise.

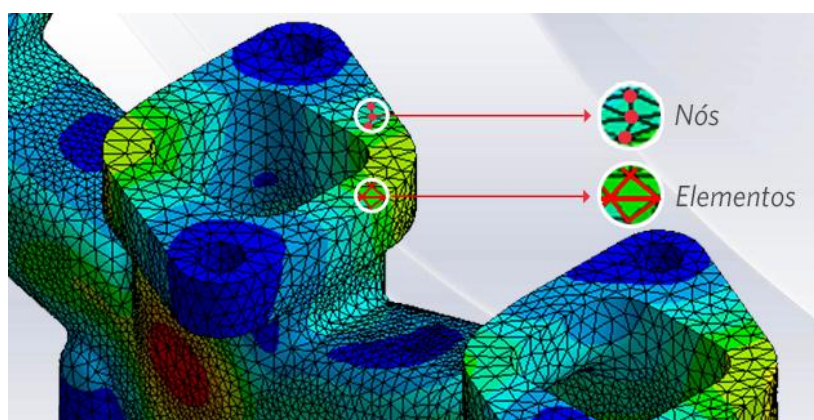


Figura 12: Elementos e nós MEF.

Fonte: ESSS (2018).

2.8.3 APLICAÇÃO MEF

O MEF é utilizado para o diagnóstico de falhas e problemas em nível de projeto ou de análise investigativa que possam ocorrer em virtudes de deslocamentos, deformações e tensões. A amplitude de utilização de MEF é extensa e varia desde análises mecânicas até as vertentes de fluidos, térmicas e medicina (FILHO 2005).

2.9 ANÁLISE TECNOLÓGICA POR ENSAIO

2.9.1 ENSAIO DE DUREZA

A propriedade dureza é comumente utilizada na especificação dos materiais. Para a metalurgia e engenharia a dureza é a resistência de penetração de um material ao outro. Essa resistência pode ser obtida a partir do ensaio de Dureza Rockwell (SOUZA 1982).

2.9.1.1 DUREZA ROCKWELL

O ensaio de dureza Rockwell possibilita a determinação da dureza de praticamente todos os tipos de aços e ligas metálicas. Para este tipo de ensaio utiliza-se um penetrador podendo ser ponta de esfera ou cônica de diamante, estipulada para cada tipo de aço ou liga (SOUZA 1982).

2.9.2 ENSAIO METALOGRÁFICO

De acordo com (ROHDE 2010), o ensaio metalográfico é a tecnologia que estuda a estrutura íntima e relação química e física dos aços e ligas metálicas. Através do ensaio metalográfico é possível analisar as microestruturas do aço, formas dos grãos e percentual aproximado de elementos de liga.

Para o ensaio metalográfica o corpo de prova é submetido a alguns preparos, como: lixamento, polimento, limpeza e ataque químico.

2.9.2.1 LIXAMENTO

O lixamento tem por objetivo a eliminação de riscos e marcas mais profundas na amostra. Este processo segue um padrão específico de posição da amostra em relação ao sentido de giro da lixa, esta técnica facilitará o próximo processo, o polimento.

Para o processo de lixamento metalográfico em aços é sugerido o aumento da granulometria da lixa, variando de 100 a 1200 (ROHDE 2010).

2.9.2.2 LIMPEZA

Após o lixamento é efetuado uma limpeza da amostra com líquidos de baixo ponto de ebulição antes do polimento. Normalmente neste processo é utilizado álcool etílico, freon líquido etc. (ROHDE 2010).

2.9.2.3 POLIMENTO

O processo de polimento visa à eliminação de toda marca ou riscos na superfície. Para essa técnica utilizam abrasivos como pasta de diamante ou alumina (ROHDE 2010).

2.9.2.4 ATAQUE QUÍMICO

Este processo consiste em aplicar um reagente ácido na superfície da amostra polida por um tempo determinado. O objetivo deste processo é permitir a visualização dos contornos de grãos e as diferentes fases na microestrutura.

O reagente causará a corrosão da superfície, possibilitando a visualização. Os reagentes são escolhidos de acordo com o material e seus constituintes macroestruturais no qual se deseja contrastar na análise metalográfica (ROHDE 2010).

