



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

CENTRO DAS ENGENHARIAS

ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO PLÁCIDO STING DE PAIVA TEIXEIRA MORAIS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÃO EM UM AÇO DE
BAIXO CARBONO**

MOSSORÓ – RN

2017

FRANCISCO PLÁCIDO STING DE PAIVA TEIXEIRA MORAIS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÃO EM UM AÇO DE
BAIXO CARBONO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido UFERSA, Campus Mossoró, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante.

MOSSORÓ – RN

2017

©Todos os direitos estão reservados à 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 tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

M827a Moraes, Francisco Plácido Sting de Paiva Teixeira

·
AVALIAÇÃO DO EFEITO DE CONCENTRADORES DE
TENSÃO EM UM AÇO DE BAIXO CARBONO / Francisco
Plácido Sting de Paiva Teixeira Moraes. - 2017.
61 f. : il.

Orientador: Fabrício José Nóbrega Cavalcante.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2017.

1. Concentradores de tensão. 2. Ensaio de
tração. 3. Mecânica da fratura. 4. Falha em
materiais metálicos. 5. Aço de baixo carbono. I.
Cavalcante, Fabrício José Nóbrega, 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.

FRANCISCO PLÁCIDO STING DE PAIVA TEIXEIRA MORAIS

**AVALIAÇÃO DO EFEITO DE CONCENTRADORES DE TENSÃO EM UM AÇO DE
BAIXO CARBONO**

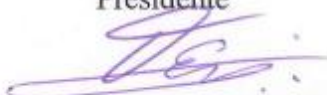
Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA,
Centro de Engenharias para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 19 / 10 / 2017.

BANCA EXAMINADORA



Fabrício José Nóbrega Cavalcante, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente



Francisco Edson Nogueira Fraga, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador



Prof. Gutemberg Ferreira Diniz, Prof. (UFERSA)
Membro Examinador

*Dedico este trabalho à memória dos meus avós:
Luiz Teixeira, “Zé de Zeca da Barra” &
Geralda Soares.*

Guardo todos em meu coração e jamais ei de esquecê-los.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, que em seu infinito amor e misericórdia ajudou a este servo durante o decorrer dessa caminhada que finalmente se encerra.

Agradeço a minha mãe Suzana pela paciência e tempo dedicado, estando sempre ao meu lado quando precisei.

Agradeço a meu pai Ranieri, por todo apoio financeiro e psicológico dedicado.

Aos meus irmãos Raony e Juliana.

Aos meus tios e tias: Francisco, Rogério, Sandra e Neide.

Ao meu orientador e amigo Fabricio Cavalcante, pessoa que admiro e estimo bastante.

Ao meu amigo de curso e com certeza para a vida toda, Gutemberg, pelas conversas, conselhos e puxões de orelhas.

Ao professor e coordenador do curso de Engenharia Mecânica Manoel Quirino, que se demonstrou primoroso para o cargo que exerce, uma vez que sempre buscou em primeiro lugar ajudar o aluno.

Aos meus amigos, pois como já dizia o rei Salomão: “Algumas amizades não duram nada, mas um verdadeiro amigo é mais chegado que um irmão”. Em especial, Rosa, Tarciana “Tátá”, Raphael Wesley, Roberta Suzy, Raimundo, Erikson, Yago, Daniel, Bruno Zalém, Sterfesson e familiares, Emanuel, Regin e ao seu pai Reginaldo, Eng. Francisco, Eilson, Vinícius, João Lucas, Hugo “exemplo”, os “caras do Kfofo” (Daniel “Sid”, Flávio “das redes”, João Batista “Jojoba”, Ítalo “Itim”, Diego “Maradona”), Raquel Padilha, primo Diogo, Crysline, Albert, Viviane Siarline, Lázaro “Lazim”, Saulo, Alex, Juarez.

Enfim, é impossível citar todos os nomes, mas de um modo geral quero agradecer a todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a concluir este curso, seja com alguma conversa, carona, qualquer coisa. Sou eternamente grato a todos vocês

“No final, nos damos conta de que os que ficam para trás não são os que se atrasam, mas os que desistem.”

Autor desconhecido.

RESUMO

A maioria dos elementos de máquinas reais tem seções transversais não uniformes. Equipamentos como eixos são geralmente fabricados com diâmetros diferentes para que desse modo possam acomodar rolamentos, engrenagens, polias, etc. Eixos podem ter sulcos para anéis elásticos/vedação ou ter rasgos e furos para fixação de outros elementos. Parafuso podem ter roscas e cabeças maiores que suas hastes. Quando um equipamento ou componente estrutural contém qualquer uma dessas descontinuidades na geometria de sua seção transversal, podem ocorrer altas valores de tensões localizadas em pontos próximos dessas descontinuidades. Tais pontos são frequentemente chamados de concentradores de tensão. Com isso, cabe ao engenheiro determinar se tais tensões irão ultrapassar a tensão admissível do material provocando a falha do equipamento ou estrutura. Partindo-se desse pressuposto o presente trabalho teve por objetivo analisar o efeito de concentradores de tensão no comportamento e em algumas propriedades de corpos de prova fabricados a partir uma barra retangular de aço de baixo carbono, SAE 1020. A análise foi feita através das informações retiradas das curvas de tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia obtidas a partir do ensaio mecânico de tração convencional. Os concentradores de tensão presente nos corpos de prova foram furos de diferentes diâmetros. Percebeu-se através das análises que existiu significativamente nas propriedades avaliadas, mudanças em função da existência de concentradores de tensão. Verificou-se uma forte tendência do material dúctil se comportar de modo frágil quando este, na presença de um concentrador de tensão severo foi sobrecarregado, exibindo de tal modo pouco ou nenhum escoamento antes de sua ruptura. Também foi observado nos corpos de prova com concentradores de tensão que a medida que se aumentava a intensidade do concentrador, os valores do Limite de Resistência a Tração e Limite de Ruptura tendiam a se aproximarem bastante, e que quanto maior esse efeito, tal fenômeno começava também a ser observado para com os valores de Limite de escoamento. Determinou-se o fator de concentração para cada situação avaliada. Ao final do trabalho percebeu-se a importância do estudo de concentradores de tensão bem como a necessidade do profissional da engenharia mecânica em tê-lo.

Palavras-chave: Concentradores de tensão. Ensaio de tração. Mecânica da fratura. Falha em materiais metálicos. Aço de baixo carbono.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barra prismática sob tração.....	15
Figura 2 - Fratura totalmente dúctil (a); Fratura moderadamente dúctil (b); Fratura sem qualquer deformação plástica (c).....	18
Figura 3: Análise das seções “a-a”, “b-b” e “c-c” de uma barra retangular que se deforma elasticamente.	20
Figura 4 - Distribuição de tensão em uma barra achatada com um furo circular.....	21
Figura 5 - Fator K de concentração de tensão para barras achatadas com furos circulares.	22
Figura 6 - Diagrama tensão – deformação convencional para um aço estrutural típico em tração (sem escala).	27
Figura 7 - Diagrama tensão – deformação convencional; determinação do limite de escoamento.	28
Figura 8 - Diagrama tensão – deformação convencional; representação do Limite de Escoamento Superior e Inferior.	29
Figura 9 - Representação esquemática do Diagrama tensão – deformação para um material dúctil e um frágil.	31
Figura 10 - Corpo de prova de seção retangular para ensaio de tração.	32
Figura 11 - Fluxograma das atividades – Metodologia.	34
Figura 12 - Dimensões dos três tipos de amostras de corpos de prova; (a) amostra C.P. 1; (b) amostra C.P. 2; (c) amostra C.P. 3.	36
Figura 13 - Processo de furação dos corpos de prova.	37
Figura 14 - Brocas utilizadas para furação das amostras C.P. 2 e C.P. 3; D1 = 7,94 mm; D2 = 12,70 mm.....	37
Figura 15 - Corpos de prova, finalizados; C.P. 1 - Sem furo; C.P. 2 - com furo D1; C.P. 3 - com furo D2.....	38
Figura 16 - Máquina Universal de Ensaio EMIC do laboratório da UFERSA.....	40
Figura 17 - Corpo de prova já rompido (amostra C.P. 1).....	41
Figura 18 - Corpo de prova fraturado – amostra C.P. 1.	51
Figura 19 - Corpo de prova fraturado – amostra C.P. 2.	52
Figura 20 - Corpo de prova fraturado – amostra C.P. 3.	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas tensão de engenharia VS deformação de engenharia – amostra C.P. 1 sem furo.	42
Gráfico 2 - Curva tensão de engenharia VS deformação de engenharia (ampliado) – Corpo de Prova 1.0 sem furo.	44
Gráfico 3 - Curvas tensão de engenharia VS deformação de engenharia – amostra C.P. 2 com furo “D1”.	45
Gráfico 4 - Curva tensão de engenharia VS deformação de engenharia (ampliado) – Corpo de Prova 2.1 com furo “D1”.	47
Gráfico 5 - Curvas tensão de engenharia VS deformação de engenharia – amostra C.P. 3 com furo “D2”.	48
Gráfico 6 - Curva tensão de engenharia VS deformação de engenharia (ampliado) – Corpo de Prova 3.0 com furo “D2”.	49
Gráfico 7 - Curvas tensão de engenharia VS deformação de engenharia – Média das amostras	50
Gráfico 8 - Propriedades médias das amostras $\pm$ desvio padrão: Limite de Escoamento, Limite de Resistência à Tração e Limite de Ruptura. Teste <i>ANOVA one-way</i> seguido de teste de <i>Tukey</i> com grau de significância de 5%. ** $P < 0,01$; *** $P < 0,0001$	53
Gráfico 9 - Propriedades médias das amostras $\pm$ desvio padrão: Alongamento até à ruptura (ΔL %). Teste <i>ANOVA one-way</i> seguido de teste de <i>Tukey</i> com grau de significância de 5%. ** $P < 0,01$; *** $P < 0,0001$	54
Gráfico 10 - Propriedades médias das amostras $\pm$ desvio padrão: Deformação de engenharia até à ruptura. Teste <i>ANOVA one-way</i> seguido de teste de <i>Tukey</i> com grau de significância de 5%. ** $P < 0,01$; *** $P < 0,0001$	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do Aço 1020 ABNT/SAE/AISI (% em massa).	24
Tabela 2 - Propriedades e características mecânicas do Aço SAE 1020 laminado a quente e seus equivalentes e aplicações típicas.	24
Tabela 3 - Intervalo estimado para as propriedades do Aço SAE 1020.	25
Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova Método MB – 4 (ABNT) e E8 (ASTM).	33
Tabela 5 - Características das amostras e Parâmetros do ensaio.	39
Tabela 6 - Características Dimensionais da amostra C.P. 1 (Sem furo).	42
Tabela 7 - Propriedades obtidas – amostra C.P. 1 sem furo.	43
Tabela 8 - Características Dimensionais da amostra C.P. 2 – Com furo “D1”.	45
Tabela 9 - Propriedades obtidas – amostra C.P. 2 com furo “D1 = 7,94 mm”	46
Tabela 10 - Características Dimensionais da amostra C.P. 3 – Com furo “D2”.	48
Tabela 11 - Propriedades obtidas – amostra C.P. 3 com furo “D2 = 12,70 mm”	49
Tabela 12 - Análise comparativa entre as propriedades médias das amostras: Limite de Escoamento, Limite de Resistência à Tração e Limite de Ruptura.	54
Tabela 13 - Análise comparativa entre as propriedades médias das amostras: Deformação de Engenharia até a ruptura e Alongamento até a ruptura (ΔL %).	56
Tabela 14 - Valor estimado do concentrador de tensão médio para as amostras C.P. 1 – sem furo, C.P. 2 – com furo “D1” e C.P. 3 – Com furo “D2” – Análise de uma região suficientemente distante do furo.	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos.....	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivos específicos.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Conceitos sobre membros carregados axialmente.....	15
2.1.1 Membros carregados axialmente	15
2.1.2 Barras prismáticas e tensão normal em uma barra prismática.....	15
2.1.3 Deformação normal	16
2.1.4 Lei de Hooke	16
2.2 Fundamentos e conceitos sobre falhas em materiais metálicos	17
2.2.1 Fratura em materiais metálicos.....	17
2.2.2 Fratura dúctil	17
2.2.3 Fratura frágil.....	18
2.3 Conceitos sobre resistência a fratura em materiais com concentradores de tensão ..	19
2.3.1 Materiais dúcteis e frágeis e o efeito da concentração de tensão	19
2.3.2 Concentrações de tensão em membros carregados axialmente	19
2.3.3 Princípio de Saint – Venant.....	20
2.3.4 Fatores de concentração de tensão.....	21
2.4 Aços	23
2.4.1 Definição de aços.....	23
2.4.2 Aço SAE 1020	23
2.5 Propriedades mecânicas dos materiais	25
2.5.1 O ensaio de tração.....	25
2.5.2 Diagrama tensão – deformação convencional	26
2.5.3 Comportamento da tensão e deformação de materiais dúcteis e frágeis	30

