



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ISAAC ESDRAS SILVA SOUZA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CONCENTRADORES DE
TENSÃO EM UMA BARRA CHATA DE ALUMÍNIO
AXIALMENTE TRACIONADA**

MOSSORÓ/RN
SETEMBRO, 2018

ISAAC ESDRAS SILVA SOUZA

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CONCENTRADORES DE
TENSÃO EM UMA BARRA CHATA DE ALUMÍNIO
AXIALMENTE TRACIONADA**

Projeto de conclusão de curso II
apresentado à UFERSA – Universidade
Federal Rural do Semi-Árido do curso
Bacharelado em Engenharia Mecânica,
sob a orientação do professor Dr. Fabrício
José Nobrega Cavalcante.

MOSSORÓ/RN
SETEMBRO, 2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

S725a Souza, Isaac Esdras Silva.
ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CONCENTRADORES DE
TENSÃO EM UMA BARRA CHATA DE ALUMÍNIO AXIALMENTE
TRACIONADA / Isaac Esdras Silva Souza. - 2018.
53 f. : il.

Orientador: Fabrício José Nobrega Cavalcante.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2018.

1. Concentrador de Tensão. 2. Alumínio 6063. 3.
Ensaio de Tração. I. Cavalcante, Fabrício José
Nobrega, orient. II. Título.

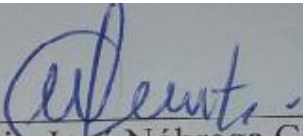
O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ISAAC ESDRAS SILVA SOUZA

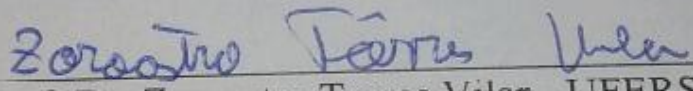
**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CONCENTRADORES DE
TENSÃO EM UMA BARRA CHATA DE ALUMÍNIO
AXIALMENTE TRACIONADA**

Projeto de conclusão de curso II
apresentado à UFERSA – Universidade
Federal Rural do Semi-Árido do curso
Bacharelado em Engenharia Mecânica,
sob a orientação do professor Dr. Fabrício
José Nobrega Cavalcante.

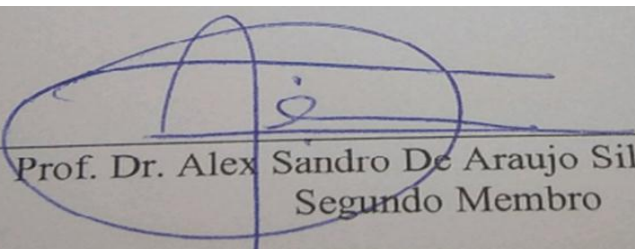
APROVADO EM: 12/09/2018



Prof. Dr. Fabrício José Nobrega Cavalcante – UFERSA
Orientador - Presidente



Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar - UFERSA
Primeiro Membro



Prof. Dr. Alex Sandro De Araujo Silva - UFERSA
Segundo Membro

DEDICATÓRIA

A Deus pela sua infinita misericórdia, proteção e amor. Seu fôlego de vida tem me sustentado e tem me dado coragem para enfrentar todos os meus fracassos e nunca pensar em desistir.

Aos meus pais que estiveram sempre do meu lado, me dando força, conselhos e apoio para correr atrás de todos os meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo seu infinito amor, pois sem ele eu não conseguiria chegar aonde eu cheguei. Sua graça tem sido a chave para as minhas tomadas de decisões. E principalmente por ter ouvido e atendido todas as minhas orações.

Ao meu pai, Ozemar Santos Souza que sempre agiu com muito amor e compreensão para comigo. Sendo um dos alicerces fundamentais para me tornar o homem que sou hoje.

À minha mãe, Robélia Nascimento da Silva que nunca deixou de dizer o quanto me ama, sua proteção gigantesca foi um dos motivos para nunca desistir de nada.

Aos meus irmãos, João Lucas Silva Souza e Mateus Silva Souza que se mantiveram com muito amor do meu lado em todas as minhas decisões e por sempre estarem dispostos a me ajudar.

A todos os meus parentes e amigos, principalmente minha parceira de estudos Camila Elnatana, por cada ajuda, conselhos e bons momentos.

Ao meu Orientador e professor Dr. Fabrício José Nobrega Cavalcante, por ter me aceitado para essa atividade.

Por fim, agradeço a UFERSA, a todos os docentes que contribuíram para realização desse trabalho e para minha formação acadêmica.

Sabemos que todas as coisas cooperam para o bem daqueles que amam a Deus, daqueles que são chamados segundo o seu propósito.

(Romanos 8.28)

RESUMO

O cálculo de análise tradicional de tensões pode ser simplificado ao desprezar os efeitos localizados nas transições geométricas grotescas, e considerando-se seções transversais dos elementos como uniforme. No entanto, a maioria das peças reais tem entalhos, seções transversais não uniformes (como furos, rasgos de chaveta, chanfros, cantos vivos, roscas ou qualquer detalhe geométrico parecido), onde são indispensáveis para operações de elementos de máquinas. Estes entalhes concentram tensões nominais que atuam na peça por causa de descontinuidades na geometria que criam uma perturbação no padrão uniforme de tensão, na qual amplificam tensões. O estudo em questão foi realizado através da confecção de corpos de prova, que para isso foi utilizado uma barra chata do Alumínio 6063 e realizado furos para a análise da influência destes concentradores de tensão ao serem axialmente tracionados. Após os dados obtidos pelo *Software* TESC, os mesmos foram tratados e acondicionados em tabelas e representados por meio de gráficos, Tensão *versus* Deformação. O estudo se delimita a conhecer as propriedades mecânicas como o Limite de Escoamento, o Limite de Resistência à Tração e o Alongamento em cada corpo de prova como também o Fator Geométrico de Concentração de Tensão (K_t).

Palavras- chave: Concentrador de Tensão, Alumínio 6063, Ensaio de Tração.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Distribuição qualitativa de tensão em placa sob tração.	14
Figura 2 - (a) Corpo em equilíbrio sobre a ação das forças externas $P_1, P_2, \dots, P_5$; (b) forças atuantes na parte 2.....	18
Figura 3 - Barra prismática sob tração.	19
Figura 4 - Representação do estado de tensões num dado ponto material	21
Figura 5 - Representação do estado plano de tensões.	22
Figura 6 - Diagrama tensão-deformação típico para aço estrutural.	23
Figura 7 - (a) Carregamento de tração, (b) distribuição de tensão.	24
Figura 8 - (a) Peça tracionada, (b) Peça comprimida.	25
Figura 9 - Representação de um cisalhamento puro.....	26
Figura 10 - Geração do ângulo de distorção γ	27
Figura 11 - Diagrama tensão <i>versus</i> deformação típico para aço estrutural: (a) sem escala, (b) em escala.	28
Figura 12 - Diagramas tensão <i>versus</i> deformação de dois materiais dúcteis típicos: (a) aço com baixo teor de carbono, (b) liga de alumínio.	29
Figura 13 - Diagrama tensão <i>versus</i> deformação para material frágil típico.	30
Figura 14 - Mecanismos de ruptura de corpos de prova sob tração.	31
Figura 15 - Exemplos de regiões com concentração de tensão provocada pela geometria da peça, com indicação dos pontos críticos.....	32
Figura 16 - Barra plana com entalhes e chanfros sujeita a um momento fletor.	34
Figura 17 - Coeficientes de concentração de tensão para placas submetidas a carregamento axial.	35
Figura 18 - Exemplo de forma de alívio geométrico de tensão.....	37
Figura 19 - Curvas Típicas de Deformação para Ligas de Alumínio.....	38
Figura 20 - Fluxograma da metodologia.	39
Figura 21 - Composição química.	40
Figura 22 - Corpos de Prova esquematizados. (a) Família A, (b) Família B e (c) Família C.	40
Figura 23 - Brocas utilizadas no processo de furação dos corpos de prova.	41
Figura 24 - Corpos de prova finalizados para ensaio.	42
Figura 25 - Máquina universal de ensaios.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de corpos de prova para o ensaio de tração.....	42
Tabela 2 - Parâmetros de ensaio.	44
Tabela 3 - Propriedades obtidas - Família A.	46
Tabela 4 - Propriedades obtidas - Família B.	47
Tabela 5 - Propriedades obtidas - Família C.	49
Tabela 6 - Médias das propriedades obtidas.....	50
Tabela 7 - Comparativo dos concentradores de tensão para todos os corpos de prova.....	51

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Diagrama Tensão <i>versus</i> Deformação - Família A.	45
Gráfico 2 - Diagrama Tensão <i>versus</i> Deformação - Família B.	47
Gráfico 3 - Diagrama Tensão <i>versus</i> Deformação - Família C.	48
Gráfico 4 - Diagrama Tensão <i>versus</i> Deformação - Comparativo entre as Famílias.....	50

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMÁTICA	14
1.2 JUSTIFICATIVA	15
1.3 OBJETIVOS	16
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos.....	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 MECÂNICA DOS SÓLIDOS	17
2.1.1 Conceito de tensão.....	17
2.1.2 Estado plano de tensões	20
2.1.3 Deformação e Lei de Hooke.....	22
2.1.4 Formas de carregamento	23
2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS MECÂNICOS	27
2.2.1 Teste de tração e diagrama tensão <i>versus</i> deformação	27
2.2.2 Diagramas tensão-deformação de materiais dúcteis e frágeis	28
2.2.3 Fratura de materiais dúcteis e frágeis	30
2.3 CONCENTRADORES DE TENSÃO.....	32
2.3.1 Fator de Concentração de tensão.....	34
2.3.2 Formas de alívio de tensão	36
2.4 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS	37
3. METODOLOGIA	39
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1.1 Preparação dos Corpos de Prova.....	40
3.1.2 Procedimento Experimental.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 RESULTADOS OBTIDOS	45
4.1.1 Corpo de Prova – Família A.....	45
4.1.2 Corpo de Prova – Família B.....	47
4.1.3 Corpo de prova – Família C	48
4.1.4 Análise das médias dos corpos de prova – Um comparativo entre as Famílias.....	49

5. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

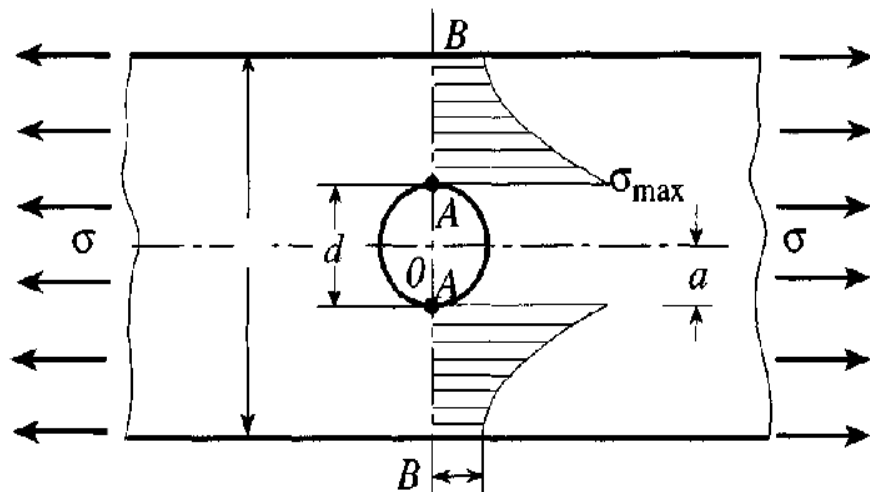
Em razão do expressivo avanço da tecnologia, bem como a necessidade do aprimoramento constante dos processos de fabricação e de técnicas de projeto de componentes mecânicos, tem surgido uma preocupação da materialização de produtos de alta qualidade e serviço, produtos mais leves, duráveis, acessíveis e econômicos.

Uma das preocupações que o engenheiro deve ter é acerca das descontinuidades dos componentes mecânicos, como furos para alocação de parafusos/pinos, escalonamento de eixos para acomodar rolamentos, entalhes, rasgos para chaveta, dentre muitos outros, deixando por fim a peça com seção transversal não-uniforme e descontínuo.

As descontinuidades são regiões críticas da peça, pois é quando surgem valores de tensões superiores ao valor nominal calculado através da teoria da elasticidade, como apresentado por inúmeros autores como HIBBELER (2004), BEER (2011) e NORTON (2013).

A Figura 1 ilustra qualitativamente a distribuição de tensão na placa com furo central sujeita a um carregamento de tração uniaxial. Próximo à descontinuidade (furo), a tensão apresenta um aumento abrupto caracterizado pelo pico de tensão $\sigma_{\max}$, nos pontos A.

Figura 1 - Distribuição qualitativa de tensão em placa sob tração.



Fonte: PILKEY (1997).