3 METODOLOGIA

O desenvolvimento do trabalho se dará seguindo os passos:

- a) determinação e restrição geométrica do componente adaptador de soquete conforme norma ISO 1174.
- b) realização dos cálculos analíticos conforme literatura.
- c) modelagem do componente.
- d) realização de análise estática por meio do método de elementos finitos.
- e) Apresentar através de uma tabela a comparação entre os valores apresentados na norma, no cálculo analítico e MEF.
- f) ensaio de dureza Rockwell e metalográfico do componente fraturado.

3.1 DETERMINAÇÃO GEOMÉTRICA DO COMPONENTE

A determinação geométrica e dimensional do componente é essencial para os cálculos analíticos e para a modelagem 3D do componente. Algumas dimensões e restrições são informadas conforma a norma ISO 1174-1, para as dimensões não informadas será efetuado a verificação diretamente no componente.

As figuras 13 e quadro 2 ilustram o desenho e dimensões respectivamente do encaixe macho do adaptador segundo a norma, a figura 14 apresenta medida não informada pela norma.

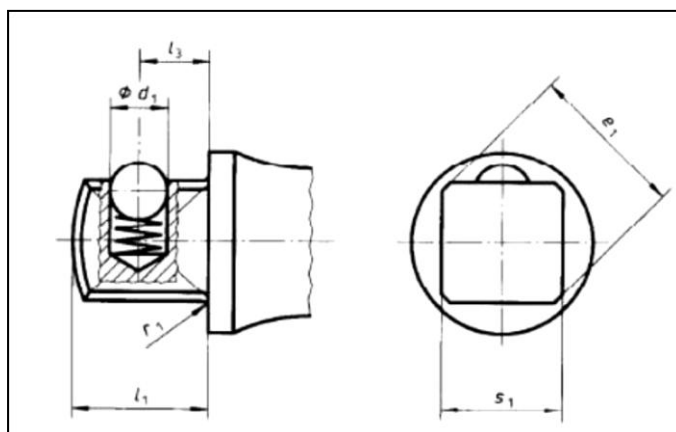


Figura 13: Desenho dimensional conforme norma ISO 1174.

Fonte: ISO 1174 (1996).

Quadro 2: Tabela dimensional conforme norma ISO 1174.

Type ¹⁾	s_1			d_1	d_2	e_1		l_1	l_2		r_1
	nom.	max.	min.			max.	min.		nom.	tol.	
A(B)	6,3	6,35	6,26	3	2	8,4	8,0	7,5	4	$\pm 0,2$	0,5
A(B)	10	9,53	9,44	5	2,6	12,7	12,2	11	5,5	$\pm 0,2$	0,6
A(B)	12,5	12,70	12,59	6	3	16,9	16,3	15,5	8	$\pm 0,3$	0,8
B(A)	20	19,05	18,92	7	4,3	25,4	24,4	23	10,2	$\pm 0,3$	1,2
B	25	25,40	25,27	—	5	34,0	32,4	28	15	$\pm 0,3$	1,6

NOTE — It is not recommended that types B and C be used together.

1) Types given in brackets are non-preferred.

Fonte: ISO 1174 (1996).

**Figura 14:** Espessura da parede do canal da esfera.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 CÁLCULO ANALÍTICO DE TORÇÃO

Para estudo, os cálculos analíticos mostram a máxima tensão de cisalhamento bem como o máximo torque aplicado para a seção não circular do componente com um fator de concentração de tensão. As expressões utilizadas estão estabelecidas na revisão bibliográfica.

3.3 MODELAGEM DO COMPONENTE

Para a modelagem do componente foi utilizado o software *Solidworks®* devido à disponibilidade e fácil utilização do programa, figura 15 e 16.