2.5.4 Diagrama tensão – deformação real X Diagrama tensão – deformação convencional ...	31
2.5.5 Corpos de prova para ensaio de tração convencional.....	32
2.5.6 Corpos de prova não normatizados para ensaios de tração convencional.....	33
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Metodologia.....	34
3.2 Preparação dos corpos de prova	35
3.2.1 Obtenção do material.....	35
3.2.2 Definição das dimensões dos corpos de prova	35
3.2.3 Processo de usinagem.....	36
3.3 Procedimento experimental	38
3.3.1 Definição dos parâmetros do ensaio	38
3.3.2 Ensaio de tração convencional	39
3.4 Obtenções dos dados.....	41
3.4.1 Dados fornecidos pela máquina, tratamento e geração dos gráficos.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Resultados obtidos	42
4.1.1 Resultados obtidos – amostra C.P. 1	42
4.1.2 Resultados obtidos – amostra C.P. 2	44
4.1.3 Resultados obtidos – amostra C.P. 3	47
4.1.4 Análise dos resultados – Média das amostras	50
4.1.5 Fator de concentração de tensão “K”	56
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
5.1 Conclusão	59
5.2 Sugestões para estudos futuros.....	59
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

A maioria dos elementos de máquinas reais tem seções transversais não uniformes. Equipamentos são geralmente fabricados com seções diferentes para que desse modo possam acomodar rolamentos, engrenagens, polias, etc. Elementos de máquinas podem ter sulcos para anéis elásticos/vedação ou ter rasgos e furos para fixação de outros elementos. Quando um equipamento ou componente estrutural contém qualquer uma dessas descontinuidades na geometria de sua seção transversal, podem ocorrer altas valores de tensões localizadas em pontos próximos dessas descontinuidades. Tais pontos são frequentemente chamados de “concentradores de tensão” (NORTON, 2013; GERE e GOODNO, 2013).

De acordo com Budynas (2011), as concentrações de tensão também podem surgir de algumas irregularidades não inerentes ao elemento, como furos, ranhuras, entalhes, marcas e defeitos ocasionados por processos de fabricação, etc. De tal modo que é possível estimar uma tensão nominal se o elemento livre de concentrações de tensão.

Ao se estudar a fratura de materiais é comum depara-se com a análise de concentração de tensão. A fratura por sua vez consiste na separação de um corpo sólido em duas ou mais partes pela ação de tensões (CALLISTER, 2002). Para Shigley (2011), a falha ou fratura pode significar que a peça além de ter sido separada em dois ou mais pedaços; tenha se tornado permanentemente distorcida, arruinando assim sua geometria, função e confiabilidade depreciada.

Na engenharia é indesejável que materiais venham a falhar, uma vez que vidas humanas podem ser colocadas em risco, podem haver custos desnecessários, indisponibilidade de produtos bem como de serviços essenciais. De tal modo que, apesar das causas dessas falhas serem conhecidas (seleção e processamento inadequado de materiais, má utilização de componentes importantes, projeto inadequado, etc.) a sua prevenção é algo difícil de garantir (CALLISTER, 2002). Daí a importância do profissional da engenharia mecânica em antecipar e planejar para que caso uma falha ocorra, buscar entender suas causas e tomar as medidas necessárias para que isso não venha a se repetir.

Deste modo, é claramente perceptível a importância deste estudo que teve como objetivo analisar a influência de um concentrador de tensão no comportamento e em algumas propriedades de uma barra retangular de aço de baixo carbono SAE 1020.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo através de ensaios mecânicos de tração convencional, analisar a influência de concentradores de tensão no comportamento e em algumas propriedades de uma barra retangular de aço de baixo carbono SAE 1020.

1.1.2 Objetivos específicos

- Verificar, coletar e entender os fundamentos e conceitos teóricos sobre falhas em materiais metálicos, bem como os conceitos sobre concentradores de tensão atuando em tais materiais.
- Executar o ensaio tração – convencional com carga axial em corpos de prova fabricados a partir de uma barra retangular laminada de aço de baixo carbono SAE 1020, com furos em sua seção transversal, variando-se o tamanho do furo.
- Utilizar os conhecimentos e conceitos aferidos para analisar e avaliar os resultados obtidos experimentalmente, observando algumas propriedades do material e como o mesmo se comportou para cada geometria de concentrador.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Conceitos sobre membros carregados axialmente

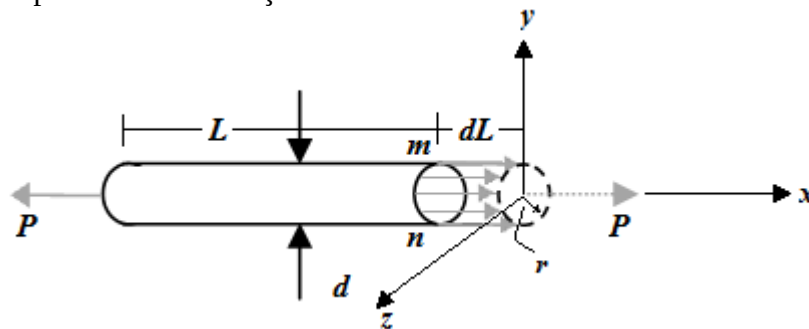
2.1.1 Membros carregados axialmente

Membros carregados axialmente são componentes estruturais submetidos apenas à tensão ou compressão. Os tipos mais comuns são barras sólidas com eixos longitudinais retos (barras de treliças, colunas em prédios, suportes em armações de motores de avião) (GERE e GOODNO, 2013)

2.1.2 Barras prismáticas e tensão normal em uma barra prismática

Uma barra prismática (Figura 1) consiste em um membro estrutural com eixo longitudinal retilíneo e uma seção transversal constante ao longo de seu comprimento. Deve-se ter em mente que membros estruturais podem apresentar uma variedade de formas de seções transversais. São exemplos: seções transversais rígidas ou vazadas com formato circular ou retangular, ou podem apresentar perfis padronizados (GERE e GOODNO, 2013).

Figura 1 - Barra prismática sob tração.



Fonte: Autoria Própria (2017).

Representada pela letra grega σ (sigma), a Tensão normal ou Tensão de engenharia (Equação 1) é dada como força por unidade de área (que no sistema SI é representado por N/m²). Geralmente atua em superfícies planas, sendo considerada como o quociente entre a carga “P” que provoca essa tensão e área “A” de distribuição da mesma (Figura 1).

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

2.1.3 Deformação normal

Uma barra prismática (Figura 1) mudará de comprimento quando for aplicada de forma axial tração ou compressão. O alongamento dL dessa barra é resultado do estiramento de todo o material através do volume da barra, considerando a barra como sendo de um único material.

A Deformação normal, nominal, ou Deformação de engenharia (Equação 2) será representada pela letra grega ε (épsilon) e será definida como a variação de comprimento da barra dividida pelo seu comprimento inicial, logo será uma quantidade adimensional (não possui unidades), sendo às vezes expressa em forma de porcentagem. De tal modo:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}, \quad (2)$$

Se a barra estiver sofrendo tração, temos uma deformação de tração, onde o material será alongado axialmente (terá sinal positivo). Se a barra estiver sofrendo deformação de compressão ela encurtará (terá sinal negativo) (GERE e GOODNO, 2013).

2.1.4 Lei de Hooke

Quando um material exibe comportamento elástico, haverá uma relação linear entre a tensão e a deformação sofrida por ele, isso quer dizer que sua curva de tensão-deformação começa com uma reta passando através da origem. Os materiais que exibem esse tipo de comportamento são chamados materiais elásticos lineares. Este comportamento é de extrema importância em engenharia, pois ao projetar uma estrutura que funcione nessa região de linearidade, pode ser evitado que a mesma sofra deformações permanentes devido ao escoamento (BEER, et al., 2011).

A relação linear entre tensão e deformação em uma barra que sofre tração (Figura 1) pode ser expressa pela Equação 3.

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

Onde “ σ ” é a Tensão axial ou Tensão normal, “ ε ” a deformação normal definida anteriormente (Equação 2) e “ E ” é a constante de proporcionalidade conhecida como módulo de Elasticidade de Young do material, ao qual é dado pela inclinação do diagrama de tensão-deformação na região elástica linear. A unidade de “ E ” é o pascal (representado no sistema SI como: N/m²). A Lei de Hooke é usualmente representada pela Equação 3, em homenagem ao cientista inglês Robert Hooke (1635 – 1703) (HIBBELER, 2010).

2.2 Fundamentos e conceitos sobre falhas em materiais metálicos

É indesejável na engenharia que os materiais durante suas aplicações venham a falhar. Isso por vários motivos deve ser evitado, pois vidas humanas podem ser colocadas em risco, pode haver custos desnecessários e a indisponibilidade de produtos e serviços essenciais. Apesar das causas dessas falhas serem conhecidas (seleção e processamento inapropriado de materiais, projeto inadequado ou má utilização de componentes importantes, etc.) a sua prevenção é uma condição difícil de garantir. Cabe ao engenheiro antecipar e planejar para que caso uma falha ocorra, entender suas causas e tomar as medidas necessárias para que isso não venha acontecer novamente. Desse modo faz-se perceptível a importância do estudo da Mecânica da fratura, entendendo como se dar e suas principais causas. Esse tópico pretende abordar de modo sucinto e resumido os fundamentos que serão utilizados neste trabalho sobre a mecânica da fratura em materiais metálicos.

2.2.1 Fratura em materiais metálicos

Uma fratura denominada simples consiste na separação de um corpo em dois ou mais pedaços, em condições de baixas temperaturas (quando comparada a temperatura de fusão do material), devido à aplicação de uma tensão (tração, compressão, cisalhamento ou torcional) de natureza estática.

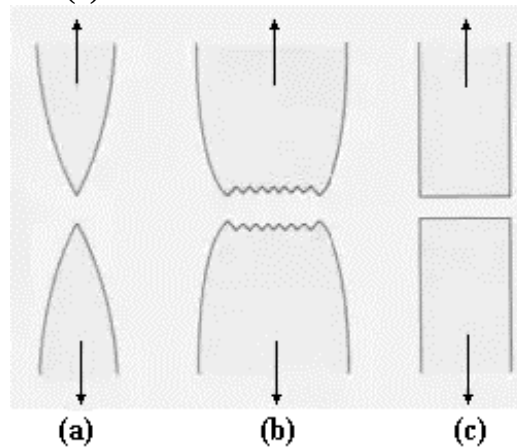
Na engenharia, existem dois tipos de fratura: a dúctil e a frágil. Elas podem ser distinguidas de acordo com capacidade que o material tem de se deformar plasticamente. Materiais dúcteis se deformam plasticamente, absorvendo grande quantidade de energia antes de sua fratura. Já os materiais frágeis quase não se deformam plasticamente, absorvendo pouca ou nenhuma energia antes de sua fratura. O processo de fratura envolve duas etapas: a formação e a propagação da trinca decorrente da imposição de uma tensão (CALLISTER, 2002).

2.2.2 Fratura dúctil

O tipo de fratura é altamente dependente da forma em que a trinca se propaga. A fratura dúctil acontece através de uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca que está a avançar. O processo é lento e acontece à medida que o comprimento da trinca vai se estendendo. Tal trinca é caracterizada como *estável*, ou seja, ela é capaz de resistir qualquer extensão adicional a menos que a tensão aplicada seja aumentada.

As superfícies de uma fratura do tipo dúctil irão possuir suas próprias características. A Figura 2 (a) e (b) mostra esquematicamente dois perfis macroscópicos característicos de uma fratura dúctil em materiais sólidos e extremamente macios em temperatura ambiente (Ex.: chumbo, ouro puro, etc.). O tipo mais comum de perfil é o da Figura 2 (b), que mostra uma quantidade de “empescoçamento” moderado (CALLISTER, 2002).