Com base nisso, PILKEY (1997, apud FRANQUETTO, 2007) afirma que descontinuidades ou variações na seção transversal ao longo de um componente mecânico apresentam picos de tensões localizados. Esse fenômeno é definido como concentração de tensão que é caracterizado e quantificado através do FATOR DE CONCENTRAÇÃO DE TENSÃO, usualmente indicado por K_t , e avaliado em relação à tensão nominal σ_{nom} como apresentado na Equação 1.

$$K_t = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{nom}} \quad \text{Eq. 1}$$

Assim, para uma menor concentração de tensão, existem inúmeras formas para reduzir o valor de K_t , como dentro outros que será apresentado neste trabalho posteriormente, temos a adição de elementos de alívio ao redor do concentrador de tensão, onde o mesmo deve levar em consideração uma boa configuração a depender do projeto para diferentes elementos geométricos para alívio (FRANQUETTO, 2007), surgindo então nosso problema.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os entalhes, furos, aberturas presentes nos elementos de máquinas podem se tornar um problema muito significativo por causa dos concentradores de tensões que podem surgir levando a fadiga e possíveis rupturas abruptas através de solicitações cíclicas. O estudo para minimizar tais efeitos deve ser estudado dentro do projeto para evitando o desperdício de material e energia, além de aumentar a confiabilidade dos elementos produzidos.

Para FRANQUETTO (2007), a redução destes picos de tensão pode ter um impacto direto no projeto como:

- Produção de produtos menos robustos;
- Aumento da vida a fadiga (NORTON, 2004);
- Aumento dos coeficientes de segurança;
- Redução de ocorrência de corrosão sob tensão (GENTIL, 2003).

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

- O trabalho tem como objetivo geral avaliar as propriedades mecânicas como o limite de escoamento, o limite de resistência mecânica e o alongamento do material em análise pela presença de concentradores de tensão.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar por meio de ensaio de tração, o limite de escoamento, o limite de resistência à tração e o alongamento dos corpos de prova em estudo, fabricados a partir de uma barra chata de alumínio;
- Avaliar a influência dos concentradores de tensão nos corpos de prova;
- Determinar o fator geométrico dos concentradores de tensão para os corpos de prova em estudo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para a compreensão do tema Concentração de Tensão, é preciso conhecer e entender alguns aspectos teóricos e parâmetros envolvidos em seu estudo. Como por exemplo, dominar o conceito bruto de tensão e suas aplicações, tipos de carregamentos e suas solicitações em materiais sólidos, fratura, propriedades dos materiais dentre outros através de estudos teóricos apresentados em disciplinas como Ciência dos Materiais, Mecânica dos Sólidos e Elementos de Máquinas.

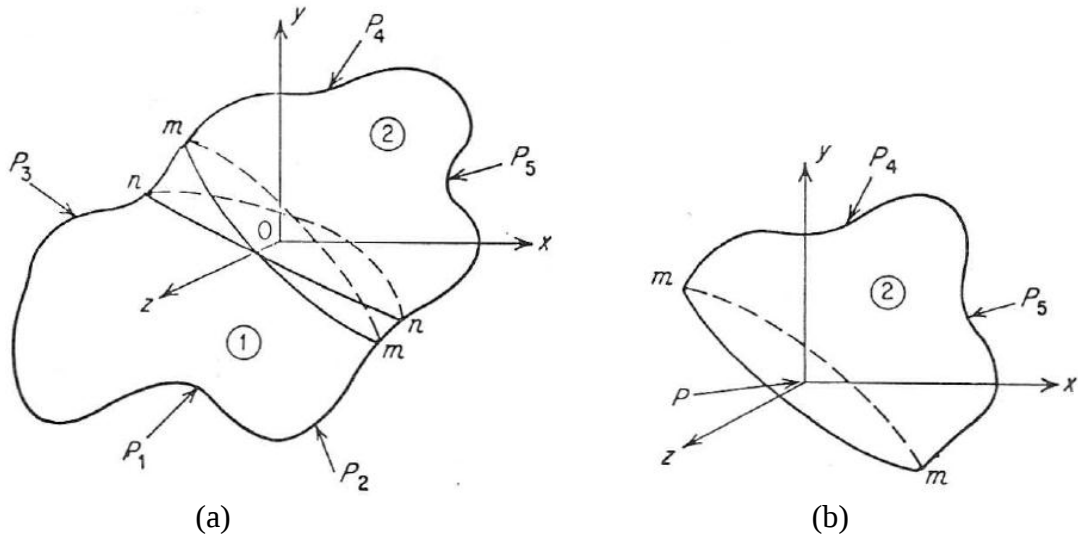
2.1 MECÂNICA DOS SÓLIDOS

2.1.1 Conceito de tensão

A tensão em geral pode ser definida como sendo força sobre área. Algumas aplicações podem ser simplificadas em tensão uniformemente distribuída sobre a área da seção reta de certo componente. Mas de modo mais generalista podemos fazer um estudo do conceito de tensão representando-o em um corpo em equilíbrio sob a ação de algumas forças externas $P_1, P_2, \dots, P_5$, como na Figura 2. Em geral existem dois tipos de forças externas que podem atuar sobre um corpo: forças superficiais; forças distribuídas sobre a superfície do corpo (como a força hidrostática ou a pressão exercida por um corpo sobre o outro), e as forças de corpo; forças distribuídas sobre o volume de um corpo (como a forças gravitacional, magnética ou para um corpo em movimento, a inercial) (DIETER, 1981).

Na Figura 2.a temos que a força não se distribui uniformemente sobre qualquer seção reta do corpo. Para obter a tensão que irá atuar em um ponto O do plano mm , a parte 1 do corpo é removida e substituída pelo sistema de forças externas atuantes sobre mm , e cada ponto da parte 2 do corpo permanece na mesma posição que ocupava antes da retirada da parte 1. Na Figura 2.b podemos supor que uma força ΔP atua sobre uma área ΔA em torno do ponto O.

Figura 2 - (a) Corpo em equilíbrio sobre a ação das forças externas $P_1, P_2, \dots, P_5$; (b) forças atuantes na parte 2.



Fonte: DIETER, 1981.

Tem-se então o valor limite da razão $\Delta P/\Delta A$, mostrando que à medida que a área ΔA tende continuamente para zero, a tensão no ponto O do plano mm da parte 2 do corpo fica como representada na Equação 2.

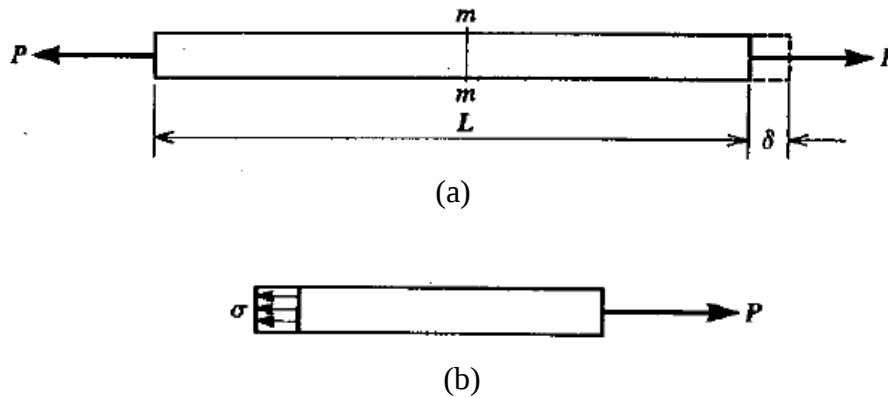
$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \sigma \quad \text{Eq. 2}$$

Com isso, a tensão é ficando sendo o valor limite da força por unidade de área quando tende a zero, quando o material é considerado contínuo e coesivo. Definindo temos que, a tensão é a intensidade de uma força interna em um ponto do corpo quando há distribuição da força que atua sobre a área seccionada, a qual mantém cada segmento do corpo em equilíbrio (HIBBLER, 2004).

TIMOSHENKO e GERE (1983) representa o conceito de tensão uniformemente distribuída por meio de ilustrações de forma elementar, como ao considerar o alongamento de uma barra prismática. Uma barra prismática tem seção constante em todo comprimento e eixo reto. Com isso, supõe-se a barra carregada nas extremidades por forças axiais, P , que produzem alongamento uniforme ou tração na barra. Através de um corte imaginário (seção mm) na barra normal ao eixo, tem-se a possibilidade de isolar um lado dela como um corpo livre (Figura 3. a). Com a força sendo aplicada na extremidade direita, aparecerão à esquerda

as forças que traduzem a ação da parte não selecionada sobre a que ficou. Tais forças são distribuídas uniformemente sobre toda a seção transversal.

Figura 3 - Barra prismática sob tração.



Fonte: TIMOSHENKO e GERE (1983).

Com base na Figura 3.b, cada força por unidade de área será denominada tensão, onde será representada pela letra grega σ . Sabendo disso, pode-se perceber que a resultante é dada pelo produto da intensidade de σ pela área A da seção transversal da barra. Assim como na Equação 3.

$$P = \sigma \int dA = \sigma A$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Eq. 3}$$

GERE (2003) apresenta a Equação 3 como sendo a intensidade de tensão uniforme em uma barra prismática carregada axialmente e de seção transversal de forma arbitrária. À medida que a barra é esticada pelas forças P , as tensões são de tração; se as forças são reversas em direção, tem-se a barra comprimida, tensão de compressão. E como tais tensões agem em uma direção perpendicular à superfície de corte, são chamadas de tensões normais.

DIETER (1981) ressalta que a tensão não se distribui uniformemente sobre a área A , e a Equação 3 representa uma tensão média. E para que seja uniforme, todo o elemento longitudinal da barra teria que apresentar a mesma deformação e o limite de

proporcionalidade entre a tensão e a deformação deveria ser idêntico para cada elemento em particular.

Essa hipótese de distribuição de tensões uniformes requer que, para SHIGLEY (2011):

- A barra seja reta e feita de um material homogêneo;
- A linha de ação da força contenha o centróide de seção;
- A seção seja escolhida em um ponto e bem distante das extremidades e de qualquer descontinuidade ou mudança abrupta na seção transversal.

GERE (2003) diz que a tensão uniforme existe ao longo de todo comprimento da barra, exceto próximo às extremidades, onde depende de como a carga é transmitida para a barra. Se ocorrer uma distribuição uniformemente sobre a extremidade, então a tensão na extremidade será igual ao de todo o resto da barra. Entretanto, é mais usual a tensão ser transmitida através de um pino ou parafuso, produzindo altas tensões localizadas, chamada de concentrações de tensões que será mais discutida na frente.

2.1.2 Estado plano de tensões

A tensão total pode ser destrinchada em duas componentes, uma tensão normal (σ), perpendicular à área ΔA , e uma tensão cisalhante (τ), localizada no plano mm da área (DIETER, 1981).

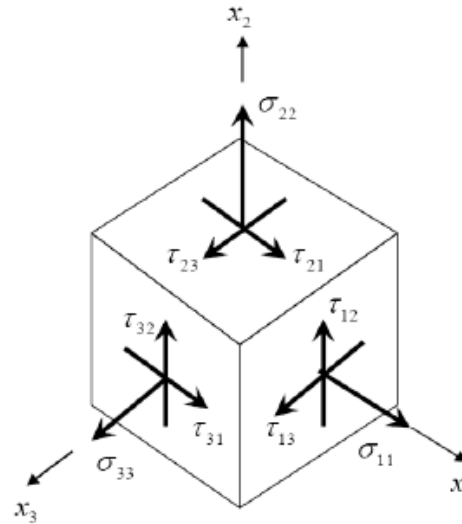
Quando uma barra prismática é feita de material homogêneo e isotrópico e está submetida à força axial atuando sobre o centróide da área da seção transversal, então o material no interior da barra é submetido apenas à tensão normal, supondo que tal tensão seja uniforme ou ponderada na área da seção transversal (HIBBLER, 2004).

A hipótese de uma distribuição uniforme de tensão é feita em projeto, onde, tem-se normalmente denominado tração pura, compressão pura ou cisalhamento puro, dependendo de como a carga externa é aplicada ao corpo em questão (SHIGLEY, 2011).

Uma análise para um dado ponto material pode ser feita através da representação de três planos virtuais de corte, cada qual com direção normal orientada segundo os eixos Cartesianos $x_1 - x_2 - x_3$. Obtendo assim dessa forma, nove componentes de tensões a_{ij} , na qual representa a densidade de forças por unidade de área sobre uma face cujo vetor normal é o eixo Cartesiano x_i e atuante na direção do eixo x_j . Ou seja, no ponto ocorrem três componentes de tensões normais (σ_{11}, σ_{22} e σ_{33}) e seis componentes de tensões cisalhantes

(τ_{21} , τ_{13} , τ_{21} , τ_{23} , τ_{31} e τ_{32}). Uma representação geométrica deste estado de tensões no ponto pode ser feita utilizando um cubo de material, como na Figura 4 (FRANQUETTO, 2007).