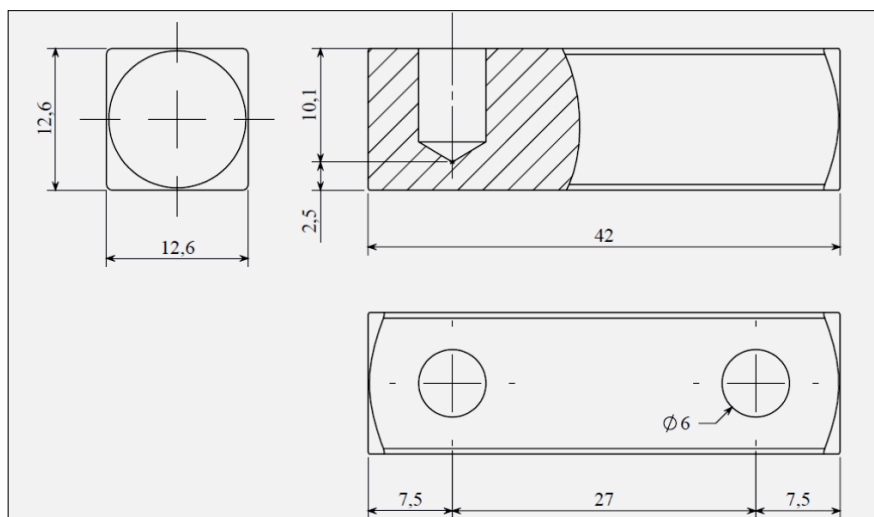


Figura 15: Desenho dimensional adaptador de soquete.

Fonte: Elaborada pelo autor.

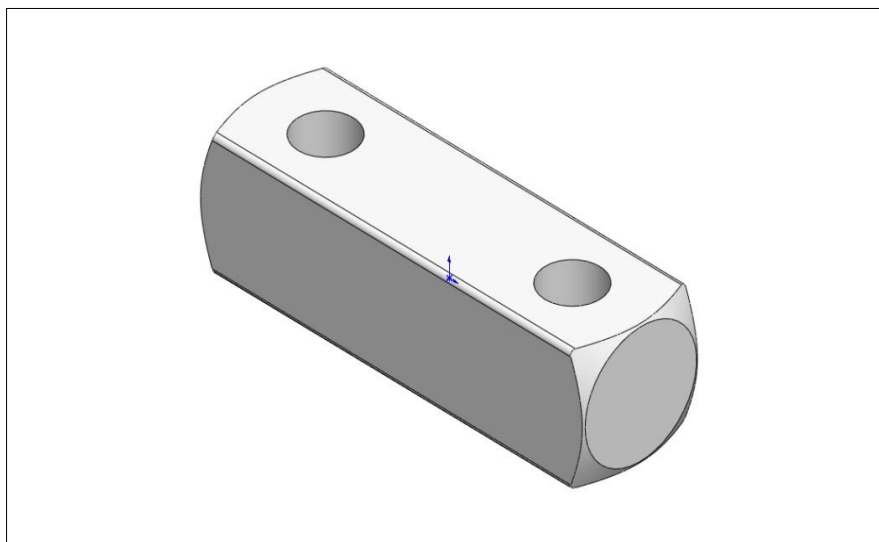


Figura 16: Desenho 3D adaptador de soquete.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A definição de propriedades do material ASTM A-231 teve de ser incluída, pois o software não dispunha em sua biblioteca, figura 17.

Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico em X	200000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson em XY	0.29	N/A
Módulo de cisalhamento em XY	80000	N/mm ²
Massa específica	7800	kg/m ³
Resistência à tração em X	2070	N/mm ²
Resistência à compressão em X		N/mm ²
Limite de escoamento	415	N/mm ²
Coefficiente de Expansão Térmica em X		/K
Condutividade térmica em X	0	W/(m·K)
Calor específico	0	J/(kg·K)
Razão de Amortecimento do Material		N/A

Figura 17: Propriedade ASTM A231 *Solidworks*®.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4 ANALISE MÉTODO ELEMENTOS FINITOS

Para análise MEF foi utilizado o software *Solidworks*® com um módulo para simulação o *Solidworks Simulation*. Este módulo possibilita o estudo de simulação estático, frequência, dinâmico, flambagem, etc.

Nesta análise foi considerado um estudo estático, com aplicação de torque na extremidade da peça. Para maior precisão da análise, o corpo foi seccionado podendo assim aplicar um engastamento mais próximo ao ocorrido no caso. A malha seleccionada é a mais fina possível para a capacidade do software, aumento assim a precisão da análise, mostrado na figura 18.