Figura 2 - Fratura totalmente dúctil (a); Fratura moderadamente dúctil (b); Fratura sem qualquer deformação plástica (c).



Fonte: Adaptado de Callister (2002).

2.2.3 Fratura frágil

Este tipo de fratura ocorre de modo repentino, sem que haja qualquer tipo de deformação plástica apreciável, caracterizado por uma rápida propagação de trinca. Trica essa que, por sua natureza é chamada de instável, de tal modo que, uma vez iniciada a trinca, sua propagação irá ocorrer de modo espontâneo, mesmo que não haja um aumento da magnitude da tensão aplicada. A direção do movimento da trinca é perpendicular à direção da tensão de tração que foi aplicada, gerando uma superfície plana. (Figura 2 (c)). Nas superfícies desses materiais é possível observar marcas com formato de “V” que são denominadas por “marcas de sargento”, que se formam próximo ao centro da seção reta da fratura, apontando para trás em direção ao ponto de iniciação da trinca (CALLISTER, 2002).

É quase sempre preferível que haja fratura dúctil ao invés de fratura frágil, pois na fratura dúctil a presença de deformação plástica “ameaça” que a presença de fratura é urgente, permitindo que o engenheiro tome as medidas preventivas em tempo hábil. Por outro lado, a fratura frágil ocorre de modo inesperado e desastroso sem que qualquer medida possa ser tomada previamente de sua ocorrência (CALLISTER, 2002).

2.3 Conceitos sobre resistência a fratura em materiais com concentradores de tensão

2.3.1 Materiais dúcteis e frágeis e o efeito da concentração de tensão

A resistência à fratura de um material sólido é consequência da força de coesão que existem entre os átomos. A resistência à fratura obtida experimentalmente para a maioria dos materiais empregados na engenharia está situada entre 10 e 1000 vezes a baixo de seu valor teórico. Griffith explica que esta relação entre a resistência à tração teórica e a resistência à fratura observada ocorria devido à existência de defeitos ou trincas de ordem microscópica que são características próprias do material. Tais defeitos reduzem a resistência à fratura do material, pois amplificam tensões que podem ser aplicadas ou concentradas nas extremidades. Como já foi mencionado anteriormente, esses defeitos devido a suas características de amplificarem uma tensão aplicada em suas localizações podem ser chamados de fatores de concentração de tensão (CALLISTER, 2002).

Quando sob aplicação de tensão, o efeito de concentração de tensão é muito mais significativo em materiais que se comportam de maneira frágil se comparado aos materiais que se comportam de maneira dúctil. Para materiais dúcteis a deformação plástica irá ocorrer quando o limite de escoamento do material for ultrapassado. Isso ocasionará uma distribuição de tensão mais uniforme, o que possibilita o desenvolvimento de um fator de concentração máximo que é menor que o valor teórico. Logo, para materiais frágeis, tal escoamento e redistribuição de tensões não ocorrem em qualquer grau significativo ao redor de defeitos ou descontinuidades (CALLISTER, 2002).

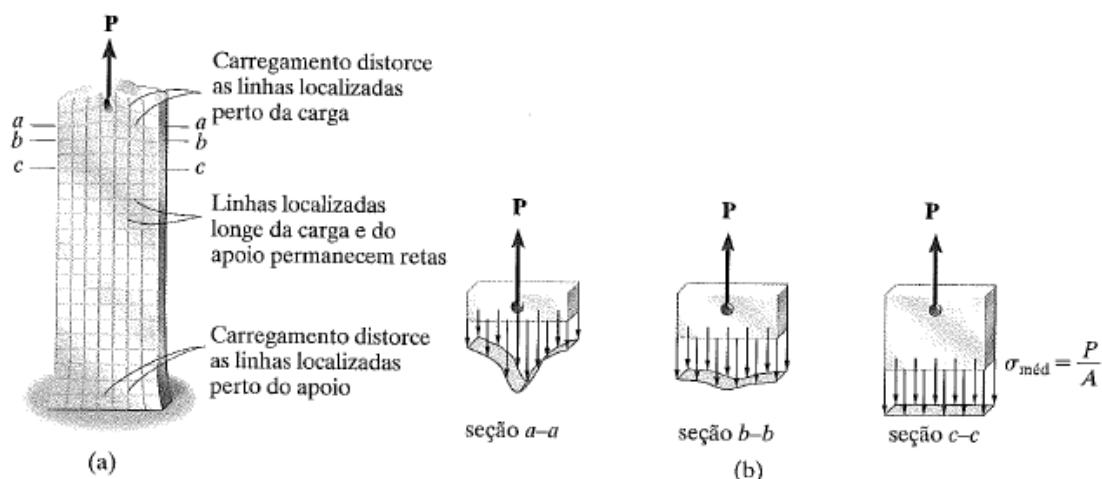
2.3.2 Concentrações de tensão em membros carregados axialmente

De um modo geral, ao se analisar barras carregadas axialmente usa-se para determinação da tensão axial a fórmula básica da Equação 1. De tal modo, que ao utilizar essa equação, parte-se do pressuposto de que a distribuição de tensão ao longo da seção transversal do elemento prismático é uniforme. Entretanto, as barras geralmente possuem furos, ranhuras, chanfros, cantos vivos, rasgos de chavetas, roscas, e outras mudanças abruptas em sua geometria, que criam perturbação no padrão uniforme de distribuição de tensão. Tais descontinuidades causam altas tensões em regiões bem pequenas das barras, fenômeno mencionado anteriormente e já conhecido como *concentrações de tensão*. As descontinuidades também podem ser interpretadas como amplificadores de tensão (GERE e GOODNO, 2013).

2.3.3 Princípio de Saint – Venant

Considera-se uma barra retangular homogênea que se deforma elasticamente quando submetida a uma força P aplicada em suas extremidades (Figura 3).

Figura 3: Análise das seções “a-a”, “b-b” e “c-c” de uma barra retangular que se deforma elasticamente.



Fonte: Hibbeler (2010).

A barra está presa em uma de suas extremidades, de modo que a força P está sendo aplicada a outra extremidade. Devido ao carregamento, a barra tende a se deformar como indicam as distorções das linhas da grade desenhada sobre a barra, que antes eram horizontais e verticais. Ao se observar a deformação localizada que ocorre em cada extremidade, verifica-se que o efeito tende a diminuir conforme as medições são feitas mais distantes das extremidades. As deformações também tendem a se nivelarem, tornando-se cada vez mais uniformes em toda a seção média da barra (seção “b-b” e seção “c-c”). Logo, pode-se afirmar que a tensão será distribuída mais uniformemente por toda a área da seção transversal se um corte for feito em uma seção distante do ponto onde a carga externa é aplicada (seção “c-c”). Em outras palavras a seção “c-c” está à distância suficiente do ponto de aplicação da carga P de modo que a deformação provocada por essa carga é desprezível (HIBBELER, 2010).

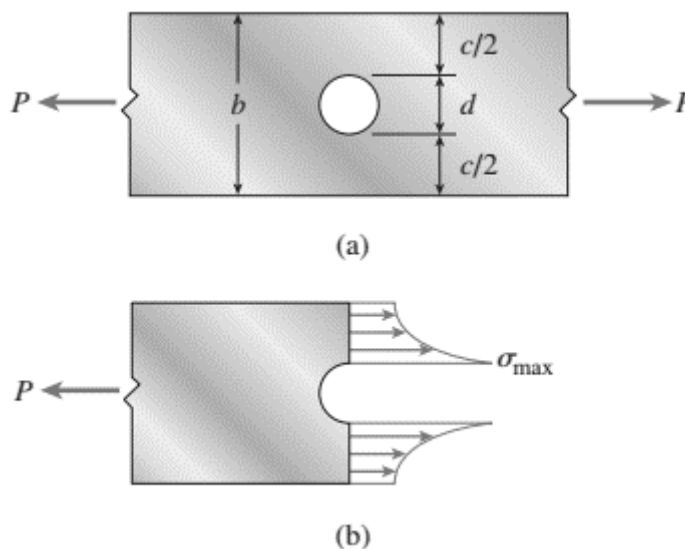
A distância mínima em relação à extremidade de aplicação da carga é considerada a que tem igualdade equivalente a *maior dimensão* da seção transversal carregada, ou seja, a seção c-c deve estar localizada a uma distância no mínimo igual à largura da barra (e não sua espessura). Tal regra não se aplica a todos os tipos de elementos e casos de carregamentos (ex.: elementos estruturais de paredes finas) (HIBBELER, 2010).

Assim pode-se fazer a afirmação geral de que: a Equação 1, para o caso sugerido, fornece as tensões axiais em uma seção transversal apenas quando esta está a uma distância igual à largura da seção transversal da barra. Tal declaração sobre as tensões em uma barra prismática é parte de uma observação mais generalizada conhecida como o *princípio de Saint-Venant*, que afirma que “os efeitos localizados causados por qualquer carga que age sobre um corpo serão dissipados em regiões suficientemente afastadas do ponto de aplicação da carga. Além do mais, a distribuição de tensão resultante nessas regiões será a mesma que a causada por qualquer outra carga estaticamente equivalente aplicada ao corpo dentro da mesma área localizada.” (GERE e GOODNO, 2013).

2.3.4 Fatores de concentração de tensão

Considere uma barra de seção transversal regular onde a mesma possui um furo circular em seu centro de modo que a mesma está submetida a uma carga ação de tração P (Figura 4 (a)).

Figura 4 - Distribuição de tensão em uma barra achatada com um furo circular.



Fonte: Gere e Goodno (2013).

A barra é estreita, possuindo uma largura b , espessura t , com um furo de diâmetro d . A Figura 4 (b) ilustra a distribuição da tensão normal que age na seção transversal através do centro do furo. A tensão máxima σ_{max} ocorre nas bordas do furo, sendo significativamente maior que a

tensão média nominal $\sigma_{nom} = P/ct$ (onde o produto $c.t$ é a área remanescente na seção transversal ao furo) (NORTON, 2013).

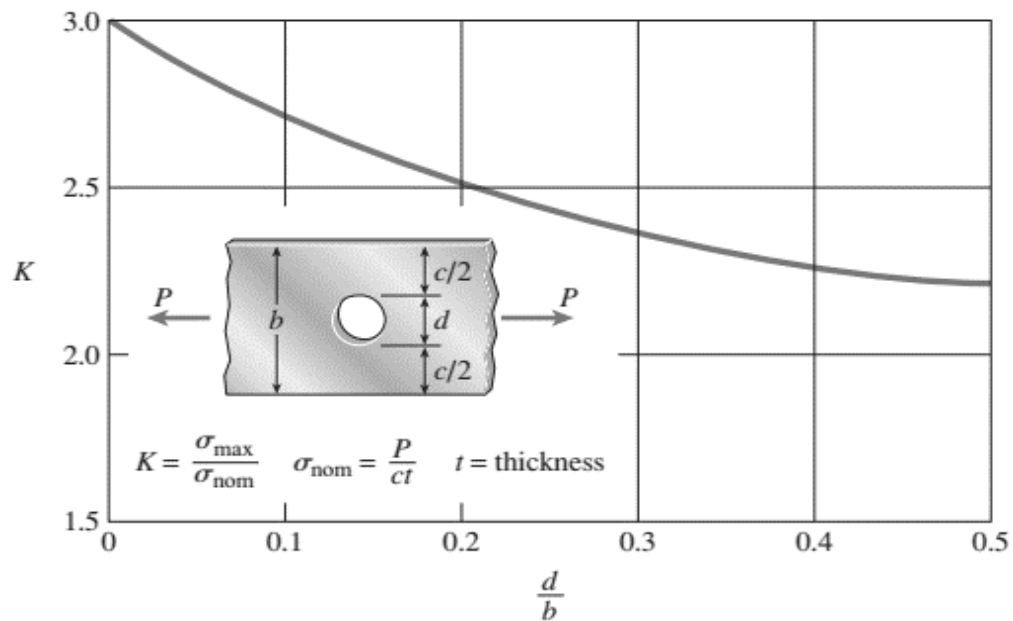
A tensão nominal geralmente é calculada pelas equações elementares de tensão e a área líquida ou seção transversal líquida, porém certas vezes usa-se em seu lugar a seção transversal total, de modo que é sempre importante checar a fonte que se obtém o valor do fator de concentração de tensão (SHIGLEY, 2011).