Figura 4 - Representação do estado de tensões num dado ponto material

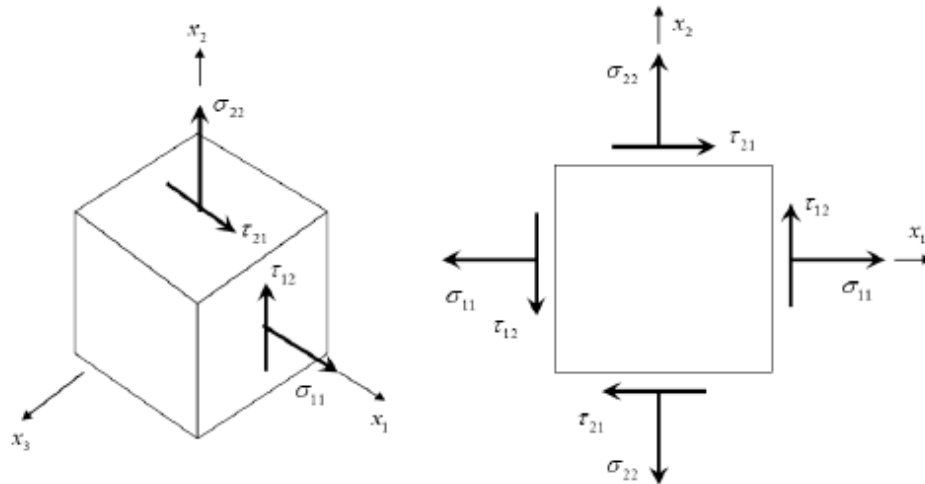


Fonte: FRANQUETTO, 2007.

Para HIBBLER (2004) existem seis componentes independentes da tensão em cada ponto do corpo, consistindo de tensão normal, σ_{11} , σ_{22} e σ_{33} , e tensão de cisalhamento, τ_{12} , τ_{23} e τ_{13} . Onde a intensidade desses componentes dependerá do tipo de carga que atua sobre o corpo e da orientação do elemento no ponto. Pois para manter o equilíbrio, na maioria dos casos, tensões de cisalhamento transversais são iguais $\tau_{21} = \tau_{12}$, $\tau_{32} = \tau_{23}$ e $\tau_{31} = \tau_{13}$.

Segundo TIMOSHENKO (1979, apud FRANQUETTO, 2007) apresenta uma simplificação importante para um estado geral de tensões. Segundo ele, quando uma placa sofre um carregamento com esforços aplicados paralelamente ao plano da placa, as componentes σ_{33} , τ_{13} e τ_{23} podem ser desprezadas, definindo assim um estado plano de tensões. Dessa forma, o estado de tensão fica especificado por σ_{11} , σ_{22} e τ_{12} que são componentes apenas em função da posição na placa e não da espessura. A Figura 5 mostra esquematicamente um estado plano de tensões.

Figura 5 - Representação do estado plano de tensões.



Fonte: FRANQUETTO, 2007.

2.1.3 Deformação e Lei de Hooke

Para GERE (2003), uma barra reta mudará de comprimento quando carregada axialmente, tornando-se mais comprimida em tração e mais curta em compressão. O alongamento δ da barra é o resultado cumulativo do estiramento de todos os elementos do material através do volume da barra. Em geral, o alongamento de um segmento é igual ao seu comprimento dividido pelo comprimento total L e multiplicado pelo alongamento total δ , conhecida como alongamento por unidade de comprimento, ou deformação ϵ . Vemos que a deformação é dada pela Equação 4.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad \text{Eq. 4}$$

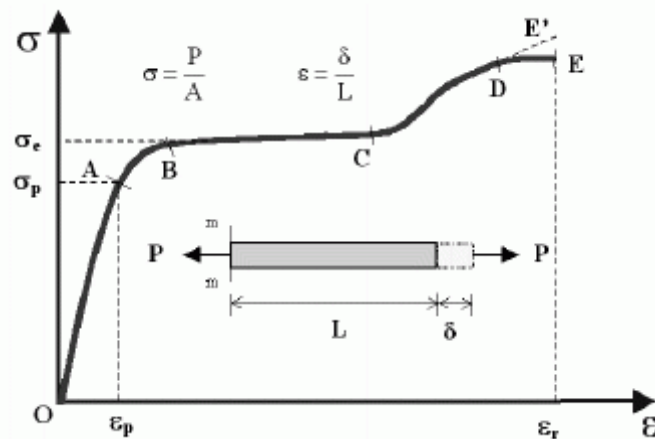
Se a barra está em tração, a deformação é denominada de deformação de tração, representando um estiramento do material. Se a barra está em compressão, a deformação é denominada de deformação de compressão e a barra encurta (GERE, 2003).

A lei de Hooke pode ser considerada válida abaixo do limite elástico, onde a tensão média é proporcional à deformação média (DIETER, 1981).

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = E = \text{constante} \quad \text{Eq. 5}$$

Onde a constante E é denominada módulo de elasticidade ou módulo de Young, como representado na Equação 5. Esse módulo de elasticidade é a inclinação do diagrama tensão-deformação na região elástica linear AO, como por exemplo, para o aço estrutural da Figura 6. Sendo apenas as tensões e deformações longitudinais desenvolvidas em tração e compressão simples de uma barra (tensão uniaxial).

Figura 6 - Diagrama tensão-deformação típico para aço



Fonte: DPE/SP, 2010.

2.1.4 Formas de carregamento

De maneira generalista, os esforços externos atuantes sobre uma estrutura ou componente mecânico são diversos. Podem-se encontrar carregamentos concentrados e distribuídos, variáveis no tempo, estáticos, dinâmicos, aleatórios, entre outros. Porém, dentro desta grande gama de possibilidades, três formas se destacam e são discutidas brevemente a seguir: Tração, compressão e cisalhamento.

O carregamento de tração consiste em aplicar duas forças opostas e colineares no centróide da área do elemento e paralelas ao seu comprimento. Aplicando o princípio de Saint-Venant observa-se que a distribuição de tensão ao longo da seção transversal do elemento é constante.

O princípio de Saint-Venant mostra que a tensão e a deformação geradas em um ponto suficientemente afastado da região de aplicação do carregamento são as mesmas produzidas por qualquer carregamento atuante que tenha a mesma resultante estaticamente equivalente para uma aplicação ao corpo naquela determinada região. Tanto a tensão como a deformação,

que ocorrem nas regiões de aplicação de carga, tende a promover-se a uma distância relativamente grande dessas regiões (HIBBELER, 2004).

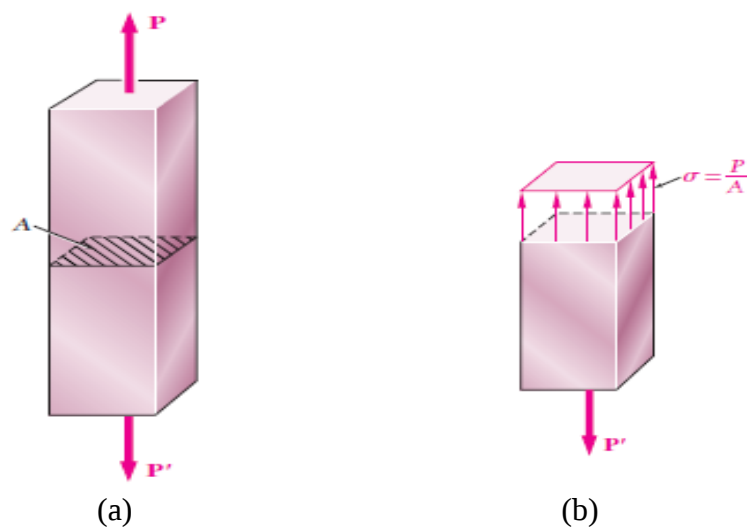
Para a apresentação da Figura 7 podemos quantificar tal tensão na seção transversal de área A de uma barra submetida a uma carga axial P , dividindo-se o valor da carga P pela área A , tem-se a Equação 6.

$$\sigma_{11} = \frac{P}{A} \quad \text{Eq. 6}$$

Como sendo $\varepsilon = \sigma/E$, tende-se que a deformação de um elemento sob tração pela aplicação de uma carga P é dada pela Equação 7.

$$\delta = \int_0^L \frac{PL}{AE} \quad \text{Eq. 7}$$

Figura 7 - (a) Carregamento de tração, (b) distribuição de

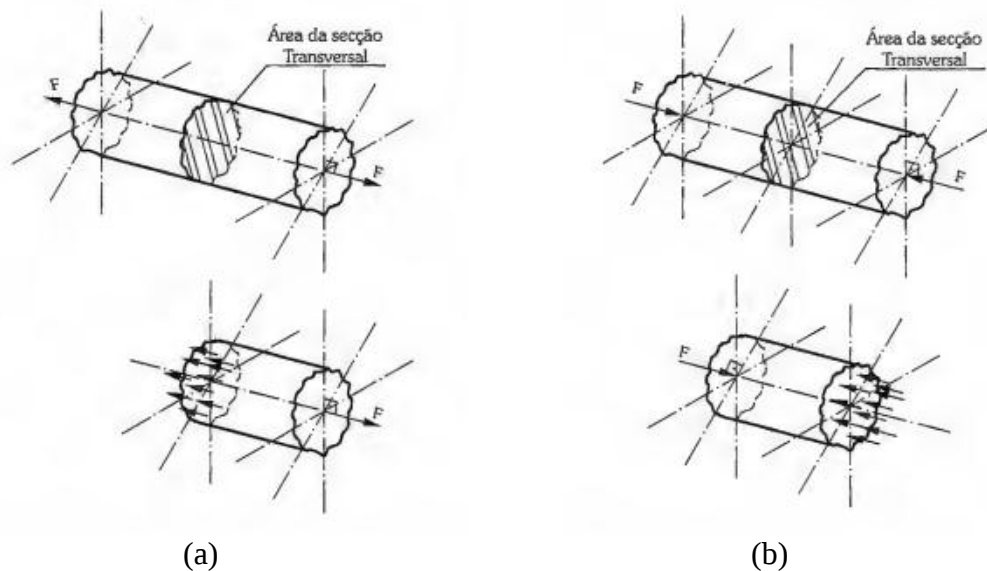


Fonte: BEER, 2011.

Será utilizado um sinal positivo para indicar uma tensão de tração (barra tracionada) e um sinal negativo para indicar tensão de compressão (barra comprimida). Um elemento sob compressão pode ser exemplificada como sendo redução de umas das suas dimensões, e um aumento da seção transversal a este mesmo eixo, quando a deformação nesta direção é permitida com a atuação de um carregamento de compressão (BEER, 2011).

Quando a carga atuar com o sentido dirigido para o exterior da peça ("puxada"), a peça estará tracionada. Quando o sentido de carga estiver dirigido para o interior da peça, a barra estará comprimida ("empurrada"), como na Figura 8 (SARKIS, 2010).

Figura 8 - (a) Peça tracionada, (b) Peça comprimida.

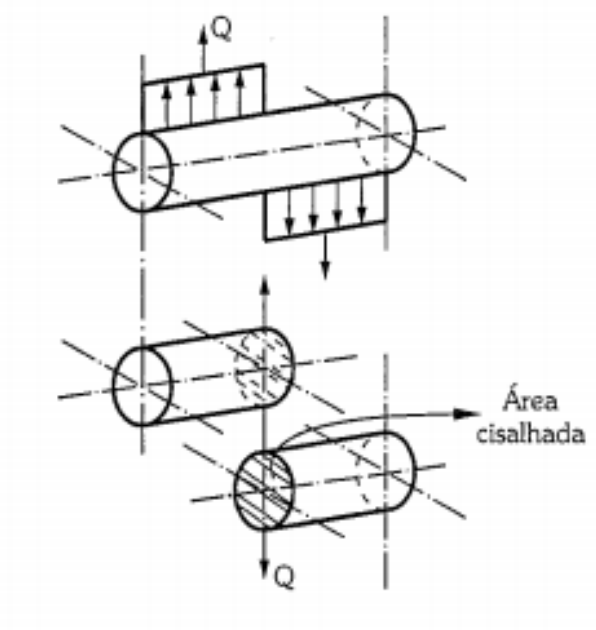


Fonte: SARKIS, 2010.

Tensões normais ocorrem pela ação de forças axiais, enquanto tensões cisalhantes causadas devido às forças de cisalhamento, na qual tais forças atuantes em um elemento estão inclinadas com relação à sua seção transversal. Nesse caso, essas forças podem ser decompostas em componentes paralelas e perpendiculares ao plano de corte considerado. As tensões normais resultam de esforços perpendiculares ao plano de corte, enquanto as tensões de cisalhamento resultam de esforços paralelos a esse mesmo plano (BEER, 2011).

Segundo SARKIS (2010) força cortante é a carga que atua tangencialmente sobre a área de seção transversal da peça. A ação da carga cortante sobre a área da seção transversal da peça causa nesta uma tensão de cisalhamento como na Equação 8, que é definida através da relação entre a intensidade da carga aplicada Q , e a área A_{cis} da seção transversal da peça sujeita a cisalhamento, como representado na Figura 9.

Figura 9 - Representação de um cisalhamento puro.