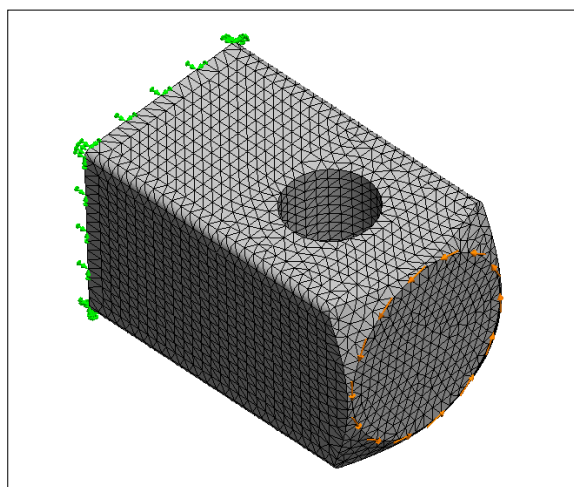


Figura 18: Malha fina aplicada ao componente.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 ENSAIO DE DUREZA HRC E METALOGRÁFICO

Os ensaios de dureza e de metalografia foram realizados no laboratório do bloco de engenharia do Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz. A amostra analisada é a peça cuja ocorreu a fratura no caso.

3.5.1 ENSAIO DE DUREZA

Para o ensaio de dureza foi utilizado o equipamento durometrô com escala Rockwell C, penetrador com ponta de diamante e uma pré-carga já estabelecida, conforme figura 19.



Figura 19: Durometrô digital.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.2 ENSAIO METALOGRÁFICO

O ensaio metalográfico compara a microestrutura do corpo analisado através de imagem com a literatura já existente. Para esse ensaio, o corpo analisado passa pelo processo de lixamento, polimento e ataque químico para posterior análise microscópica.

3.5.2.1 LIXAMENTO

Para o lixamento foram utilizadas sete lixas d'água com granulometria diversas. O processo iniciou com a lixa mais grossa de 150 em seguida para

180, 240, 320, 400, 600 e por fim 1200. O processo foi executado em uma máquina específica modelo Polipan 2, conforme figura 20.



Figura 20: Lixadeira Polipan 2.
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5.2.2 POLIMENTO

Para o polimento foi utilizado um equipamento similar a lixadeira com uma boina para polimento e aplicado lubrificante Pantec juntamente com pasta de alumina com granulometria de $1\mu\text{m}$.

3.5.2.3 ATAQUE QUÍMICO

A amostra é submergida por 30 segundos em uma substância de Nital 2% (98% de álcool e 2% de ácido nítrico). Após esse processo a peça é limpa com álcool etílico. Esse processo possibilita o ofuscamento da superfície analisada, garantindo que a peça não reflita luz na análise microscópica.

3.5.2.4 ANÁLISE MICROSCÓPICA

Após o ataque químico, a peça é submetida à verificação no microscópio metalográfico, Figura 21. No microscópio é coletada a imagem da superfície com ampliação de até 100 vezes.



Figura 21: Microscópio metalográfico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CÁLCULO ANALÍTICO DE TORÇÃO

De acordo com o objetivo proposto neste trabalho é necessário encontrar o valor máximo para tensão cisalhante e o máximo valor de torque suportado para o componente analisado, para tal processo foi utilizado às equações relacionadas na revisão bibliográfica.

O componente analisado possui uma descontinuidade na seção fratura, para obter o valor máximo de tensão cisalhante $\tau_{máx}$ é necessário obter o valor de concentração de tensão K_C . Para tal, (MORAES 1978) orienta que se não apresentado o valor em diagramas específicos, o mesmo deve ser calculado em uma relação geral de tração K_T obedecendo à geometria do corpo figura 22, equação (7). Seu valor deve reduzido em 25% para obter o valor K_C .