A intensidade de concentração de tensão será chamada de “fator de concentração de tensão teórico K_t ”, para tensões axiais nominais, sendo expressa pela Equação 4 (NORTON, 2013):

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (4)$$

A Figura 5 ilustra um gráfico para o fator de concentração K para uma barra com um furo:

Figura 5 - Fator K de concentração de tensão para barras achatadas com furos circulares.



Fonte: Gere e Goodno (2013).

Analisando o gráfico, tem-se que à medida que o furo fica maior proporcionalmente à largura da barra, K tende a ficar menor, fazendo com que o efeito da concentração de tensão não seja tão severo (GERE e GOODNO, 2013). De certo modo, isso significa dizer que o valor de K é independente das propriedades do material da barra, dependendo somente da geometria da barra e do tipo de descontinuidade (HIBBELER, 2010). Do princípio de Saint – Vernant, sabe-se que em distâncias em relação ao furo iguais a largura b da barra, a distribuição de tensão será

uniforme e igual à carga P dividida pela área total da seção transversal ($\sigma = P/bt$) (GERE e GOODNO, 2013).

Os valores do fator de concentração de tensão dado pela Figura 5 foram determinados com base em experimentos efetuados com carregamentos estáticos, considerando que a tensão no material não ultrapassa o limite de proporcionalidade. Caso o material seja muito frágil, considera-se o limite de proporcionalidade igual ao limite de ruptura, uma vez que a trinca ao surgir se propaga rapidamente, ocasionando a fratura repentina. Daí a importância de se utilizar fatores de concentração de tensão em projetos aos quais são utilizados materiais frágeis. Por outro lado, se o material for dúctil e estiver submetido à uma carga estática, os projetistas normalmente desprezam a utilização de fatores de concentração de tensão visto que nenhuma tensão que ultrapasse o limite de proporcionalidade resultará em trinca. Ao contrário o material terá resistência de reserva devido ao escoamento e endurecimento por deformação (HIBBELER 2010).

2.4 Aços

2.4.1 Definição de aços

Aços são ligas de natureza relativamente complexa, e por esse motivo sua definição não é tão simples, pois apesar de seus principais elementos serem o ferro e o carbono, eles sempre contem outros elementos além destes. Esses elementos estão presentes de forma secundária devido aos diferentes processos de fabricação. Apesar disso, algumas literaturas denominam o aço como uma liga *ferro – carbono*, que contém geralmente de 0,008% a 2,11% de carbono, além de outros elementos residuais. A máxima solubilidade do carbono no ferro corresponde ao limite inferior a 0,008%. Já a máxima quantidade de carbono que se dissolve no ferro (a uma temperatura de 1148°C) corresponde a 2,11%. Vale ressaltar que a quantidade máxima referente ao valor de 2,11% vai depender da presença ou não de elementos de liga ou resíduos em teores superiores aos normais (CHIAVERINI, 2005).

2.4.2 Aço SAE 1020

Com um teor de 0,20% de carbono, o aço SAE 1020 é um aço para construção mecânica classificado como aço carbono comum, de baixo teor de carbono, sendo um dos aços mais utilizados para aplicações que exigem tratamentos térmicos de cementação. Devido ao baixo

teor de carbono que possuem, não são tratáveis termicamente objetivando a formação de martensita, de modo que é possível se obter um aumento de sua resistência pelo trabalho a frio. Possui excelente relação custo benefício, quando comparado aos aços mais ligados para o mesmo propósito. Apresenta boa plasticidade, tenacidade, soldabilidade, baixa resistência mecânica, temperabilidade e baixa usinabilidade. A Tabela 1 mostra a sua faixa de composição química (CALLISTER, 2008):

Tabela 1 - Composição química do Aço 1020 ABNT/SAE/AISI (% em massa).

ABNT/SAE/AISI	C	Mn	P (máx)	S (máx)
1020	0,18 - 0,23	0,30 - 0,60	0,03	0,05

Fonte: Adaptado do Callister (2008).

As aplicações do aço SAE 1020 em componentes mecânicos são diversas, podendo ser citadas utilizações em engrenagens, virabrequins, eixos-comando, pinos-guia, anéis de engrenagem, catracas, capas, colunas, peças cementadas, tubos soldados, etc. (CALLISTER, 2008).

Observando a Tabela 2 é possível obter os dados sobre propriedades e características mecânicas do Aço SAE 1020 e seus equivalentes nas condições de laminado a quente bem como suas aplicações:

Tabela 2 - Propriedades e características mecânicas do Aço SAE 1020 laminado a quente e seus equivalentes e aplicações típicas.

Aço 1020 AISI/SAE/ASTM	
Propriedades	Valor
Limite de Resistência à Tração	380 Mpa
Limite de Escoamento	205 Mpa
Alongamento	25,00%
Aplicações Típicas	Tubos: Aço estrutural e em chapas

Fonte: Callister (2008).

De um modo geral, as propriedades desse aço podem ser estimadas de acordo com Monteiro (2011), pela Tabela 3:

Tabela 3 - Intervalo estimado para as propriedades do Aço SAE 1020.

Aço 1020 AISI/SAE/ASTM	
Propriedades	Valor
Limite de Resistência à Tração	394 - 441 Mpa
Limite de Escoamento	295 - 346 Mpa
Alongamento	36,50%
Módulo de Elasticidade	200 - 207 Gpa

Fonte: Adaptado de Monteiro (2011).

2.5 Propriedades mecânicas dos materiais

2.5.1 O ensaio de tração

Para que máquinas e estruturas funcionem de forma correta é importante entender o comportamento mecânico dos materiais que serão utilizados em seus componentes. Normalmente, a única maneira de entender como os materiais se comportam quando submetidos às cargas é pela execução de experimentos em laboratórios. O método mais usual consiste em utilizar pequenos corpos de prova do material, aplicando cargas de modo a se medir as deformações resultantes (GERE e GOODNO, 2013).

Segundo Hibbeler (2010), a capacidade que um material tem de suportar uma carga sem deformação excessiva ou ruptura é definida como sendo sua resistência. Essa propriedade é exclusiva do próprio material, sendo determinada por meio de métodos experimentais. Um dos métodos mais importantes é o ensaio de *tração ou compressão*. Esse teste é utilizado para determinação de várias propriedades mecânicas de um material, mas suas características permitem sua utilização principalmente para definição da relação existente entre a tensão normal média e a deformação normal média.

O ensaio de tração consiste basicamente na submissão de um corpo de prova, seja ele normatizado ou não, à esforços axiais crescentes, onde através de um aparelho especial são medidas as deformações correspondentes. Os esforços serão medidos na própria máquina até que o material se rompa. Através deste ensaio é possível afirmar que as deformações que ocorrem no material são distribuídas através de seu corpo de modo uniforme (até que se atinja a carga máxima). A uniformidade da deformação permite a medição precisa da mesma em função da tensão que está sendo aplicada. Neste tipo de ensaio, faz-se com que a carga cresça a uma velocidade relativamente lenta o que permite a medição satisfatória da resistência do material (HIBBELER, 2010).

Nos casos de metais com certa ductilidade, quando a carga máxima suportada pelo material é atingida a uniformidade da tensão termina e se inicial o fenômeno de estricção (diminuição da seção do corpo). A ruptura sempre deve ocorrer na região estreita do material a menos que existam defeitos internos no material, promovendo a ruptura do mesmo fora dessa região (HIBBELER, 2010).

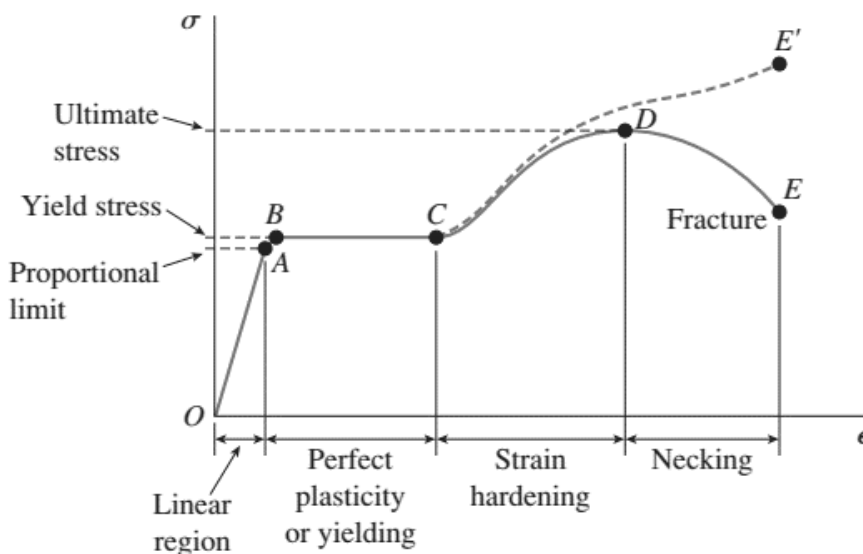
A precisão desse ensaio dependerá dos aparelhos de medições que se dispões e da forma que o mesmo é conduzido. Logo, é importante garantir o alinhamento para que a carga seja aplicada na direção de seu eixo longitudinal, evitando desse modo que esforços assimétricos apareçam levando a falsas leituras de deformação para a mesma carga aplicada (SOUZA, 1982).

A velocidade de deformação é um parâmetro de suma importância, pois através dele serão obtidos os resultados numéricos das propriedades mecânicas fornecidas pelo ensaio. Ela pode ser definida como a deformação do corpo por unidade de tempo (s^{-1}), sendo encontrada pela razão entre a velocidade de deslocamento (mm/s) e o comprimento útil do corpo de prova (mm). Esta velocidade que irá definir o caráter do ensaio que pode ser quase estático, para velocidades de deformação de 10^{-7} a $10^{-1}(s^{-1})$, ou dinâmico para velocidades superiores a $10(s^{-1})$ (HIBBELER, 2010).

2.5.2 Diagrama tensão – deformação convencional

A partir de um corpo de prova submetido a um ensaio de tração é possível construir seu diagrama tensão-deformação convencional (Figura 6). A partir desse gráfico é possível obter dados sobre a resistência a tração de um material sem considerar suas formas geométricas (HIBBELER, 2010).

Figura 6 - Diagrama tensão – deformação convencional para um aço estrutural típico em tração (sem escala).



Fonte: Gere e Goodno (2013).

Verifica-se que o diagrama possui uma região linear, sendo representado pela Equação 3, que corresponde a Lei de Hooke (Sessão 2.1.4). A linearidade da curva termina no ponto B definido como *Limite de Elasticidade* (σ_e). Nele, é definida a maior tensão que o metal suportará, sem deixar qualquer deformação permanente quando descarregado. O ponto A representa o limite elástico do material ou *Limite de Proporcionalidade*, de tal modo que entre o segmento OA define-se como a *região de comportamento elástico*. Se a tensão ultrapassar ligeiramente o limite de *Proporcionalidade* o material ainda terá capacidade de responder de maneira elástica, entretanto a partir dele a reta tende a deixar de ser linear, encurvando-se. Na fase elástica o material obedece a Lei de Hooke e suas deformações são diretamente proporcionais às tensões aplicadas. Se a carga for removida corpo voltará a sua forma original. Quanto maior o módulo de elasticidade do material, menor será a deformação elástica resultante da aplicação de uma tensão. De modo que a *deformação nominal* ou *deformação de engenharia* é dada pela Equação 2 (Sessão 2.1.3) (SOUZA, 1982).

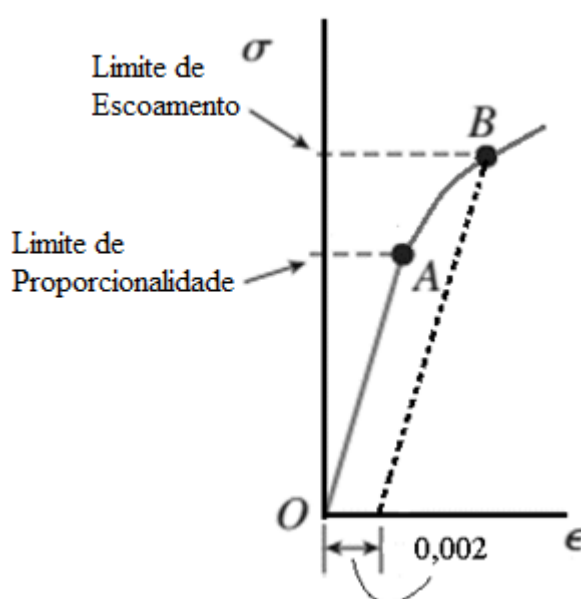
Após o ponto B um acréscimo de tensão provoca a *deformação permanente* ou *plástica* do material, sendo tal comportamento definido como *escoamento*. Logo, o material já não obedece a Lei de Hooke, sendo a tensão que provoca o escoamento definida pela Equação 5 como tensão de escoamento ou ponto de escoamento (σ_e) (SOUZA, 1982).

$$\sigma_e = \frac{Q_e}{A_0} \quad (5)$$

Onde Q_e é a carga de escoamento e A_0 a área inicial.