Fonte: SARKIS, 2010.

$$\tau = \frac{Q}{A_{cis}} \quad \text{Eq. 8}$$

O cisalhamento de um sólido causa uma deformação, assim como forças axiais. Uma representação simples pode ser feita através da Figura 10. Que ao receber a ação da carga cortante, o ponto C desloca-se para a posição C', e o ponto D para a posição D', gerando o ângulo denominado distorção (SARKIS, 2010).

Conforme SARKIS (2010), a distorção é medida em radianos (portanto adimensional), através da relação entre a tensão de cisalhamento atuante e o módulo de elasticidade transversal do material, como na Equação 9.

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \quad \text{Eq. 9}$$

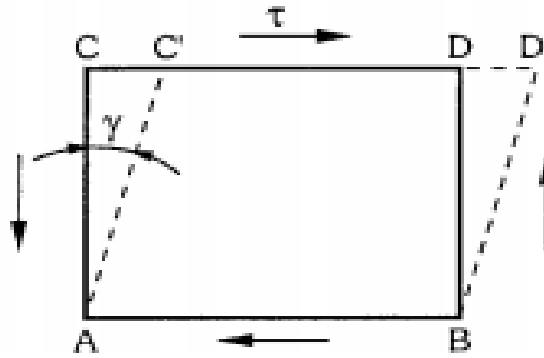
Onde, temos:

γ – Distorção [rad];

τ – Tensão de cisalhamento atuante [Pa];

G – Módulo de elasticidade transversal do material [Pa].

Figura 10 - Geração do ângulo de distorção γ .



Fonte: SARKIS, 2010.

2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS MECÂNICOS

CALLISTER (2008) em sua obra diz que muitos materiais, quando em serviço, estão sujeitos a forças ou cargas. O comportamento mecânico de um material reflete na relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Dentre algumas propriedades mecânicas importantes, estão: A resistência, a dureza, a ductilidade e a rigidez. Ainda diz que tais propriedades mecânicas sejam verificadas pela execução de experimentos de laboratório cuidadosamente programados, reproduzindo fielmente as condições de serviço, como a natureza da carga aplicada e a duração da sua aplicação, bem como as condições ambientais.

2.2.1 Teste de tração e diagrama tensão *versus* deformação

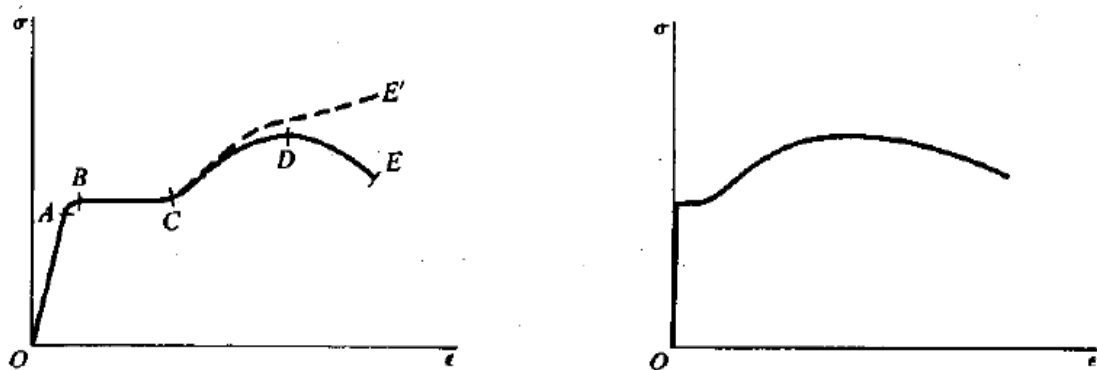
A resistência de um material depende de sua capacidade de suportar a carga em deformação excessiva ou ruptura. Um dos testes mais importantes a realizar é o teste de tração. Tal teste serve para determinar a relação entre a tensão normal média e a deformação normal média. (HIBBELER, 2004).

Conforme GERE (2003), o procedimento usual é colocar pequenos corpos de prova do material em máquinas de teste, aplicar as cargas e então medir as deformações resultantes (como mudanças no comprimento e no diâmetro).

Como exemplo típico, podemos mostrar o diagrama tensão-deformação típico para o aço estrutural, como na Figura 11. No caso, temos no eixo horizontal, as deformações axiais, sendo as tensões dadas pelas ordenadas dos pontos da curva OABCDE. De O ate A, as

tensões são diretamente proporcionais às deformações e o diagrama é linear. Neste ponto, a proporcionalidade não existe mais e o ponto A é chamado limite de proporcionalidade. Com o aumento da carga, as deformações crescem rapidamente do que as tensões até um ponto B, aparecendo uma deformação sem que haja um aumento da força de tração. Esse limite é conhecido como escoamento do material e a tensão no ponto B, denomina-se tensão de escoamento. Na região BC temos que o material tornou-se plástico. No ponto C, o material começa a oferecer resistência adicional ao aumento da carga, atingindo o valor máximo de tensão no ponto D. Assim, maior deformação é acompanhada por uma redução de carga, ocorrendo finalmente, a ruptura do corpo de prova no ponto E do diagrama (TIMOSHENKO e GERE, 1983).

Figura 11 - Diagrama tensão *versus* deformação característico do aço estrutural: (a) sem escala, (b) em escala.

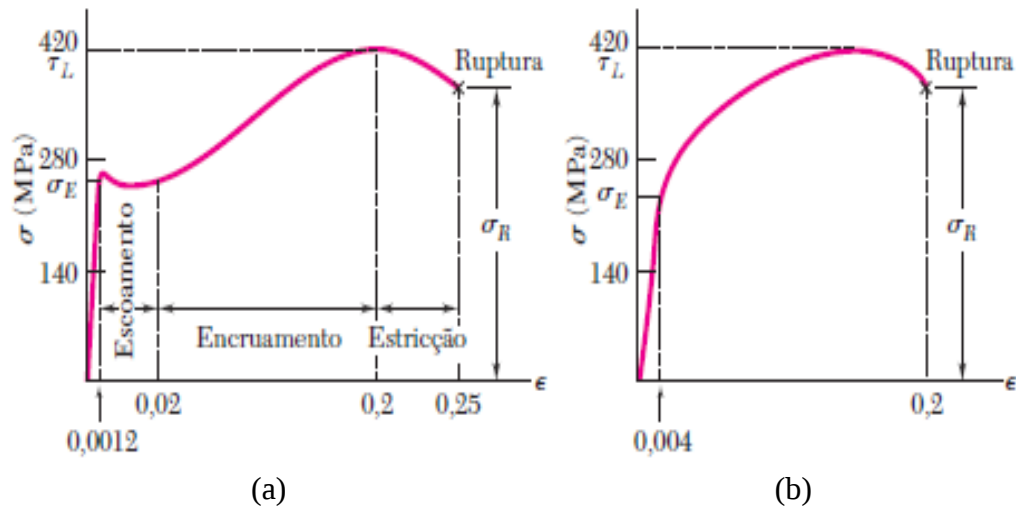


Fonte: TIMOSHENKO e GERE, 1983.

2.2.2 Diagramas tensão-deformação de materiais dúcteis e frágeis

Os diagramas tensão *versus* deformação dos materiais variam muito, e mesmo com ensaios sendo executados diferentemente com o mesmo material podem produzir resultados diferentes, onde a temperatura do corpo e velocidade de aplicação da carga pode influenciar. Porém, é possível diferenciar algumas características entre os diagramas tensão-deformação de vários grupos de materiais e, assim, separar os mesmos em duas categorias distintas com base nessas características, em matérias dúcteis e frágeis (BEER, 2011).

Figura 12 - Diagramas tensão *versus* deformação de dois materiais dúcteis típicos: (a) aço com baixo teor de carbono, (b) liga de alumínio.



Fonte: BEER, 2011.

Ainda segundo BEER (2011), ao destacar os materiais em dúcteis e frágeis, mostra que os materiais dúcteis, como aço estrutural e as ligas de muitos outros metais, são caracterizados segundo sua capacidade de escoar na temperatura ambiente. À medida que o corpo é submetido a uma carga crescente, seu comprimento aumenta linearmente a uma taxa muito baixa, inicialmente. No entanto, após alcançar um valor crítico de tensão σ_E , o corpo de prova sofre uma grande deformação com o aumento relativamente pequeno da carga aplicada. Com base na Figura 12 do diagrama de dois materiais dúcteis típicos, o alongamento do corpo de prova após o início do escoamento pode ser de até 200 vezes maior que no início do escoamento, que após alcançar um valor máximo da carga, o diâmetro de uma parte do corpo de prova começa a diminuir, em razão da instabilidade local, chamado de estricção.

Materiais frágeis como ferro fundido, vidro e pedra, são caracterizados pelo fato da ruptura ocorrer sem aviso prévio notável na taxa de alongamento (Figura 13). Não há diferença entre o limite de resistência e a resistência à ruptura, como também da deformação no instante da ruptura ser muito menor se comparada aos materiais dúcteis (BEER, 2011).

Figura 13 - Diagrama tensão *versus* deformação para material frágil típico.



Fonte: BEER, 2011.

2.2.3 Fratura de materiais dúcteis e frágeis

A ruptura devida a uma fratura de certo material é um dos modos de falha tratados como independentes do tempo, por possuírem igual probabilidade de ocorrer, qualquer que seja a vida ou tempo de uso do produto considerado. Geralmente acontecem quando o material sofre uma sobrecarga ou um pico de solicitação, levando a uma falha na forma de uma ruptura (a separação do sólido em duas ou mais partes) (ROSA, 2002).

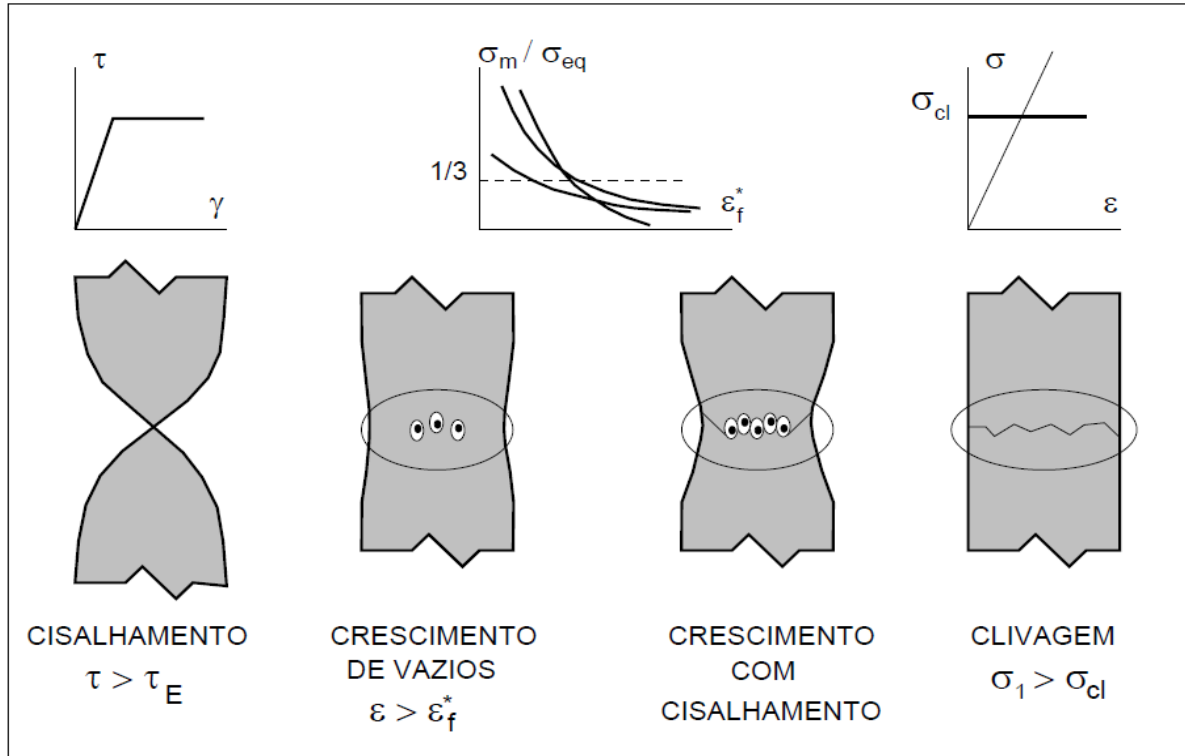
Uma fratura dúctil se caracteriza por uma especial deformação plástica na nucleação, nas superfícies de falha e na propagação da trinca. Para a ruptura sob tração, de metais moderadamente dúcteis, a deformação plástica produz uma redução na seção transversal, provocando um estado triaxial de tração no interior do material. Diminuindo a capacidade de deformação plástica e a ruptura processa-se por um mecanismo de nucleação de vazios, em torno de impurezas, no centro do material. Esta nucleação passa a uma etapa de crescimento destes vazios, com a continuidade da deformação plástica, até o instante em que os vazios começam a se unir, levando à ruptura da região central, estendendo-se após por cisalhamento (Figura 14). O modo de falha por crescimento de vazios ocorre quando a deformação plástica atinge um nível tal que os vazios originados nas impurezas do material passam a coalescer, formando uma trinca de dimensões comparáveis com a geometria do componente (ROSA, 2002).