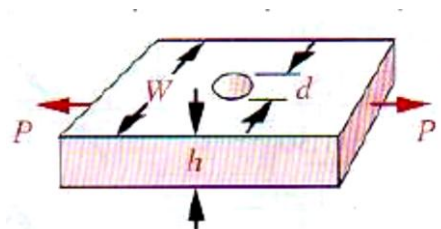


Figura 22: Geometria do corpo referencia fator K_T .

Fonte: BUDYNAS (2011).

Cálculo do fator K_T e K_C . Equação (7);

$$K_T = 3,00 - 3,13 \left(\frac{d}{w} \right) + 3,66 \left(\frac{d}{w} \right)^2 - 1,53 \left(\frac{d}{w} \right)^3$$

Onde:

K_T = Fator de concentração para tração (adimensional).

d = Diâmetro da descontinuidade (mm).

w = Largura do objeto (mm).

$$K_T = 3,00 - 3,13 \left(\frac{6,0}{12,6} \right) + 3,66 \left(\frac{6,0}{12,6} \right)^2 - 1,53 \left(\frac{6,0}{12,6} \right)^3 = 2,17$$

Para fator K_C .

$$K_C = K_T - (25\%)$$

Onde:

K_C = Fator de concentração para torção (adimensional).

$$K_C = 2,17 - (25\%) = 1,6275$$

Para obtenção da tensão cisalhante $\tau_{m\acute{a}x}$ é utilizado à equação (6) e o valor limite de escoamento τ_n do material conforme norma, tabela 4.

$$K_C = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{\tau_n}$$

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = Tensão cisalhante máxima (Mpa).

τ_n = Tensão nominal ou de escoamento (Mpa).

$$1,6275 = \frac{\tau_{m\acute{a}x}}{415} = 675,41 Mpa$$

Ao encontrarmos a tensão de cisalhamento máxima $\tau_{m\acute{a}x}$ definimos o máximo torque utilizado, conforme equação (3). O fator α é obtido na tabela 5.

$$\tau_{max} = \frac{T}{\alpha \cdot a \cdot b^2}$$

Onde:

$\tau_{m\acute{a}x}$ = Tensão cisalhante máxima (Mpa).

T = Torque máximo (N.m)

α = Fator relação altura e largura (adimensional)

a = Altura do perfil da peça (mm).

b = Largura do perfil da peça (mm).

$$675,41 = \frac{T/(1000)}{0,208.12,6.(12,6)^2} = 281N.m$$

4.2 ANALISE METODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Para a análise de MEF foi desprezado os componentes de esfera e mola que formam conjunto com o corpo analisado, pois não influenciam na resistência do material.

O resultado obtido através de análise de elementos finitos para a condição de aplicação de torque é apresentado na figura 23.