Quando o limite de escoamento é de difícil determinação graficamente, utiliza-se o “*método do desvio*”, onde a partir de uma pré-deformação específica, geralmente 0,2% (Metais e ligas metálicas em geral) o que corresponde à uma deformação plástica de 0,002, por unidade de comprimento, traça-se uma reta paralela à região retilínea da curva tensão – deformação (linha tracejada; Figura 7). Para ligas metálicas que possuem uma região de plasticidade muito pequena (Aços ou ligas não ferrosas muito duras), pode-se tomar o valor desta pré-deformação como sendo 0,1% ou até mesmo 0,01% para “Aços molas” (SOUZA, 1982; HIBBELER, 2010).

Figura 7 - Diagrama tensão – deformação convencional; determinação do limite de escoamento.



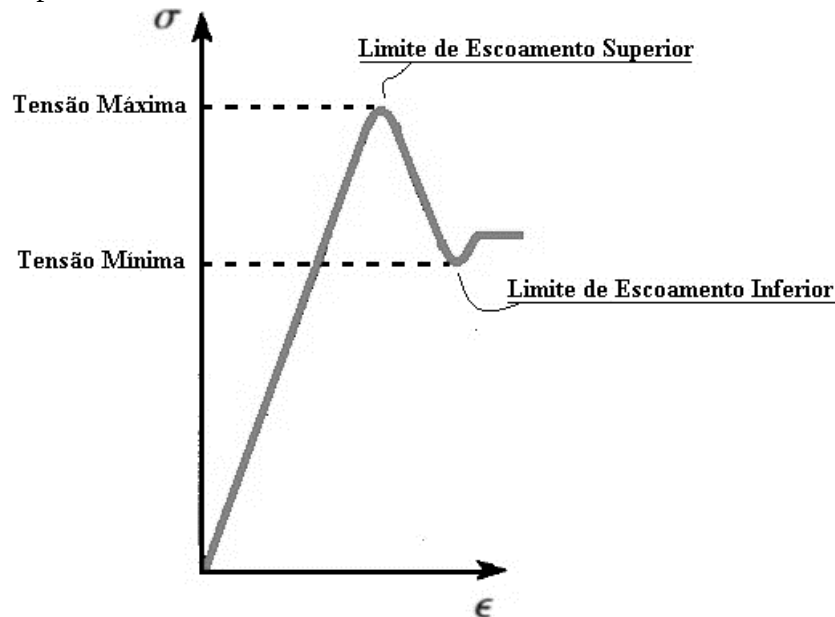
Fonte: Adaptado e modificado do Gere e Goodno (2013).

Outro modo de se analisar o escoamento de um material é quando o mesmo exibe o fenômeno de escoamento, onde a forma da curva tensão-deformação será do tipo da Figura 8. A tensão máxima atingida antes da queda repentina da carga (começo da deformação plástica no escoamento) é definida como limite de escoamento superior. Já a menor tensão atingida durante o escoamento é designada por alguns autores como sendo o limite de escoamento inferior. Ambos não são constantes para um determinado metal, dependendo de diversos fatores como geometria, condições do corpo de prova, método de ensaio, e principalmente das características da máquina de ensaio. Sabe-se da literatura que o limite de escoamento inferior é bem menos afetado pelos fatores apontados do que o superior de tal modo que a Equação 5 pode ser mudada para a Equação 6:

$$\sigma_e = \frac{Q_y}{A_0} \quad (6)$$

Onde Q_y é a carga correspondente à carga do escoamento inferior e A_0 é a área inicial (SOUZA, 1982).

Figura 8 - Diagrama tensão – deformação convencional; representação do Limite de Escoamento Superior e Inferior.



Fonte: Adaptado e modificado de Souza (1982).

Uma vez alcançado o escoamento o corpo continua a se deformar sem que haja qualquer aumento de carga. Quando o material se encontra nesse estado é denominado como *perfeitamente plástico* (SOUZA, 1982).

Depois do escoamento (Figura 6), aplica-se uma carga maior ao corpo, o que ocasiona crescimento contínuo da curva tornando-se mais achatada até que se atinja a tensão máxima (Ponto D) definida como *Limite de Resistência a tração* (σ_r), representada pela Equação 7.

$$\sigma_r = \frac{Q_r}{A_0} \quad (7)$$

Onde Q_r é a carga máxima atingida pelo ensaio. A curva tende a crescer ocorrendo o fenômeno de *endurecimento por deformação*. O limite de resistência corresponde à medida da carga máxima que o material pode atingir sobre a restrita condição de carregamento uniaxial. O limite de resistência possui a finalidade de especificar o material, do mesmo modo que a análise química identifica o material. Pela facilidade de determinação e ser uma propriedade bem

determinante, o limite de resistência é especificado sempre com as outras propriedades mecânicas dos outros metais e ligas (SOUZA, 1982).

A *Estricção* do material é caracterizada pelo alongamento do corpo e diminuição de sua seção transversal de tal forma que a redução de área ocorre de modo uniforme, ou seja, ocorre o alongamento do corpo e sua diminuição de seção transversal, de modo que ambos podem ser expressos em porcentagem, respectivamente pelas Equações 8 e 9:

$$\text{Porcentagem de alongamento} = \frac{L_{rup} - L_0}{L_0} (100\%) \quad (8)$$

$$\text{Porcentagem de Red. Área} = \frac{A_0 - A_{rup}}{A_0} (100\%) \quad (9)$$

Onde, L_{rup} e L_0 são respectivamente o comprimento do corpo na ruptura e o seu comprimento inicial, e analogamente, A_{rup} e A_0 são respectivamente a área na ruptura e a área da seção transversal.

À medida que a área da seção transversal vai diminuindo continuamente o gráfico tende a se tornar decrescente, pois com uma área menor o material só poderá suportar cargas decrescentes. Logo o diagrama, curvando-se para baixo, segue tal comportamento até o corpo de prova romper-se (Ponto *E*). A tensão em que o corpo se rompe é definida como *Tensão de Ruptura* (σ_{rup}) e é dada pela Equação 10.

$$\sigma_{rup} = \frac{Q_{rup}}{A_0} \quad (10)$$

Onde Q_{rup} é a carga de ruptura (HIBBELER, 2010) (SOUZA, 1982).

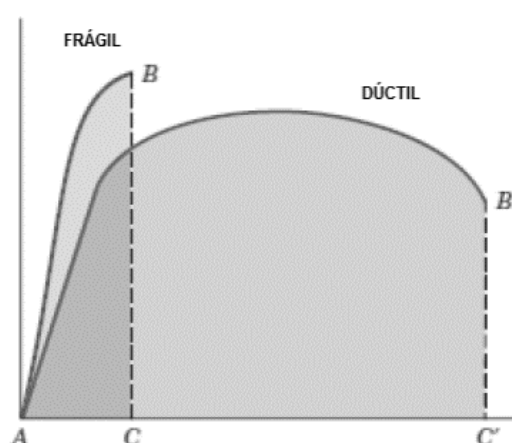
2.5.3 Comportamento da tensão e deformação de materiais dúcteis e frágeis

Em ensaios de tração, qualquer material que possa sofrer grandes deformações antes de sua ruptura pode ser denominado como *material dúctil*. Costuma-se escolher materiais dúcteis em aplicações de projetos de engenharia, pois estes são capazes de absorver choques, sendo que durante aplicação de grandes cargas sobre estes materiais, os mesmos antes de falharem exibirão grandes deformações. As equações 8 e 9 são ótimas formas de expressar a ductilidade de um material em forma de porcentagem, seja pelo alongamento ou pela redução de área. Ao se tratar de ensaios de tração em materiais frágeis, os mesmos, durante o ensaio exibirão pouco ou quase nenhum escoamento antes de sua falha. Inicialmente tem-se uma imperfeição ou trinca microscópica que em seguida se propaga rapidamente no corpo de prova causando a ruptura completa. A razão para isso é que a tensão de ruptura sob tração para materiais frágeis não é

bem definida, pois o processo de surgimento de trincas iniciais ocorre de modo aleatório. Assim, define-se uma *tensão de ruptura média* a partir de registros para um conjunto de ensaios de tração. Apesar disso, materiais frágeis como o ferro fundido e concreto exibem elevada resistência a compressões axiais (HIBBELER, 2010).

A Figura 9 ilustra uma representação esquemática de como se dar o comportamento de um diagrama tensão-deformação em tração para um material dúctil e para um material frágil, carregados até o rompimento.

Figura 9 - Representação esquemática do Diagrama tensão – deformação para um material dúctil e um frágil.



Fonte: Callister (2008).

2.5.4 Diagrama tensão – deformação real X Diagrama tensão – deformação convencional

No Diagrama tensão-deformação real os valores de tensão e deformação calculados são determinados no instante em que a carga é medida, em vez de sempre utilizar a área da seção transversal e o comprimento originais do corpo de prova para calcular estes parâmetros como no Diagrama tensão-deformação convencional. Os valores de tensão e deformação são chamados respectivamente de *tensão real* e *deformação real* e o gráfico desses valores é mostrado pela curva tracejada da Figura 6. Para pequenas deformações, o diagrama tensão-deformação real é praticamente igual ao diagrama tensão-deformação convencional, sendo que suas diferenças começam a se destacar na faixa de endurecimento por deformação. Vale ressaltar que as divergências se tornam ainda maiores na região de estricção (GERE e GOODNO, 2013).

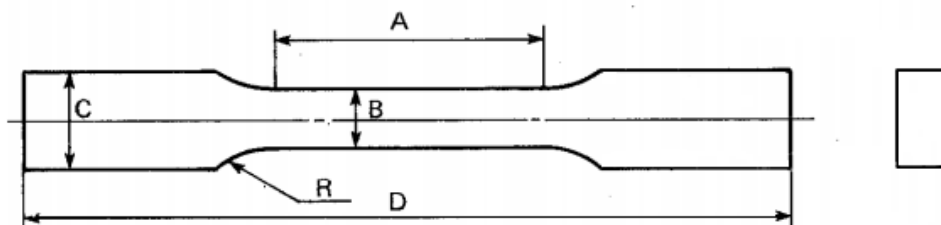
Apesar das diferenças entre ambos os diagramas, na maioria dos projetos de engenharia os materiais selecionados ficam dentro da faixa elástica, pois de um modo geral as distorções

do material não são tão severas dentro dessa região. Dessa forma, sob a condição que o material seja “rígido”, a deformação até o limite de elasticidade permanecerá pequena de modo que se torna aceitável a utilização dos Diagramas de tensão-deformação convencional, pois o erro associado aos valores de tensão e deformação (Equações 1 e 2) de engenharia fornecidos por esse diagrama é muito pequeno (cerca de 0,1%) (HIBBELER, 2010)

2.5.5 Corpos de prova para ensaio de tração convencional

Quando se deseja fazer um ensaio de tração, normalmente se utilizam corpos de prova normatizados por associações de normas técnicas. Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), para ensaios de tração utiliza-se o método MB-4 onde são indicadas as formas e as dimensões do corpo de prova para cada caso que se deseja. Para o ensaio de tração convencional em chapas, lâminas, placas, etc., utilizam-se geralmente corpos de prova semelhantes ao da Figura 10. O corpo de prova poderá ter formato retangular e dependendo da forma e do tamanho do produto acabado do qual foi retirado, tendo espessura igual à do mesmo.

Figura 10 - Corpo de prova de seção retangular para ensaio de tração.



Fonte: Souza (1982).

O corpo de prova é dividido em duas regiões: a parte útil e a cabeça. A parte útil do corpo de prova é a região onde serão feitas as medidas das propriedades mecânicas do material selecionado, enquanto a cabeça é a região destinada somente para fixação do corpo na máquina de ensaio. A Tabela 4 fornece valores numéricos referentes às dimensões dos métodos MB – 4 da ABNT e E8 da ASTM (SOUZA, 1982).