O critério de ruptura dúctil por cisalhamento é dado pela Equação 10 e o critério para uma ruptura dúctil por nucleação, crescimento e coalescimento de vazios é expresso pela Equação 11.

$$\tau = \tau_E \quad \text{Eq. 10}$$

$$\varepsilon \geq \varepsilon_f^* = f(\sigma_m / \sigma_{eq}) \quad \text{Eq. 11}$$

Figura 14 - Mecanismos de ruptura de corpos de prova sob tração.



Fonte: ROSA, 2002.

Uma fratura frágil nos metais é caracterizada por uma grande velocidade de propagação da trinca, com pequena deformação plástica, mesmo em um nível microscópico. Uma ruptura metalurgicamente frágil é caracterizada pela separação das duas porções do material segundo um plano perpendicular à tensão de tração, sendo este um plano atômico da rede cristalina. Este é o chamado mecanismo de ruptura por clivagem, sendo controlado pelas tensões de tração que agem perpendicularmente ao plano cristalográfico de clivagem que ocorre devido à propagação de trincas resulta da quebra de ligações atômicas ao longo dos planos específicos. Tal condição leva a uma fratura transgranular na qual a propagação se divide através dos grãos, como na Figura 14 (ROSA, 2002).

O critério de falha na ruptura frágil é dado pela máxima tensão normal que atua no material, σ_1 , a qual não pode ultrapassar a tensão crítica de clivagem, σ_{cl} . Assim, o critério de ruptura frágil é dado pela Equação 12.

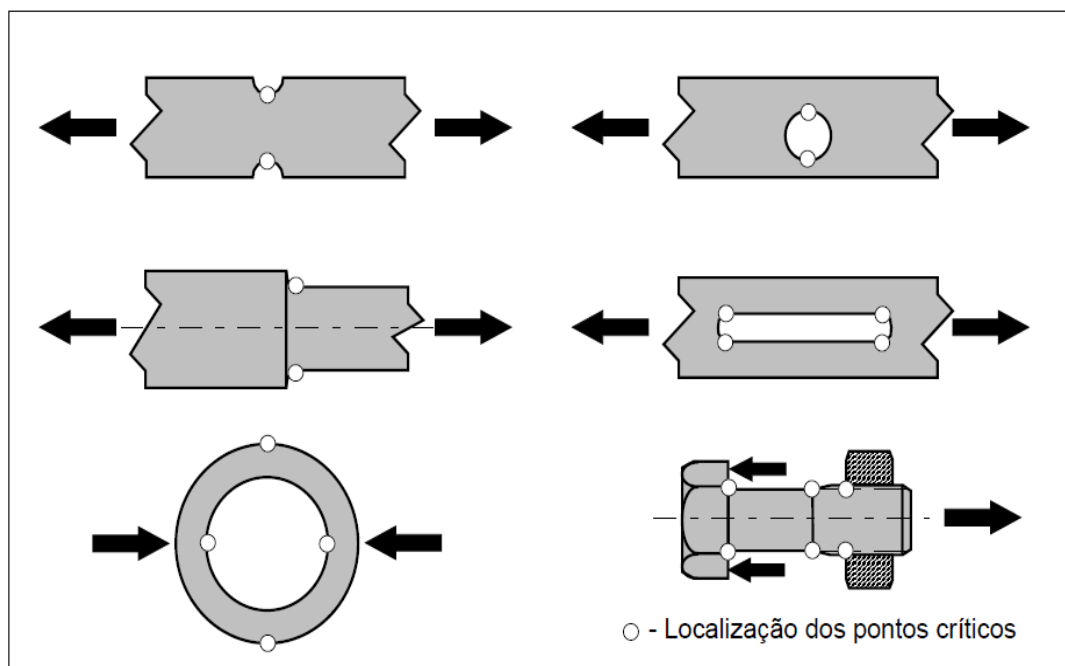
$$\sigma_1 \geq \sigma_{cl} \quad \text{Eq. 12}$$

2.3 CONCENTRADORES DE TENSÃO

Para determinar as tensões em barras, carregadas axialmente, usamos a equação básica $\sigma = P/A$, em que como já mencionado anteriormente, P é a força axial na barra e A é a área de seção transversal. Dizemos, portanto que, a distribuição de tensão é uniforme ao longo da seção transversal. GERE (2003) cita que geralmente as barras têm furos, ranhuras, chanfros, rasgos de chaveta, cantos vivos, roscas e outras mudanças abruptas na geometria que criam uma perturbação no padrão uniforme de tensão. Causando assim altas tensões em regiões bem pequenas da barra, conhecidas como concentradores de tensão.

Como a maioria dos elementos de máquinas reais apresentam seções transversais não uniformes, como eixos que são produzidos para acomodar rolamentos, engrenagens, polias e parafusos com roscas e cabeças maiores que suas hastes, têm-se então a presença de concentradores de tensão localizados, isso devido, as mudanças na geometria transversal (NORTON, 2013).

Figura 15 - Exemplos de regiões com concentração de tensão provocada pela geometria da peça, com indicação dos pontos críticos.



Fonte: ROSA, 2002.

As tensões calculadas nos diversos componentes e peças estruturais, são valores nominais, são válidas apenas para satisfazer uma série de condições, mesmo quase que não ocorra, pois as regiões mais propensas às falhas são as que contêm seções com alterações na geometria, ocorrendo pontos onde temos um aumento localizado de tensões (Figura 15), os pontos de concentração de tensão (ROSA, 2002).

Nestes pontos as tensões que atuam podem ser muito maiores que as tensões nominais (σ_{nom}), calculadas usando as expressões habituais, tipo força sobre área ou momento fletor sobre módulo de rigidez (ROSA, 2002). De um modo geral o efeito de concentração de tensão leva a perturbações localizadas na distribuição de tensões, que ocorrem em toda e qualquer situação onde existem descontinuidades, tais como:

- Alteração da geometria;
- Alteração de propriedades elásticas;
- Cargas concentradas.

Na Figura 15 temos os pontos assinalados como críticos. São os pontos onde a tensão que solicita o material atinge um máximo, ou seja, é o ponto onde ocorre de forma mais acentuada o efeito de concentração de tensão. Assim devido à descontinuidade provocada pela mudança de forma, aparecerá nesta região picos de tensões com um valor ($\sigma_{máx}$), cujo valor é bem maior que o valor calculado anteriormente. E essa tensão máxima é calculada usando-se o fator de concentrações de tensões (K_t), dada pela Equação 13.

$$\sigma_{máx} = K_t \sigma_{nom} \quad \text{Eq. 13}$$

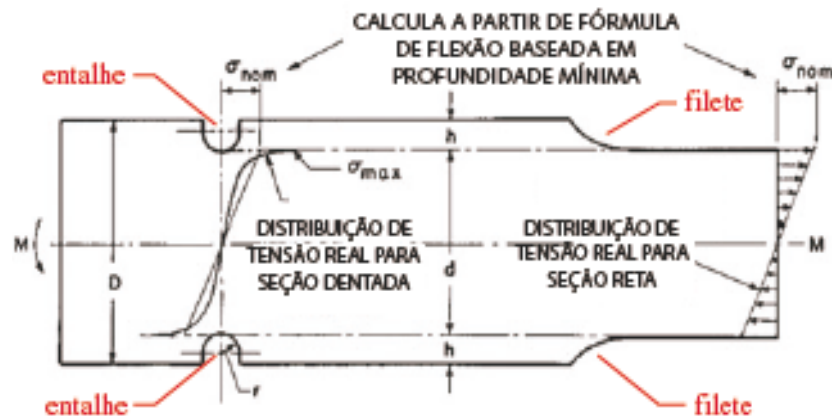
Para tensões de cisalhamento da Equação 14, usa-se o fator de concentração de tensão K_u e o valor de tensão máxima em um concentrador de tensão local é definida por:

$$\tau_{máx} = K_u \tau_{nom} \quad \text{Eq. 14}$$

Onde σ_{nom} e τ_{nom} são as tensões nominais calculadas para a situação particular de solicitação e seção transversal local, pressupondo uma distribuição das tensões sobre a seção transversal correspondente a uma geometria uniforme. Tais tensões nominais são calculadas utilizando-se a seção transversal local, que é diminuída devido à geometria do entalhe, usando d em vez de D como largura da seção do entalhe, como na Figura 16, que mostra uma barra

plana com entalhes e chanfros sujeita a um momento fletor, na presença de tensões nominais (σ_{nom}), tensão máxima ($\sigma_{máx}$) e a distribuição de tensão real para seção reta (NORTON, 2013).

Figura 16 - Barra plana com entalhes e chanfros sujeita a um momento fletor.



Fonte: NORTON, 2013.

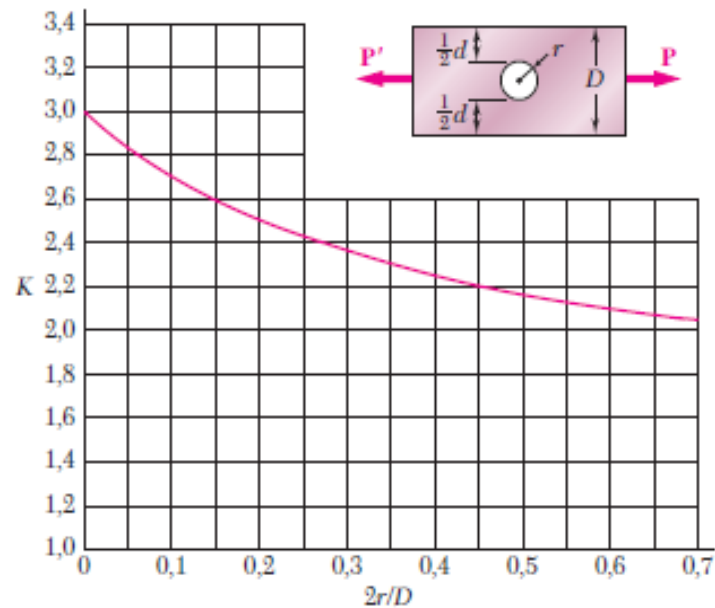
2.3.1 Fator de Concentração de tensão

A concentração de tensão em um elemento mecânico é quase sempre presente, sendo não tão desejável. E para isso, se tem sempre que possível, reduzir o K_t da peça. Uma estratégia comum para reduzi-lo é através do aumento das dimensões do componente, como por exemplo, a largura de uma chapa. No entanto, tal solução é normalmente deficiente, pois causa um aumento de peso e de custo do elemento, gerando impactos de processo de fabricação e de questões econômicas e logísticas.

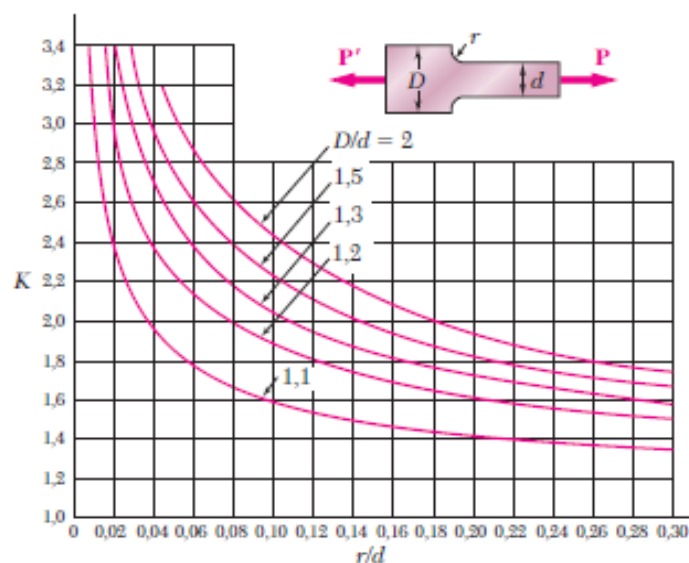
NORTON (2013) cita que os fatores K_t e K_u consideram apenas o efeito devido à geometria, e não consideram como o material se comporta diante de concentrações de tensões. A ductilidade ou fragilidade do material e o tipo de carregamento, se é estático ou dinâmico, também afetam o comportamento devido a concentrações de tensões.

Os valores de K são informados geralmente sob a forma gráfica nos manuais de análise de tensão, tal como na Figura 17. Na medida em que a descontinuidade, r , decresce, a concentração de tensão aumenta, pois o K como já dito anteriormente independe das propriedades do material da barra, dependendo apenas assim, da geometria da barra e do tipo de descontinuidade (HIBBELER, 2004).

Figura 17 - Coeficientes de concentração de tensão para placas submetidas a carregamento axial.



(a) Placas com furos.



(b) Placas com adoçamentos.

Fonte: BEER, 2011.