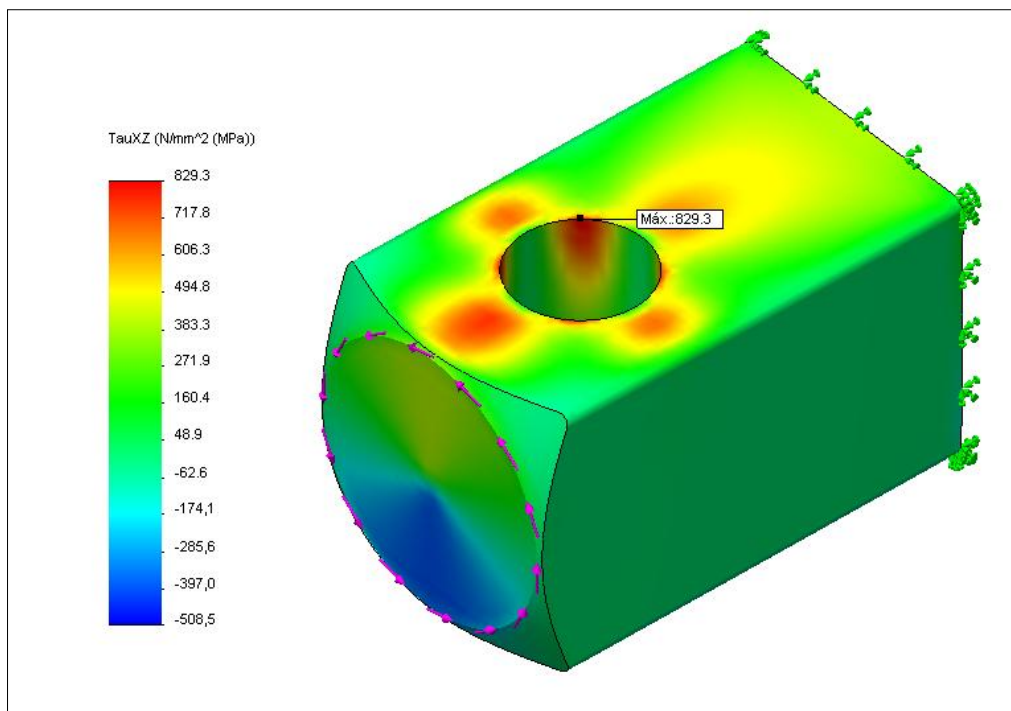


Figura 23: Máxima tensão cisalhante MEF.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O valor obtido para $\tau_{\max}$ é 829,3Mpa, volume que representa a maior concentração de tensão é representado na figura 24.

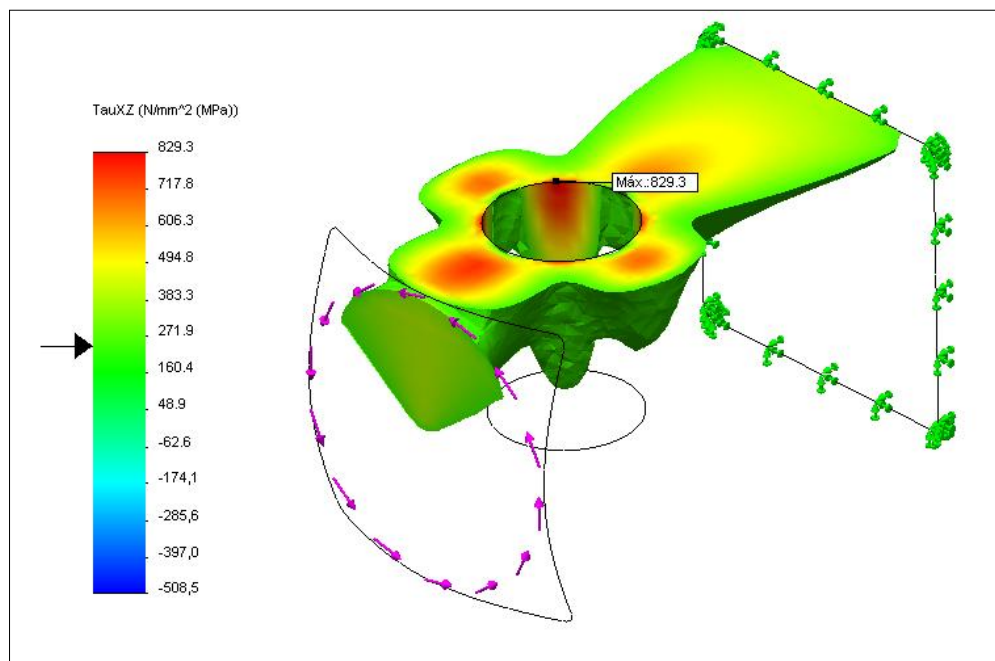


Figura 24: Volume com maior tensão MEF.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 COMPARAÇÃO RESULTADOS ANALÍTICOS, MEF E NORMA.

A tabela 6 apresenta a comparação obtida entre os cálculos analíticos, método dos elementos finitos e os valores informados pela norma. Para a obtenção do valor máximo de torque no MEF foi utilizado a equação (3) e aplicado a $\tau_{m\acute{a}x}$ conforme encontrada na análise.

Para o valor de $\tau_{m\acute{a}x}$ referente á norma, é utilizada a equação (3) aplicando o valor de torque estabelecido na figura 6 conforme ISO 6791.

Tabela 6: Comparação resultados analíticos, MEF e Norma ISO 6791

Método	$\tau_{m\acute{a}x}$ (Mpa)	T (Nm)
Norma ISO 6791	817,15	340
Cálculo Analítico	675,41	281
MEF	829,3	345

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4 RESULTADO ENSAIO DE DUREZA.