Tabela 4 - Dimensões dos corpos de prova Método MB – 4 (ABNT) e E8 (ASTM).

Corpo de Prova	<i>A</i> (mm)	<i>B</i> (mm)	<i>C</i> (mm) (aprox.)	<i>D</i> (mm) (aprox.)	<i>R</i> (mm) (min.)
Chapa fina - ABNT	75	12,5	20	200	20
Chapa grossa - ABNT	240	40	50	400	25
Chapa fina - ASTM	60	12,5	20	200	12,5
Chapa grossa - ASTM	225	40	50	450	25

Fonte: Adaptado de Souza (1982).

2.5.6 Corpos de prova não normatizados para ensaios de tração convencional

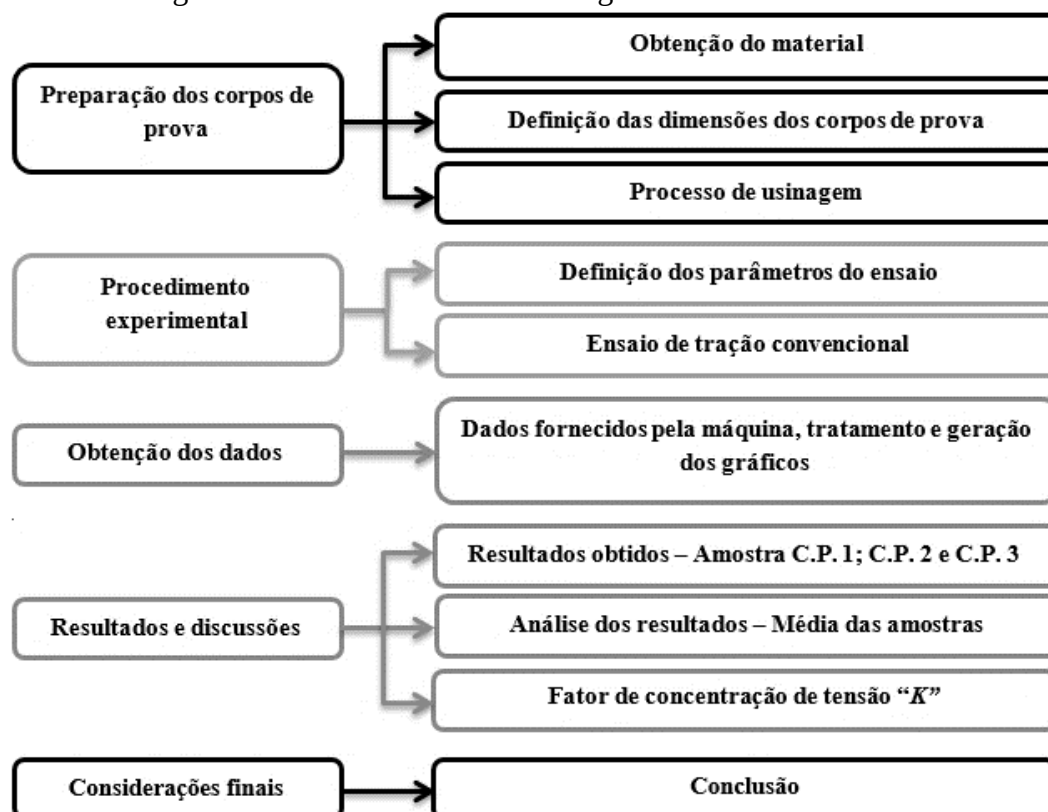
Quando se deseja fazer ensaio de tração em chapas, geralmente retiram-se corpos de provas padronizados de acordo com a norma. Para casos em que a espessura é muito grande, os corpos podem possuir seção circular; de outro modo, caso a chapa seja fina, a espessura da chapa será a espessura do corpo de prova. Algumas limitações podem ser associadas quanto à espessura da chapa e a fabricação do corpo de prova, de tal modo que a mesma poderá ser ensaiada diretamente sem a confecção do corpo de prova normatizado (SOUZA, 1982).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Metodologia

A metodologia abordada para este trabalho foi a de execução e análise experimental, de tal modo que se avaliou, comparativamente, como o material em questão se comportou diante de uma solicitação de tração axial com e sem a existência de concentradores de tensão. Para o ensaio de tração convencional e confecção dos corpos de prova foram utilizadas as orientações dadas pelo professor orientador do trabalho, literatura e órgãos regulamentadores da área. Após a realização do experimento foram obtidos os dados, que foram migrados para uma planilha eletrônica do Excel®, onde fez-se o tratamento e geração dos gráficos. A partir dos gráficos obteve-se os resultados analisados e apresentados como média $\pm$ desvio padrão, e comparados entre os grupos (amostra C.P. 1, amostra C.P. 2 e amostra C.P. 3) pelo ANOVA *one-way*, seguido pelo teste de *Tukey* com grau de significância de 5%. Os testes estatísticos foram aplicados usando o software estatístico *GraphPad Prism 5* (GraphPad Software, USA). Para melhor compreensão, foi feito um fluxograma das atividades (Figura 11).

Figura 11 - Fluxograma das atividades – Metodologia.



Fonte: Autoria própria (2017).

3.2 Preparação dos corpos de prova

3.2.1 Obtenção do material

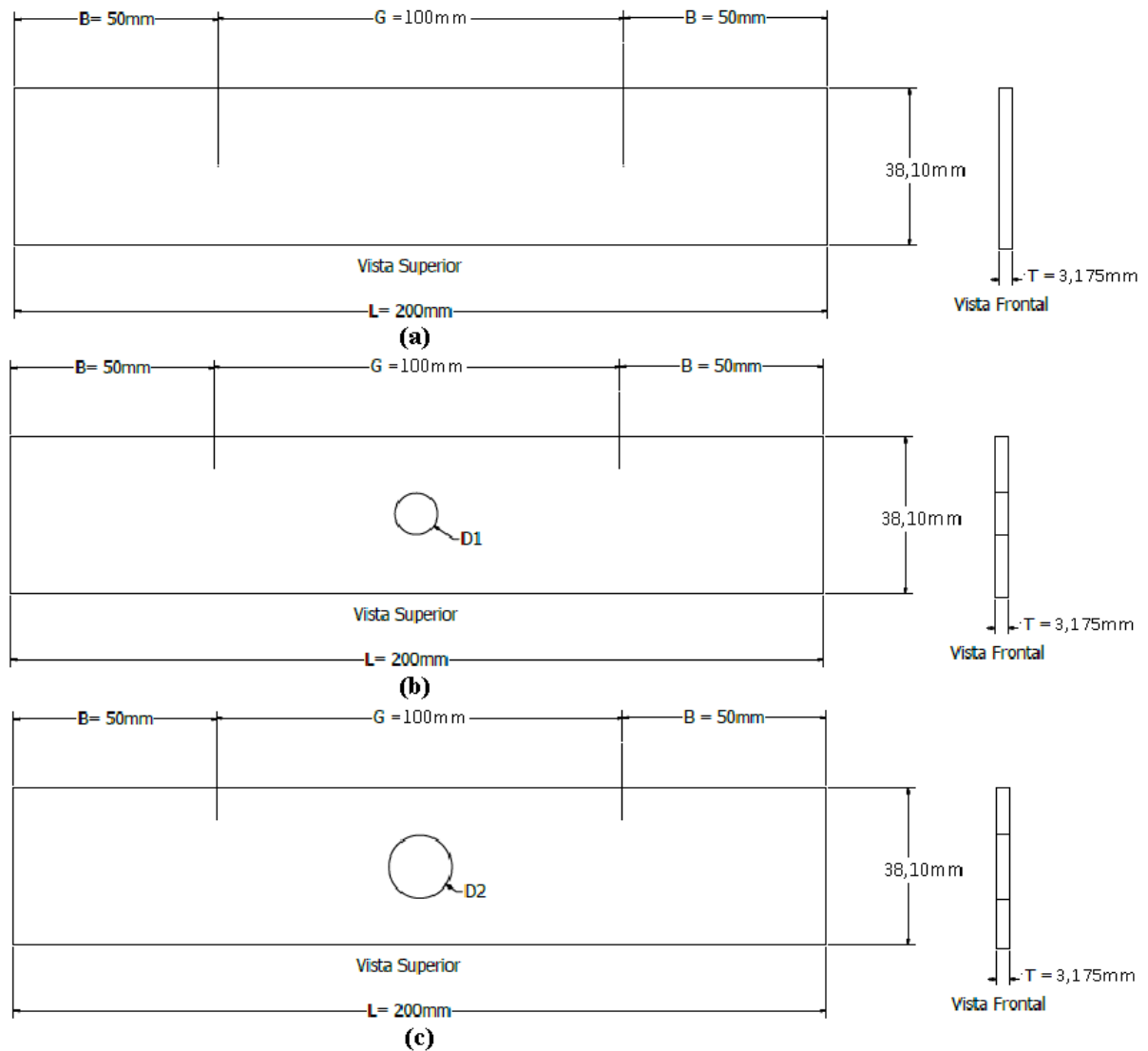
Através do que foi mencionado na Sessão 2.4.2, é possível perceber os motivos pelos quais o Aço SAE 1020 foi selecionado para esse estudo, aproveita-se para ressaltar também a facilidade para acessibilidade e custo deste material nessa região. Assim, o material para este trabalho foi obtido através da compra em uma loja de aços da cidade de Mossoró-RN.

3.2.2 Definição das dimensões dos corpos de prova

Inicialmente o objetivo do trabalho era o de executar os experimentos com corpos de prova normatizados de acordo com o método MB-4, especificado anteriormente na Sessão 2.5.5. Entretanto, por limitações de usinagem associadas a fatores como: pequena espessura do material e elevada vibração da fresadora do laboratório de usinagem da UFERSA, seria inviável fabricar corpos de prova com o acabamento e as dimensões apontadas pela norma. Todavia a literatura assim como a normas disponíveis permitem a execução de ensaios de tração sem a confecção de corpos de provas normatizados, principalmente quando há limitações associadas à espessura da chapa.

Assim, buscou-se através de uma barra chata de 3 metros de comprimento, 1 ½’’ de largura e 1/8’’ de espessura, fabricar 3 diferentes grupos de amostras com 3 corpos de prova cada. As dimensões dos corpos de prova estão ilustradas na Figura 12. A primeira amostra (C.P. 1) apresentava corpos de prova sem furo (Figura 12(a)), a segunda (C.P. 2) com furo “D1” (Figura 12 (b)) e a terceira (C.P. 3) com furo “D2” (Figura 12 (c)).

Figura 12 - Dimensões dos três tipos de amostras de corpos de prova; (a) amostra C.P. 1; (b) amostra C.P. 2; (c) amostra C.P. 3.



Fonte: Autoria própria (2017).

3.2.3 Processo de usinagem

Os corpos de prova foram cortados da barra com auxílio de uma Serra BU310. Após o corte dos corpos de prova nas dimensões desejadas, efetuou-se o processo de furação das amostras C.P. 2 e C.P.3 (Figura 13). As brocas utilizadas estão ilustradas na Figura 14.

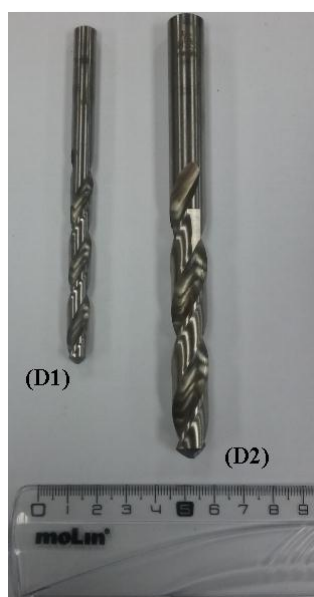
Figura 13 - Processo de furação dos corpos de prova.



Fonte: Autoria própria (2017).

Para a amostra C.P. 2, utilizou-se a broca de diâmetro $D1 = 5/16''$ (7,94 mm). Já para a amostra C.P. 3, utilizou-se a broca de diâmetro $D2 = 1/2''$ (12,70 mm).