Com base nas informações de NORTON (2013), o autor fala que os materiais dúcteis não escoam localmente em torno do aumento de tensão e os pontos mais distantes da descontinuidade geométrica permanecem abaixo do ponto de escoamento, o que acontece diferentemente com os materiais frágeis que não escoam localmente, não sofrendo deformações significativas. Nos materiais dúcteis quando a solicitação aumenta, mais material escoam, deformando-se plasticamente até o ponto de ruptura, onde ocorreu a falha por fratura.

Ou seja, com isso pode-se desconsiderar os efeitos de concentração de tensões geométrica em tais materiais dúcteis sob solicitações estáticas. Já para matérias frágeis, concentrações de tensão têm efeitos em seu comportamento mesmo sob solicitações estáticas, ou seja, pode-se aplicar o fator de concentração de tensão para aumentar a máxima tensão aparente para a Equação $\sigma_{m\acute{a}x} = K_t \sigma_{nom}$.

Em carregamento estático são aplicados fatores de concentração de tensão como: Em materiais dúcteis ($\epsilon_f \geq 0,05$), onde o fator de concentração de tensão normalmente não é aplicado para prever a tensão crítica, pois como já dito, a deformação plástica na região da tensão é localizada e possui efeito de enrijecimento. Em materiais frágeis ($\epsilon_f \leq 0,05$), o fator de concentração de tensão geométrico K_t é aplicado à tensão antes de compará-la com a resistência (SHIGLEY, 2011).

Materiais dúcteis sob solicitações dinâmicas se comportam e falham como se fossem frágeis. Então, independentemente da ductilidade ou fragilidade do material, o fator de concentração de tensão deve ser aplicado quando cargas dinâmicas (fadiga ou impacto) estão presentes (NORTON, 2013).

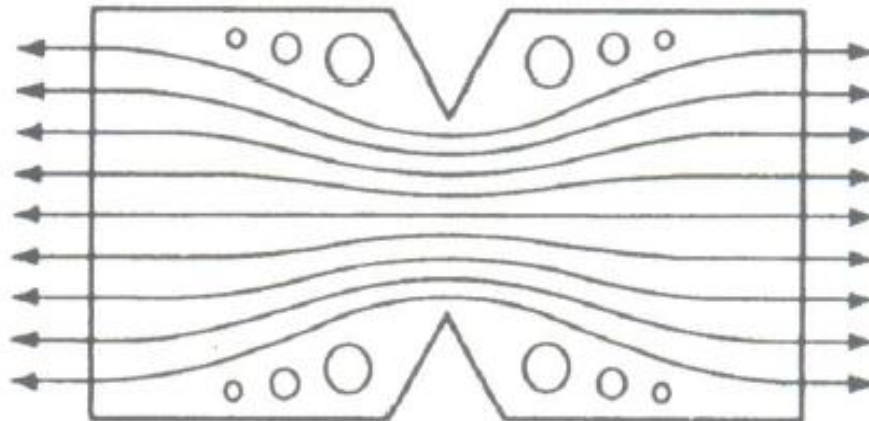
2.3.2 Formas de alívio de tensão

YOUNG (2002, apud FRANQUETTO, 2007) sugere que retirando material do componente pode-se reduzir o K_t . Para isto, são colocados elementos geométricos de alívio no entorno do concentrador de forma a suavizar o fluxo de linhas de força através da peça. Uma estratégia é utilizar furos para alterar o fluxo das linhas de força permitindo uma redução do K_t , como na Figura 18 em que apresenta uma forma de alívio utilizada em um entalhe severo em uma chapa.

Ainda segundo NORTON (2013), o estudo das curvas de concentração de tensões para várias geometrias existentes mostra que, na maioria dos casos, quanto mais agudo (canto vivo) e maior a magnitude da variação da dimensão, pior será a concentração de tensão. Assim é fácil afirmar para projetos que minimizam a concentração de tensões duas simples regras:

- Evite variações abruptas e/ou de grandes dimensões da seção transversal, quando possível.
- Evite cantos agudos e utilize o maior raio de transição possível entre as superfícies de diferentes contornos.

Figura 18 - Exemplo de forma de alívio geométrico de tensão.



Fonte: MARSHEK, 1987.

2.4 ALUMÍNIO E SUAS LIGAS

Segundo CALLISTER (2008), o alumínio e suas ligas são caracterizados por uma massa específica relativamente baixa, condutividade térmica e elétrica elevadas, e uma resistência à corrosão em alguns ambientes comuns, incluindo a atmosfera ambiente. Devido suas altas ductilidades, tais ligas podem ser conformadas com facilidade. Como o alumínio possui uma estrutura cristalina CFC, a sua ductilidade é mantida mesmo em temperaturas muito baixas.

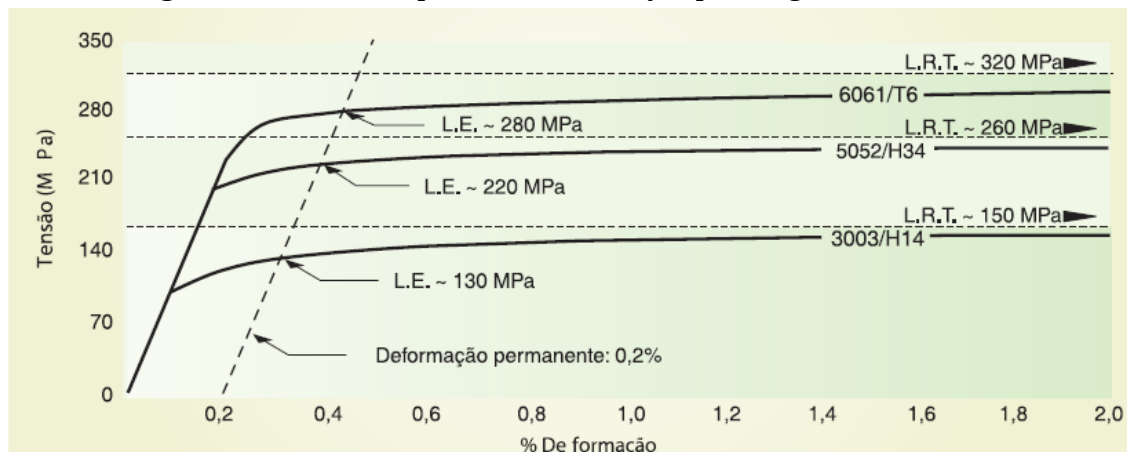
Para a obtenção do alumínio a partir da bauxita, têm-se três fases: Mineração, Refinaria e Redução. Basicamente no processo Bayer, a alumina é dissolvida em soda cáustica, e posteriormente, filtrada para separar todo material sólido. Com isso os cristais são secados e calcinados para eliminar a água, sendo o pó branco de alumina pura enviada à redução para obtenção de alumínio, através de eletrólise, processo conhecido como Hall-Héroult (ABAL, 2007).

As características mais marcantes do alumínio e essenciais para aplicação dentro da engenharia são: um ponto de fusão que é de 660°C (quando na pureza de 99,80%), o que é relativamente baixo quando comparado ao aço; um peso específico com cerca de 2,70 g/cm³, leve e aproximadamente 35% do peso do aço e 30% do peso do cobre; e um coeficiente de dilatação térmica linear de 0,0000238 mm/°C, na faixa de 20°C a 100°C, sendo aproximadamente duas vezes o do aço (ABAL, 2007).

Conforme a ABAL (2007), as propriedades mecânicas mais importantes do alumínio são: o Limite de Resistência à Tração, o Limite de Escoamento e o Alongamento. O limite de

resistência à tração do alumínio puro recozido é aproximadamente 48 MPa, aumentando em função da liga, do trabalho a frio e do tratamento térmico (quando possível). O limite de escoamento é a tensão em que o material começa a deformar-se plasticamente e que para o alumínio é de 0,2% do comprimento original medido em um corpo de prova normal. O limite de escoamento do alumínio puro recozido é aproximadamente 12,7 MPa, podendo ser aumentado com ajuda do trabalho a frio e tratamento térmicos. Na Figura 19 ilustra algumas curvas típicas de deformações.

Figura 19 - Curvas Típicas de Deformação para Ligas de Alumínio.



Fonte: ABAL, 2007.

As ligas com base em alumínio não-ligado contêm entre 99,0% e 99,5% de alumínio, sendo o restante, principalmente, ferro e silício. Pode-se obter metal com pureza maior do que 99,5% de alumínio, até 99,99%, a um custo muito mais elevado, que é usado quando se requer alta condutividade elétrica ou elevada resistência à corrosão. A composição química do alumínio e suas ligas é expressa em percentagem, obedecendo à Norma ABNT NBR 6834 (ABAL, 2007).

3. METODOLOGIA

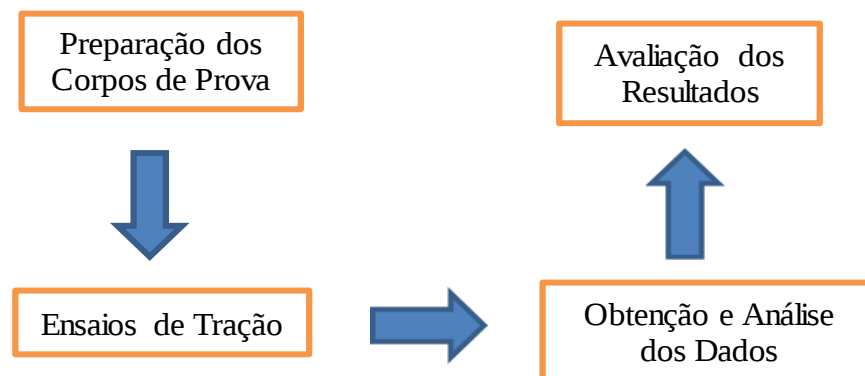
Este trabalho foi dividido em duas etapas, na qual a primeira consistiu em pesquisa e levantamento bibliográfico realizado anteriormente por meio de livros, internet, artigos científicos acerca do tema. E a segunda etapa foi basicamente um trabalho experimental onde se puderam aplicar os conceitos sobre concentradores de tensão na prática e observar sua influência e importância no âmbito da engenharia.

A parte experimental consistiu na preparação e ensaio dos corpos de prova realizados no laboratório de usinagem da UFERSA, na qual foi escolhida para o experimento uma barra chata de Alumínio adquirido no comércio local. Com isso foram realizados processos de usinagem como divisão da barra chata em 12 unidades no comprimento dos corpos de prova na serra, e um processo de furação na fresadora/furadeira, com duas brocas de diâmetros distintos.

Por fim no laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA, foram realizados ensaios de tração, em que os corpos de prova foram submetidos a um esforço crescente na direção axial. Os parâmetros a serem utilizados foram definidos anteriormente, e os corpos de provas foram tracionados até a ruptura.

A metodologia do trabalho foi realizada conforme o fluxograma mostrado na Figura 20. Na qual se têm a preparação dos corpos de prova, os ensaios de tração e a avaliação dos resultados com base nos dados obtidos.

Figura 20 - Fluxograma da metodologia.



Fonte: Autoria própria, 2018.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1.1 Preparação dos Corpos de Prova

Em primeira instância foi utilizado uma barra chata de Alumínio 6063 adquirido no comércio local de Mossoró/RN de 6 metros de comprimento com 1'' de largura e 1/8'' de espessura, possuindo um limite de escoamento mínimo de 155 MPa. Sua composição química segundo o fabricante pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 - Composição química.

ASTM	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	i	Outros elementos		Alumínio (Mínimo)
									Cada	Total	
6063	0,20-0,60	0,35	0,10	0,10	0,45-0,90	0,10	0,10	0,10	0,05	0,15	Restante

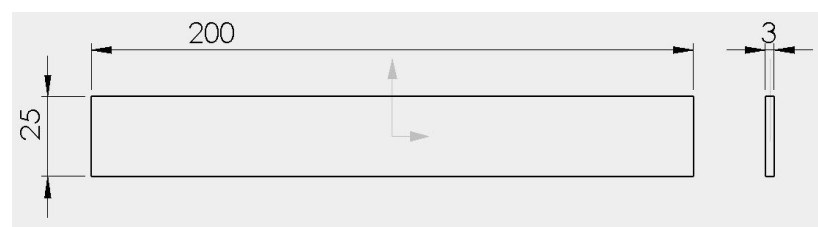
Fonte: Catálogo Hyspex, 2018.

Para a fabricação dos corpos de prova foi preciso serrar a barra chata em 12 unidades com tamanhos iguais de 200 mm. Onde, os doze corpos de prova foram divididos em três famílias.

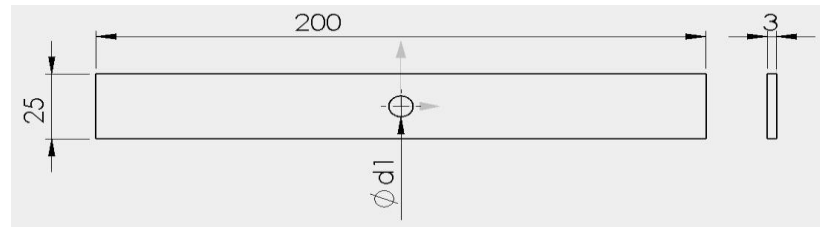
- A família “A” com nenhum tipo de furo;
- A família “B” com um furo centralizado;
- A família “C” com três furos, no qual um único furo foi centralizado e mais dois furos feitos equidistantes do furo do centralizado.