O ensaio de dureza foi realizado em três regiões da peça apresentando uma média de 41,5HRC, figura 25.



Figura 25: Resultados durometrô.

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5 COMPARAÇÃO ENSAIO METALOGRAFICO.

Através do ensaio metalográfico foi possível notar uma boa distribuição de carbonetos, e uma matriz martensítica, com grãos bem definidos. A Figura 26 apresenta o resultado obtido no ensaio metalográfico, e a figura 27 de ensaio fornecida pelo fabricante de acordo com ASTM A231.

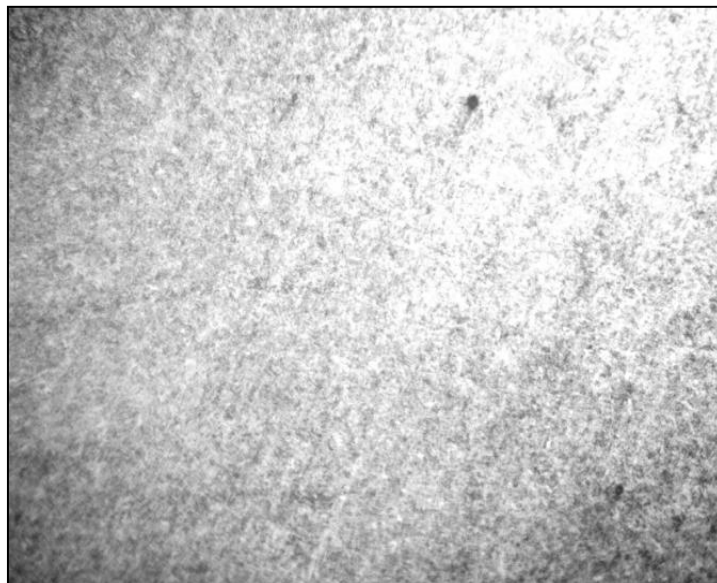


Figura 26: Resultado metalografia.

Fonte: Elaborada pelo autor.

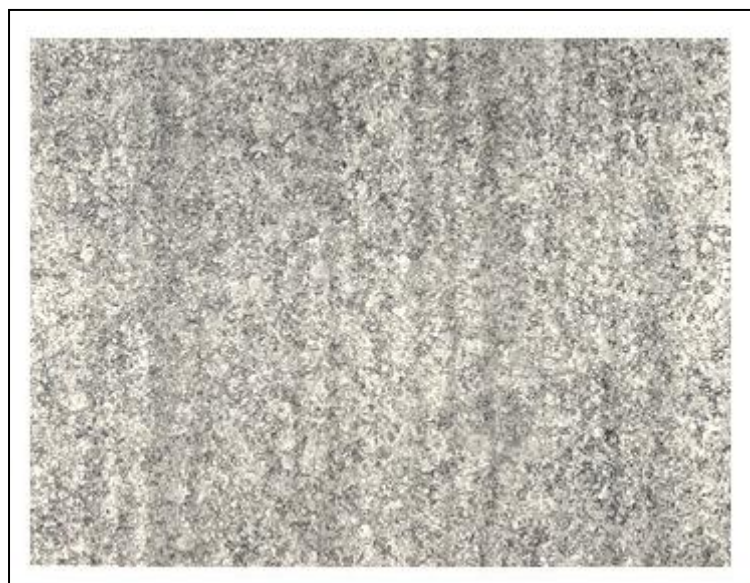


Figura 27: Metalografia 100x - ASTM A231.

Fonte: AUBERT & DUVAL (2016).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo deste estudo foi analisar de forma pericial a falha de um componente, comparando através de dois métodos distintos os resultados e confrontando com os valores informados pelo fabricante do componente e as normas estabelecidas para a fabricação do mesmo.

Analisando a tabela 6, verifica-se que o método de cálculo analítico apresentou um valor relativamente distante do valor nominal apresentado pela norma ISO 6791, aproximadamente 17% de diferença ao torque máximo. Esta diferença pode ter ocorrido pelo critério de escolha do fator de concentração K_T onde é aplicada uma equação genérica geral, obtendo um valor aproximado, porém não exato.