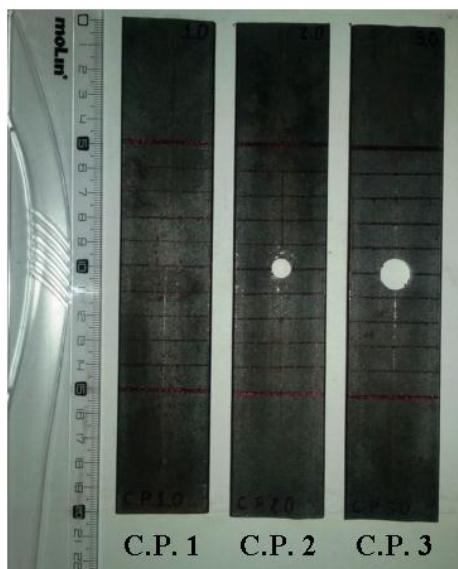
Figura 14 - Brocas utilizadas para furação das amostras C.P. 2 e C.P. 3; $D1 = 7,94$ mm; $D2 = 12,70$ mm



Fonte: Autoria própria (2017).

A Figura 15 ilustra como ficaram cada um dos corpos de provas dos três tipos de amostras (C.P. 1 - Sem furo, C.P. 2 - com furo $D1$ e C.P. 3 - com furo $D2$).

Figura 15 - Corpos de prova, finalizados; C.P. 1 - Sem furo; C.P. 2 - com furo D1; C.P. 3 - com furo D2.



Fonte: Autoria própria (2017).

Como pode ser visto, foram feitas marcas de referência em cada um dos corpos de prova, sendo a parte listrada a correspondente ao comprimento útil, ou seja, ao comprimento do corpo que ficaria entre as garras, de medida $G = 100$ mm, e a parte não listrada a correspondente ao comprimento que ficaria dentro das garras, de medida $B = 50$ mm (Figura 12). O espaçamento utilizado entre as linhas foi de 10 mm.

3.3 Procedimento experimental

3.3.1 Definição dos parâmetros do ensaio

É importante ressaltar que no ensaio de tração convencional, os corpos de provas devem ser ensaiados até sua ruptura, o que define o final do ensaio. Além disso, alguns parâmetros importantes antes da execução do ensaio devem ser definidos. Como já foi dito anteriormente, foram utilizados três diferentes tipos de amostras de corpos de prova, distintas entre si pelas características dimensionais representadas na Figura 12. Para melhor compreensão a Tabela 5 mostra a quantidade de corpos de prova de cada amostra, bem como suas respectivas dimensões de furo, e os parâmetros de ensaio que foram utilizados nos ensaios de cada amostra.

Tabela 5 - Características das amostras e Parâmetros do ensaio.

Características das amostras	C.P. 1	C.P. 2	C.P. 3
Diâmetro do Furo (mm)	-	7,94	12,70
Quantidade de corpos de prova	3	3	3
Parâmetros do ensaio	C.P.1, C.P.2 e C.P.3		
Limite de força (kN)	100		
Velocidade do ensaio (mm/s)	0,05		
Comprimento útil (mm)	100		
Taxa de deformação (mm/mm.s)	5(10 ⁻⁴)		
Gráfico plotado	Tensão VS Deformação		
Final do ensaio	Ruptura do corpo de prova		
Tipo de área	Retangular		

Fonte: Autoria própria (2017).

3.3.2 Ensaio de tração convencional

Para execução dos ensaios mecânicos descritos neste trabalho, foi utilizada a máquina universal de ensaios EMIC do laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA. A máquina está conectada a um computador que controla todas as ações, tanto dados de entrada como os dados de saída. Com auxílio do software TESC, foi fornecido ao sistema os dados sobre o corpo de prova e os parâmetros de ensaio já citados na Tabela 5. O software fornece na sua saída os dados de deformação, bem como as forças que são geradas durante a efetivação do ensaio até a ruptura do corpo de prova.

A máquina EMIC, modelo DL10000 é fabricada no Brasil e possui uma célula de carga com valor de 100kN. A seguir, tem-se a descrição retirada de seu manual de utilização.

- Possui capacidade de 10000 kgf ou 100kN;
- É do tipo bifuso de bancada, com duas colunas guias cilíndricas paralelas;
- Acionamento por fusos de esferas reticulantes;
- Faixa de velocidade que varia de 0,01 a 500 mm/min;
- A medição de força é através de células de carga intercambiáveis;
- Classe de medição de força: classe 1, segundo a norma NM ISO7500-1 (classe 0,5 sobre consulta), fornecida com certificado de calibração RBC (Rede Brasileira de Calibração);
- Compatibilidade eletromagnética: máquina de linha certificada segundo a Norma IEC 61000 contra interferência eletromagnética por membro da RBLE (Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaios);
- Medição do deslocamento: sensor óptico, com resolução de 0,01 mm;

- A medição de força e deslocamento é feita através de um programa computacional;
- Extensometria: dois canais;
- Saída de dados: digital através de porta serial RS232;
- Análise de dados e controle de ensaio: através de programa computacional;
- Console: com funções básicas movimentação para ajustes de acessórios;

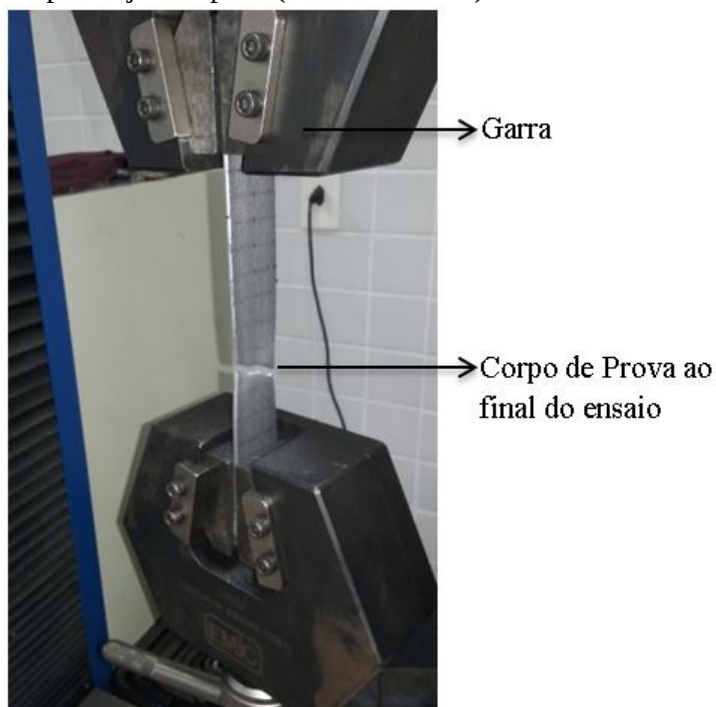
A seguir nas Figuras 16 e 17, tem-se respectivamente, a ilustração da máquina já durante a execução do ensaio e um dos corpos de prova da amostra C.P. 1, já rompido.

Figura 16 - Máquina Universal de Ensaio EMIC do laboratório da UFERSA.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 17 - Corpo de prova já rompido (amostra C.P. 1).



Fonte: Autoria própria (2017).

3.4 Obtenções dos dados

3.4.1 Dados fornecidos pela máquina, tratamento e geração dos gráficos

Menciona-se mais uma vez, que para a determinação do final do ensaio de tração todos os corpos de prova foram tracionados até sua ruptura. Com auxílio do programa TESC foram obtidos os dados referentes ao tempo de ensaio em segundos, deformação em milímetros e a força de tração em Newtons do corpo de prova. Para tratamento dos dados de cada amostra se utilizou de uma planilha eletrônica do Excel®, onde para cada corpo de prova, foi gerado um gráfico de tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia. A partir dos mesmos, analisaram-se algumas propriedades do material bem como o fator geométrico de concentração de tensão para cada situação (Equação 4). Os gráficos obtidos, bem como os resultados correspondentes serão discutidos na sessão 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados obtidos

4.1.1 Resultados obtidos – amostra C.P. 1

Com relação a amostra C.P.1 é importante ressaltar que seus corpos de provas não apresentavam concentradores de tensão. Para melhor compreensão, a Tabela 6 fornece as características dimensionais correspondentes a cada corpo de prova da amostra referida.

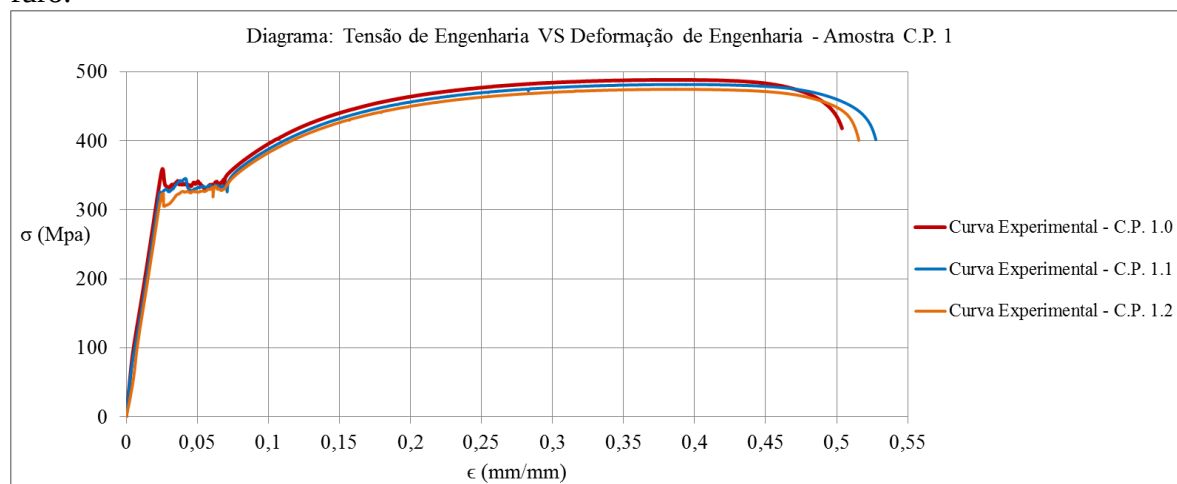
Tabela 6 - Características Dimensionais da amostra C.P. 1 (Sem furo).

Características Dimensionais - Amostra C.P. 1 – Sem furo	Corpo de Prova 1.0	Corpo de Prova 1.1	Corpo de Prova 1.2
Comprimento Total (mm)	200,00	200,00	200,00
Comprimento Útil – L_0 (mm)	100,00	100,00	100,00
Comprimento final – L_f (mm)	134,30	135,00	134,40
Área (mm ²)	120,33	120,65	122,56
Diâmetro do furo (mm)	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2017).

O Gráfico 1 mostra o diagrama que representa as curvas tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia, oriundas do ensaio de tração para cada corpo de prova da amostra C.P. 1.

Gráfico 1 - Curvas tensão de engenharia VS deformação de engenharia – amostra C.P. 1 sem furo.



Fonte: Autoria própria (2017).

Na Tabela 6, as características para cada corpo de prova da amostra C.P. 1 foram obtidas através de medições feitas antes e após o ensaio de tração. Com as medidas do comprimento útil “ L_0 ”, comprimento final “ L_f ” e da área da seção transversal é possível, com simultânea análise do Gráfico 1, determinar algumas propriedades que podem ser observadas na Tabela 7:

Tabela 7 - Propriedades obtidas – amostra C.P. 1 sem furo.

Amostra C.P. 1 - Sem furo	Limite de Escoamento (Mpa)	Limite de Resistência a Tração (Mpa)	Limite de Ruptura (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Alongamento até ruptura (ΔL %)	Deformação de Engenharia até ruptura
Corpo de Prova 1.0	329,336	488,156	417,864	12,879	34,30	0,4695
Corpo de Prova 1.1	321,913	481,501	407,159	12,815	35,00	0,4935
Corpo de Prova 1.2	304,908	474,475	410,383	13,081	34,40	0,4821
Média	318,719	481,377	411,802	12,925	34,567	0,4817
Desvio Padrão	12,523	6,842	5,492	0,139	0,379	0,012

Fonte: Autoria própria (2017).

Avaliando-se os corpos de prova 1.0, 1.1, e 1.2 observou-se que ao final do ensaio, cada um deles apresentou, respectivamente, comprimento final: “ $L_f = 134,30\text{mm}$ ”, “ $L_f = 135,00\text{mm}$ ” e “ $L_f = 134,4\text{mm}$ ”. O que permite, através da Equação 8, determinar a porcentagem de alongamento até a ruptura de cada um. Assim, sequencialmente, tem-se $\Delta L\% = 34,30$, $\Delta L\% = 35,00$ e $\Delta L\% = 34,40$.