As dimensões finais dos corpos de prova podem ser visualizadas na Figura 22.

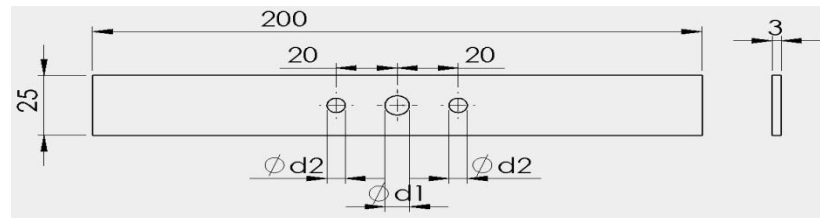
Figura 22 - Corpos de Prova esquematizados. (a) Família A, (b) Família B e (c) Família C.



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autoria própria, 2018.

Para os furos foram utilizados duas brocas de diâmetros diferentes, com $d1 = 8 \text{ mm}$ e $d2 = 7 \text{ mm}$, como mostrado na Figura 23.

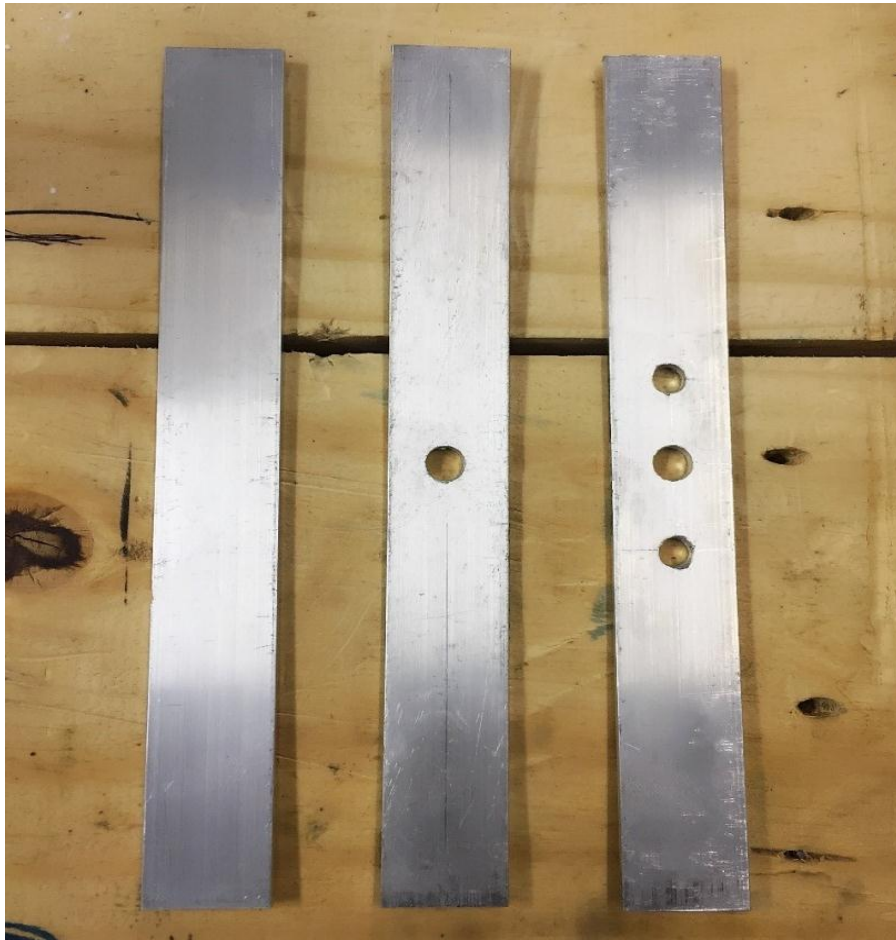
Figura 23 - Brocas utilizadas no processo de furação dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A Figura 24 ilustra os corpos de prova finais para os diferentes entalhes. Sendo assim as amostras finais para a realização dos ensaios de tração. O quantitativo de corpos de prova trabalhados pode ser observado na Tabela 1.

Figura 24 - Corpos de prova finalizados para ensaio.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Tabela 1 - Quantidade de corpos de prova para o ensaio de tração.

CP's	Ø 8 mm	Ø 7 mm	Quantidade
A	0	0	4
B	1	0	4
C	1	2	4
TOTAL			12

Fonte: Autoria própria, 2018.

3.1.2 Procedimento Experimental

Os ensaios foram realizados em uma máquina universal de tração hidráulica EMIC DL-10000 com capacidade de 100 kN, como mostra a Figura 25.

Todos os doze corpos de prova utilizados para o ensaio de tração foram ensaiados até a sua fratura. Com auxílio do Software TESC, foram fornecidos ao sistema os dados sobre o corpo de prova e os parâmetros para realização dos ensaios, e, obtidos dados como o tempo de ensaio em segundos, a deformação em milímetros e a força de tração em newtons do corpo de prova. Os dados foram tratados com auxílio de planilhas eletrônicas do Excel®, onde foi possível gerar um gráfico de tensão versus deformação para cada corpo de prova para uma plausível comparação. Para uma comparação mais exata foi descartada de cada família o corpo de prova que mais se afastava entre os dados obtidos de ensaio, e com isso, utilizado na prática como meio de estudo e comparação apenas três corpos de prova dentro de cada família, totalizando nove amostras no total.

Figura 25 - Máquina universal de ensaios.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Para o estudo do caso foi levado em consideração alguns parâmetros como observados abaixo:

- Caracterização da área: Todos os corpos de prova possuíam área da seção transversal de $A = 75 \text{ mm}^2$;
- Velocidade do ensaio: Determinada de acordo com a taxa de deformação desejada e com o comprimento útil do corpo de prova;
- Limite de força: 100 kN;
- Gráfico a ser plotado: Tensão *versus* deformação;
- Quando parar o ensaio: Após a ruptura do corpo de prova.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros dos ensaios de tração. A velocidade de deformação usual para os ensaios foi calculada de acordo com o comprimento útil, que é a medida considerada do corpo de prova preso nas garras da máquina e a taxa de deformação.

Tabela 2 - Parâmetros de ensaio.

Corpos de Prova	Comprimento útil (mm)	Taxa de deformação (mm/mm.s)	Velocidade (mm/s)
Alumínio 6063	100	5 (10^{-4})	0,05

Fonte: Autoria própria, 2018.

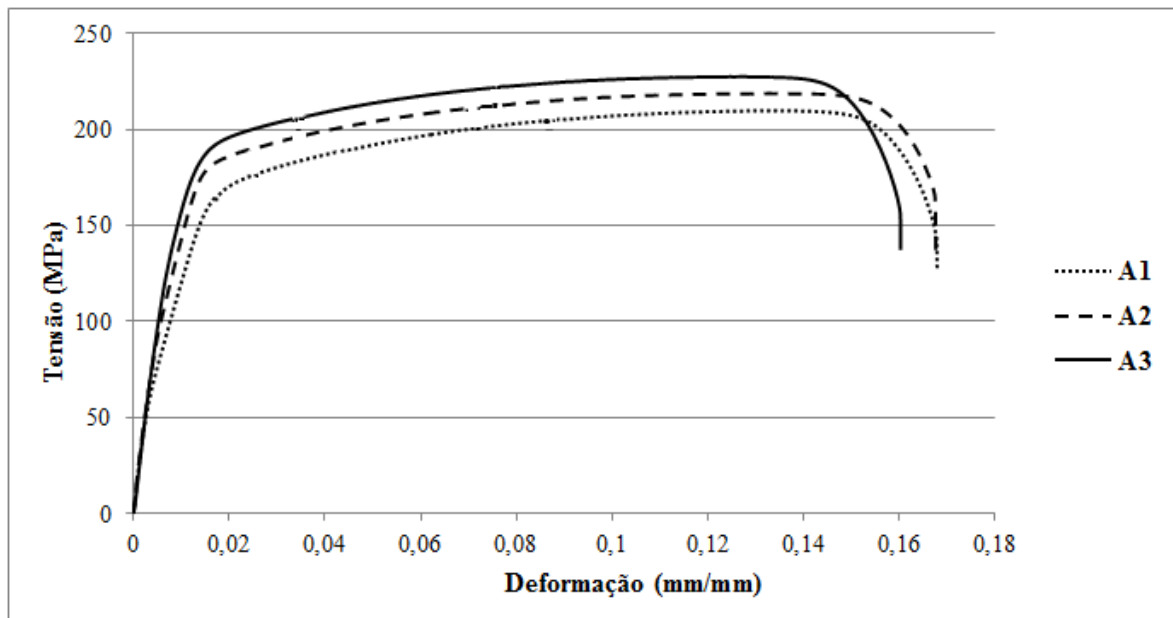
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 RESULTADOS OBTIDOS

4.1.1 Corpo de Prova – Família A

Os corpos de prova que compõem a Família A não possuem furo, apresentando assim, nenhum concentrador de tensão. O Gráfico 1 mostra a relação entre as curvas Tensão *versus* Deformação de cada corpo de prova que formam a Família A, tais dados são oriundos dos ensaios de tração realizados.

Gráfico 1 - Diagrama Tensão *versus* Deformação - Família A.



Fonte: Autoria própria, 2018.

A partir das amostras dos corpos de prova da Família A e com uma análise do Gráfico 1 é possível determinar algumas de suas propriedades. Tais propriedades podem ser observadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades obtidas - Família A.

Família A	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Alongamento (AL%)	Deformação de Ruptura
A1	166,373	209,747	126,509	16,787	0,16787
A2	172,480	218,720	134,027	16,760	0,16760
A3	178,187	227,520	137,200	16,024	0,16024
Média	172,347	218,662	132,579	16,524	0,16524
Desvio Média	3,9824	5,9436	4,0464	0,333	0,00333

Fonte: Autoria própria, 2018.

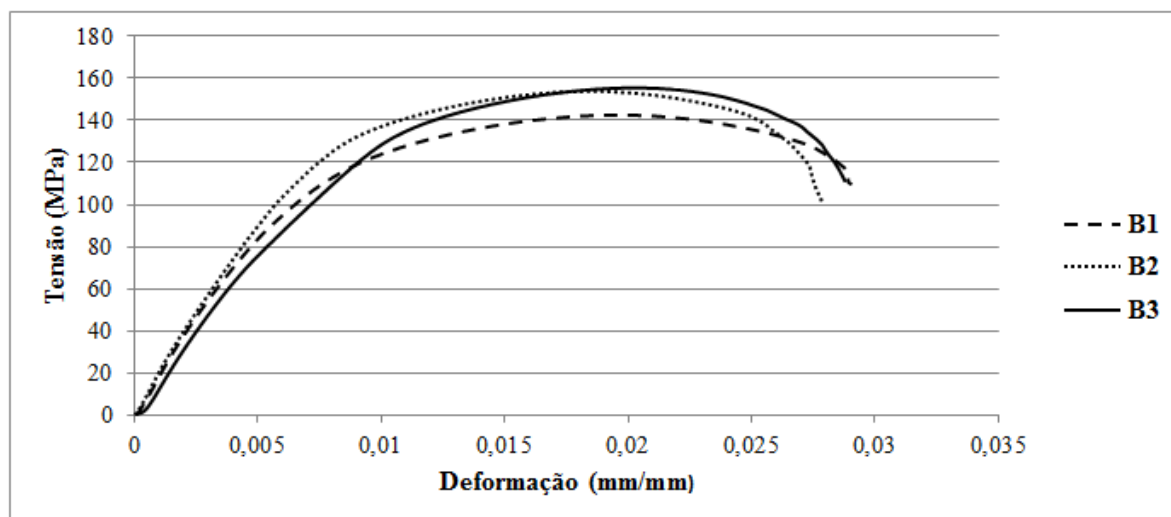
Os corpos de prova da Família A sem concentrador de tensão possui Limite de Resistência à Tração mínima segundo a literatura de 151,022 MPa. Para uma comparação com a literatura foram calculadas as médias para as propriedades mecânicas em análise de todos os corpos de prova para a Família A como na Tabela 1. Assim podemos observar um Limite de Escoamento de 172,347 MPa, um Limite de Resistência à Tração de 218,662 MPa e um Alongamento em percentual de AL (%) = 16,524.

O Fator Geométrico de Concentração de Tensão para o corpo de prova sem concentradores de tensão é considerado o valor nominal ($Kt = \sigma_{m\acute{a}x}/\sigma_0 = 1$, onde a tensão máxima é dada pelo Limite de Resistência a Tração e é semelhante a tensão nominal para corpo de prova sem concentrador de tensão, assim sendo $\sigma_0 = 218,662$ MPa o valor da nossa tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$).