A análise por MEF expôs um resultado abeirado da norma ISO 6791, com uma diferença de apenas 1,5% no torque máximo suportado pela peça. O local indicado pelo software com a maior tensão figura 23 representa com grande precisão o local onde ocorreu a falha, figura 1 e 2.

Através dos ensaios de dureza e metalografia foi possível avaliar que o material da peça fraturada esta em acordo com o que estabelece a norma ASTM A231, tanto no intervalo de dureza, quanto no arranjo metalográfico, se comparado com a análise de outro fabricante, figura 27. Deste modo, é descartado a hipótese da falha ter ocorrido por uma não conformidade no material.

De acordo com os resultados obtidos através das análises e comparações é possível concluir que o componente sofreu uma fratura frágil, originaria da aplicação de torque além da capacidade máxima suportada.

Nota-se também uma imperícia operacional na escolha da ferramenta torquímetro utilizada para o processo de aparafusar, pois de acordo com o fabricante do equipamento a capacidade máxima de torque é de 200Nm e de acordo com a norma DIN 912 o torque de aperto ideal para o parafuso utilizado é 937,5Nm.

Assim, conclui-se que a falha não ocorreu por uma não conformidade do material ou de projeto, e sim por imperícia operacional na utilização da ferramenta e por um possível defeito no acionamento de alerta sonoro e tátil quando atingido o torque máximo.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise de falha no sistema de acionamento sonoro e tátil em torquímetros de estalo.
- Opção de liga com maior resistência á torção para chave dinanométrica.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A231/A231M-4**: Standard Specification for Chromium-Vanadium Alloy Steel Spring Wire. United States 2002.

AUBERTDURVAL, **Aços especiais**. Disponível em: <https://www.aubertduval.com/alloy/703/>. Acesso em: 17 Out. 2018.

BUDYNAS, R. G. **Elementos de Máquinas de Shigley**, 8.Ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER, J. W. D. **Ciência e Engenharia dos Materiais**: Uma Introdução, 8.ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 2012.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**, 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 1986.

CISER, **Parafusos e porcas**. Disponível em: <http://www.ciser.com.br/download/catalogo-de-produtos>. Acesso em: 19 Set. 2018.

DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **DIN 912**: Hexagon socket head cap screws. Berlin 1983.

ERJAVEC, J. **Automotive technology**: A Systems approach, 5ed. New York: Delmar Cengage Learning, 2010.

ESSS, **Simulação computacional**. Disponível em: <https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/> . Acesso em: 09 Out. 2018.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos**: A base da tecnologia CAE, 1.ed. São Paulo: Érica. 2005.

FISH, J. **Um Primeiro Curso em Elementos Finitos**, 1.ed. New Jersey: LTC, 2007.

GEDORE, **Ferramentas**. Disponível em: <https://catalogo.gedore.com.br/produtos/soquetes-e-acessorios>. Acesso em: 20 Set. 2018.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**, 5.ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 1174-1**: Assembly tools for screws and nuts - Driving squares. Switzerland 1996.

_____. **ISO 6789-1**: Assembly tools for screws and nuts — Hand torque tools. Switzerland 2017.

JOHNSTON, R. J.; BEER, F. P. **Resistência dos materiais**, 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1989.

MORAES, P.; CARVALHO, J. R. **Órgãos de máquinas**: Dimensionamento, 2.ed. Livros técnicos e científicos, 1978.

PILKEY, W. D. **Peterson's stress concentration factors**, 3.ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

ROHDE, A. R. **Metalografia Preparação de Amostras**. Disponível em; <http://www.urisan.tche.br/~lemm/metalografia.pdf>. Acesso em; 02 Out. 2018.

SILVA, A. L. C. E. **Aços e ligas especiais**, 2.ed. Sumaré: Eletrometal S.A Metais Especiais, 1988.

SOUZA, S. A. **Ensaaios mecânicos de materiais metálicos**: Fundamentos teóricos e práticos, 5.ed. São Paulo: Blucher, 1982.

VAZ, L. E. **Método Dos Elementos Finitos Em Análise de Estruturas**, 1.ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.