4.1.2 Corpo de Prova – Família B

Através do Gráfico 2, pode-se observar as curvas Tensão *versus* Deformação para os corpos de prova da Família B oriundos dos ensaios de tração.

Gráfico 2 - Diagrama Tensão *versus* Deformação - Família B.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Por meio do Gráfico 2 podemos extrair as propriedades mecânicas dos respectivos ensaios onde detalhamos na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades obtidas - Família B.

Família B	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Alongamento (AL%)	Deformação de Ruptura
B1	108,565	142,520	109,509	2,0965	0,02907
B2	115,563	153,773	101,353	2,7853	0,02785
B3	114,961	155,440	110,712	2,8806	0,02881
Média	113,030	150,578	107,191	2,5875	0,02857
Desvio Média	2,976	5,372	3,892	0,327	0,00048

Fonte: Autoria própria, 2018.

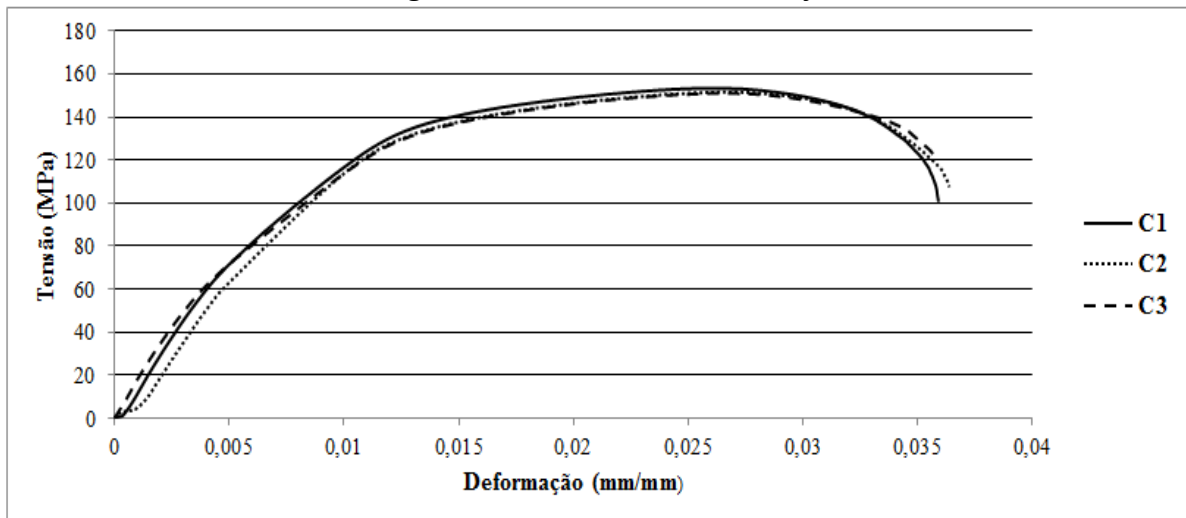
Na Tabela 4 têm-se as médias para os corpos de prova para a Família B, como o Limite de Escoamento de 113,030 MPa, Limite de Resistência à Tração de 150,578 MPa e um Alongamento em porcentagem de AL (%) = 2,5875.

O Fator Geométrico de Concentração de Tensão Médio para os corpos de prova para a Família B pode ser calculado levando como método de comparação o Limite de Tensão à Resistência Médio dos corpos de prova da família A, $\sigma_0 = 218,662$ MPa, sendo essa o valor da nossa tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$). Portanto, $Kt = \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_0} = \frac{218,662}{150,578} = 1,45$.

4.1.3 Corpo de prova – Família C

Através dos dados obtidos por meio dos ensaios de tração para os corpos de prova da Família C, é possível plotar um terceiro conjunto de curvas Tensão *versus* Deformação como mostrado no Gráfico 3.

Gráfico 3 - Diagrama Tensão *versus* Deformação - Família C.



Fonte: Autoria própria, 2018.

Com base no Gráfico 3 foi possível obter assim, como para os corpos de prova anteriores suas propriedades mecânicas, como observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades obtidas - Família C.

Família C	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Alongamento (AL%)	Deformação de Ruptura
C1	109,467	153,333	100,58	3,5899	0,03590
C2	122,989	151,573	107,492	3,6367	0,03637
C3	111,956	151,027	120,498	3,5824	0,03582
Média	114,804	151,978	109,523	3,6030	0,03603
Desvio Média	5,457	0,904	7,316	0,0225	0,00022

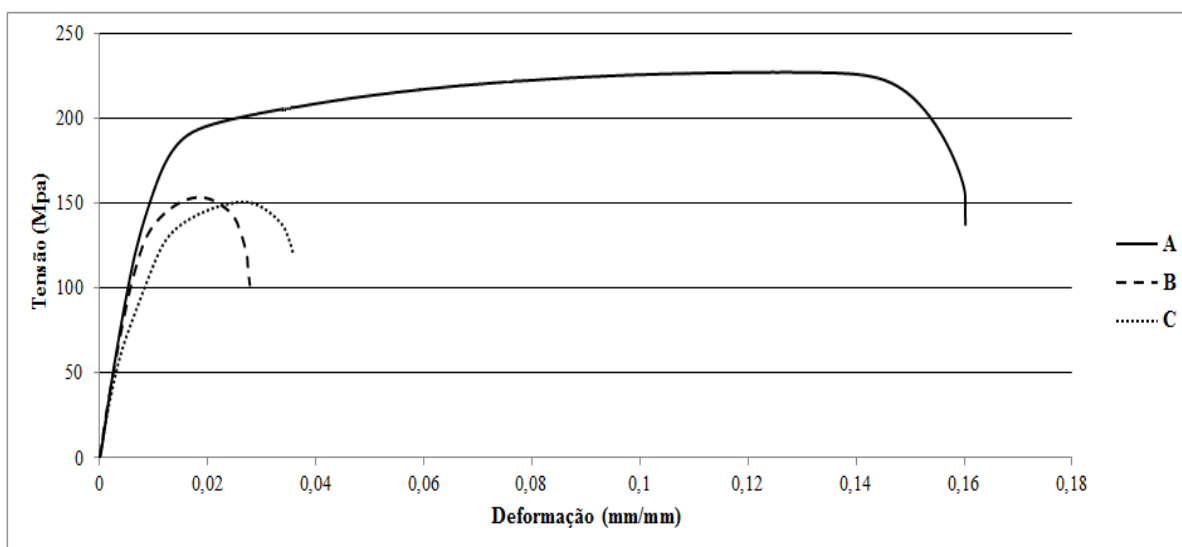
Fonte: Autoria própria, 2018.

Com base na Tabela 5 observamos as médias para os corpos de prova para a Família C, como o Limite de Escoamento de 114,804 MPa, Limite de Resistência à Tração de 151,978 MPa e um Alongamento em porcentagem de AL (%) = 3,6030.

O Fator Geométrico de Concentração de Tensão Médio para os corpos de prova para a Família B pode ser calculado levando como método de comparação o Limite de Tensão à Resistência Médio dos corpos de prova da Família A, $\sigma_0 = 218,662$ MPa, sendo essa o valor da nossa tensão máxima (σ_{max}). Portanto, $Kt = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = \frac{218,662}{151,978} = 1,44$.

4.1.4 Análise das médias dos corpos de prova – Um comparativo entre as Famílias.

Após um estudo individual de todos os corpos de prova e os cálculos de todas as respectivas médias do Limite de Escoamento (MPa), Limite de Resistência à Tração (MPa), Limite de Ruptura (MPa) e o Alongamento (%), foi possível uma comparação entre as amostras das Famílias A, B e C. Como forma de entender melhor a análise dos resultados provenientes do experimento, o Gráfico 4 apresenta as curvas experimentais médias Tensão versus Deformação para cada amostra ensaiada, sendo possível realizar tal comparação.

Gráfico 4 - Diagrama Tensão *versus* Deformação - Comparativo entre as Famílias.

Fonte: Autoria própria, 2018.

Ao observar o Gráfico 4 podemos observar com bastante expressividade as diferenças entre as propriedades mecânicas principalmente quando se atenta para a comparação dos corpos de prova B e C com seus devidos concentradores de tensão. É possível observar o comportamento dos corpos de prova ao longo do ensaio, mostrando que ao diminuir a área do corpo de prova introduzindo os furos, o material reduz sua zona plástica, pois estavam sob maiores valores de tensão, se rompendo mais facilmente sem deformar-se muito, pois devida a presença dos concentradores de tensão o material vai se fragilizando mais facilmente. Uma comparação mais definida dos valores observa-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Médias das propriedades obtidas.

Médias	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência à Tração (MPa)	Limite de Ruptura (MPa)	Alongamento (AL%)	Deformação de Ruptura
Família A	172,347	218,662	132,579	16,5237	0,16524
Família B	113,030	150,578	107,191	2,5875	0,02857
Família C	114,804	151,978	109,523	3,6030	0,03603

Fonte: Autoria própria, 2018.

Na Tabela 6 é mostrado um comparativo para os diferentes corpos de prova. Foi feito uma média entre os valores das tensões e deformações para os correspondentes corpos de prova. Com base nos dados podemos concluir que as propriedades mecânicas para as amostras da Família A são todos superiores em comparação as demais amostras das Famílias B e C, principalmente para o parâmetro de ensaio apresentado pelo alongamento em porcentagem, com quase 4x mais. Ou seja, por não apresentar nenhum furo, os corpos de prova se deformaram até a ruptura aproximadamente 4x mais.

Por fim, comparando os corpos de prova das Famílias B e C, temos que C apresenta propriedades mecânicas quase pareadas com B, tendo pouca diferença, mesmo apresentando dois furos menores a mais, promovendo assim uma Deformação de Ruptura minimamente maior, assim como também apresentado no Gráfico 4.

A análise para o Fator Geométrico de Concentração de Tensão de todas as amostras pode ser concluída levando por base a Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo dos concentradores de tensão para todos os corpos de prova.

Fator Geométrico de Concentração de Tensão		
Famílias	K_t	%
A	1	0
B	1,45	45
C	1,44	44

Fonte: Autoria própria, 2018.

Devido os corpos de prova das Famílias B e C apresentarem furos, a intensidade do concentrador de tensão tende a aumentar, e isso é nítido na Tabela 7, a intensidade do concentrador de tensão aumenta tanto para B quanto para C.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo verificar o comportamento de concentradores de tensão quando submetidas à tração axial. Levando assim como base de comparação corpos de prova de alumínio com mesmos aspectos geométricos, contando com a ausência de furos. No qual esses furos atuavam como concentradores de tensão, o que possibilitava o rompimento dos corpos de prova sem grandes deformações. A presença de furos fez com que a área de seção transversal diminuísse, fazendo com que o corpo de prova se rompesse mais rapidamente.

Os corpos de prova livres de concentradores de tensão teve um comportamento semelhante ao de um material dúctil, deformando-se plasticamente até a sua ruptura. Após a plotagem dos gráficos Tensão *versus* Deformação, foi possível ilustrar o comportamento dos corpos de prova na presença de concentradores de tensão, na qual romperam-se mais facilmente. Para o Fator Geométrico de Concentração de Tensão tivemos que a presença de furos localizados em outros lugares no material pode-se diminuir a concentração de tensão sobre o furo centralizado em estudo. Sendo assim o resultado pertinente com que a literatura sobre o tema explicita.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. 2007.

BEER, F. P. **Mecânica dos Materiais**. Ferdinand P. Beer: 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

BUDYNAS, Richard. **Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. Richard Budynas, J. Keith Nisbett: 8. ed. – Porto Alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais, uma Introdução**. 7ª Edição, Ed. Guanabara, 2008.

DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. George E. Dieter. – 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

FRANQUETTO, PAULO R. “Otimização Paramétrica de Concentradores de Tensões Clássicas”. Projeto Final de Curso II, UTFPR – Curitiba, 2007.

GERE, James M. **“Mecânica dos Materiais”**. James M. Gere, Barry J. Goodno: São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

HIBBELER, Russell. C. **Resistência dos Materiais**. 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

MARSHEK, Kurt M.. **Design of machine and structural parts**. New York: J. Wiley, 1987.

NORTON, Robert L. **“Projeto de Máquinas: Uma abordagem integrada”**. Robert L. Norton: 4. ed. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

PILKEY, Walter D. **Peterson’s Stress Concentration Factors**. 2a ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997.

ROSA, E da. **Análise de Resistência Mecânica – Mecânica da Fratura e Fadiga**. Edison da Rosa – UFSC, 2002.

SARKIS, M. **Mecânica Técnica e Resistência dos Materiais**. – 17. ed. Editora Erica, 2010.

TIMONSHENLO, Stephen P. **Mecânica dos Sólidos. Volume I**/ Stephen P. Timoshenlo (et) James E. Gere: Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1983.

TIMOSHENKO, Stephen. **Resistência dos Materiais**. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1976. Volume II.

YOUNG, Warren C.; BUDYNAS, Richard G. **Roark's Formulas for Stress and Strain**. 7a ed. McGraw-Hill, 2002.