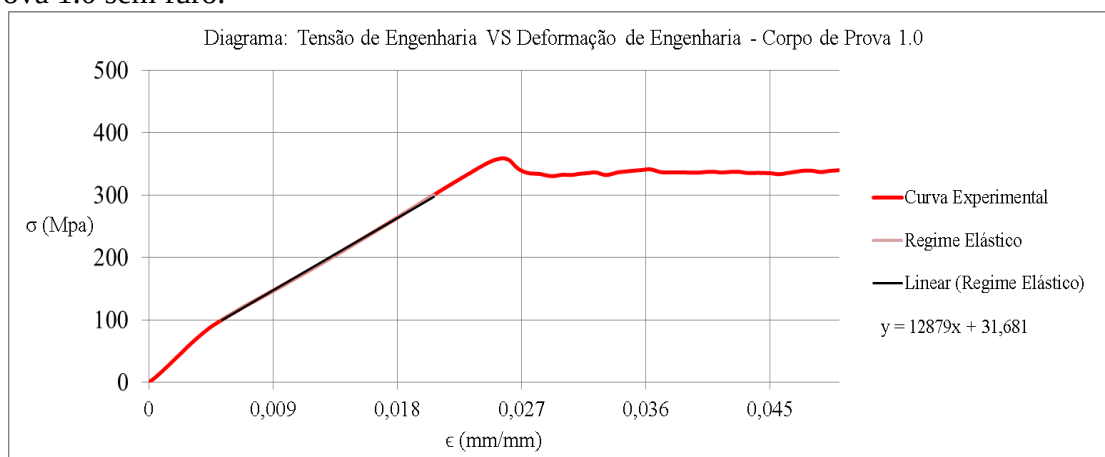
Na análise do Limite de escoamento, observou-se que ambas as três curvas experimentais, exibiram um comportamento na transição da região de proporcionalidade para a de plasticidade um fenômeno semelhante ao exemplificado pela Figura 8. Onde se observou dois patamares de tensão de escoamento (máxima ou superior e mínima ou inferior) bem distintos entre si. Sabe-se que a tensão de escoamento ou limite de escoamento inferior é bem menos afetada por condições e fatores experimentais (como características da máquina de ensaio, geometria e acabamento superficial do corpo de prova, método de ensaio, etc.), quando comparada ao limite de escoamento superior de modo que a tensão de escoamento pode ser determinada pela Equação 6 (SOUZA, 1982).

Para determinação do limite de resistência a tração, bem como o limite de ruptura de cada corpo de prova da amostra C.P. 1, utilizou-se as curvas experimentais do Gráfico 1, bem como as equações 7 e 10, respectivamente.

O método utilizado para determinar o módulo de elasticidade consistiu através do uso de planilhas eletrônicas do Excel®, medir a inclinação da parte considerada reta da região de

proporcionalidade, que corresponde justamente ao coeficiente angular da equação mostrada no Gráfico 2. O Gráfico 2 mostra o diagrama que representa a curva tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia ampliado do Corpo de Prova 1.0. O mesmo método foi utilizado para os demais corpos de prova.

Gráfico 2 - Curva tensão de engenharia VS deformação de engenharia (ampliado) – Corpo de Prova 1.0 sem furo.



Fonte: Autoria própria (2017).

Para obtenção das deformações de cada corpo de prova, traçou-se uma reta paralela à reta que descreve o regime elástico, de modo que a mesma começava no ponto que define a tensão de ruptura do material e terminasse ao tocar o eixo de deformação de engenharia, fornecendo assim a deformação final do corpo de prova (SOUZA, 1982).

4.1.2 Resultados obtidos – amostra C.P. 2

Para análise da amostra C.P. 2, vale lembrar que seus corpos de prova apresentavam concentradores de tensão de diâmetro “D1”. Para maior esclarecimento, a Tabela 8 fornece as características dimensionais correspondentes a cada corpo de prova da amostra referida.

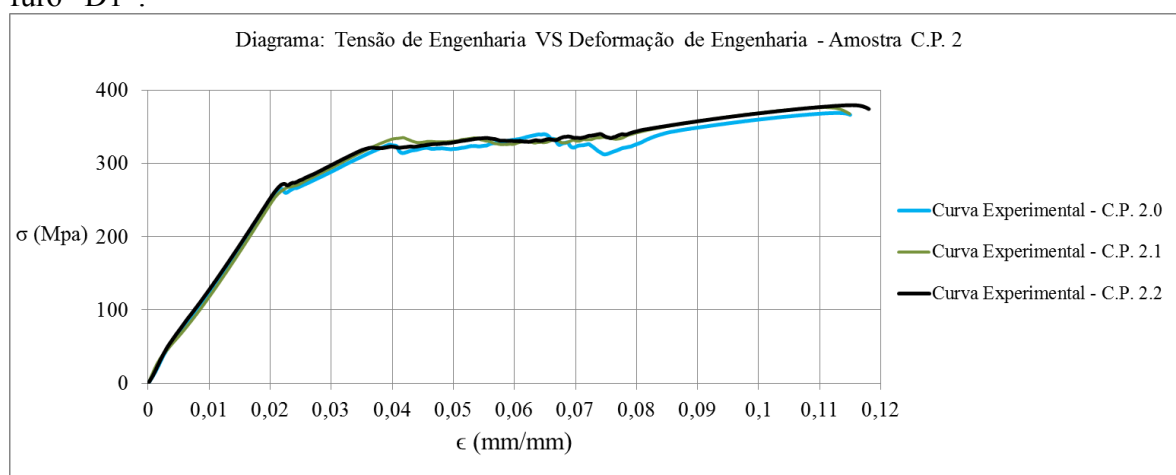
Tabela 8 - Características Dimensionais da amostra C.P. 2 – Com furo “D1”.

Características Dimensionais - Amostra C.P. 2 - Com furo "D1"	Corpo de Prova 2.0	Corpo de Prova 2.1	Corpo de Prova 2.2
Comprimento Total (mm)	200,00	200,00	200,00
Comprimento Útil "L ₀ " (mm)	100,00	100,00	100,00
Comprimento final "L _f " (mm)	108,20	108,10	108,50
Área (mm ²)	121,92	120,17	120,65
Diâmetro do furo “D1” (mm)	7,94	7,94	7,94

Fonte: Autoria própria (2017).

O Gráfico 3 mostra o diagrama que representa as curvas tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia, proveniente do ensaio de tração para cada corpo de prova da amostra C.P. 2.

Gráfico 3 - Curvas tensão de engenharia VS deformação de engenharia – amostra C.P. 2 com furo “D1”.



Fonte: Autoria própria (2017).

As características descritas na Tabela 8 foram obtidas a partir de medições feitas antes e após o ensaio de tração para os corpos de prova da amostra C.P. 2. Com as medidas de comprimento útil “L₀”, comprimento final “L_f”, da área da seção transversal e com simultânea análise do Gráfico 3, é plausível determinar algumas propriedades que podem ser observadas na Tabela 9:

Tabela 9 - Propriedades obtidas – amostra C.P. 2 com furo “D1 = 7,94 mm”.

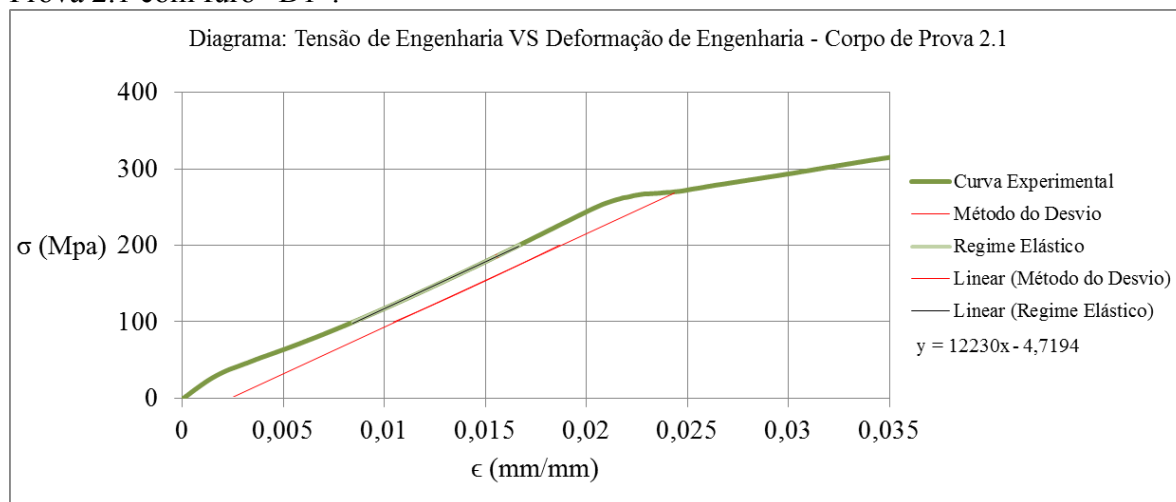
Amostra C.P. 2 - Com furo "D1"	Limite de Escoamento (Mpa)	Limite de Resistência a Tração (Mpa)	Limite de Ruptura (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Alongamento até ruptura (ΔL %)	Deformação de Engenharia até ruptura
Corpo de Prova 2.0	260,830	368,727	366,098	12,101	8,20	0,0862
Corpo de Prova 2.1	268,923	376,208	367,611	12,230	8,10	0,0841
Corpo de Prova 2.2	271,263	379,325	374,109	11,987	8,50	0,0855
Média	267,006	374,754	369,273	12,106	8,267	0,0853
Desvio Padrão	5,474	5,447	4,256	0,122	0,208	0,0011

Fonte: Autoria própria (2017).

Analizando-se os corpos de prova 2.0, 2.1 e 2.2, percebeu-se que ao final do ensaio de tração, cada um deles apresentou, respectivamente, comprimento final: “ $L_f = 108,20\text{mm}$ ”, “ $L_f = 108,10\text{mm}$ ” e “ $L_f = 108,50\text{mm}$ ”. Assim, a partir da Equação 8 é possível determinar a porcentagem de alongamento até a ruptura. Dessa forma, seguidamente, tem-se: $\Delta L\% = 8,20$, $\Delta L\% = 8,10$ e $\Delta L\% = 8,50$.

Durante a determinação gráfica do limite de escoamento dos corpos de prova da amostra C.P.2, se observou que ambas as três curvas experimentais, não mais exibiram um comportamento na transição da região de proporcionalidade para a de plasticidade semelhante ao analisado para os corpos de prova da amostra C.P. 1. Para essa amostra, percebeu-se que as curvas se assemelhavam bastante à exemplificada na Figura 7. O que ocasionou a necessidade de utilização do “*método do desvio*”, onde a partir de uma pré-deformação específica de 0,2% (correspondente a uma deformação plástica de 0,002 mm/mm) traçou-se uma reta paralela à região retilínea ou de proporcionalidade da curva tensão *versus* deformação, fazendo com que a mesma tocasse na curva experimental justamente no limite de escoamento do material (SOUZA, 1982). O Gráfico 4 mostra o diagrama que representa a curva tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia ampliada para o Corpo de Prova 2.1.

Gráfico 4 - Curva tensão de engenharia VS deformação de engenharia (ampliado) – Corpo de Prova 2.1 com furo “D1”.



Fonte: Autoria própria (2017).

Para determinação do limite de resistência à tração, bem como limite de ruptura de cada corpo de prova, foram utilizadas as curvas experimentais do Gráfico 3, bem como as equações 7 e 10.

Com objetivo de se determinar o módulo de elasticidade dos corpos de prova da amostra C.P. 2, partiu-se do mesmo princípio utilizado para amostra C.P. 1. Onde a através do valor do coeficiente angular da equação da reta (Gráfico 4) que descreve a região de proporcionalidade de cada corpo de prova, obteve-se os valores já mostrados.

Os valores de deformações até a ruptura foram verificados através do mesmo princípio utilizado para os corpos de prova da amostra C.P.1. De modo que a partir da reta que toca a tensão de ruptura e se estende paralelamente a região de proporcionalidade até tocar o eixo de deformação, foi possível obter os valores referidos.

4.1.3 Resultados obtidos – amostra C.P. 3

Para a análise da amostra C.P. 3 é importante salientar que: semelhantemente a amostra C.P. 2, seus corpos de prova apresentavam concentradores de tensão com formato de furo. Entretanto o diâmetro de seus furos “D2” eram maiores que os da amostra anterior “D1”. Para melhor visualização, a Tabela 10 fornece as características dimensionais de cada corpo de prova da amostra referida.

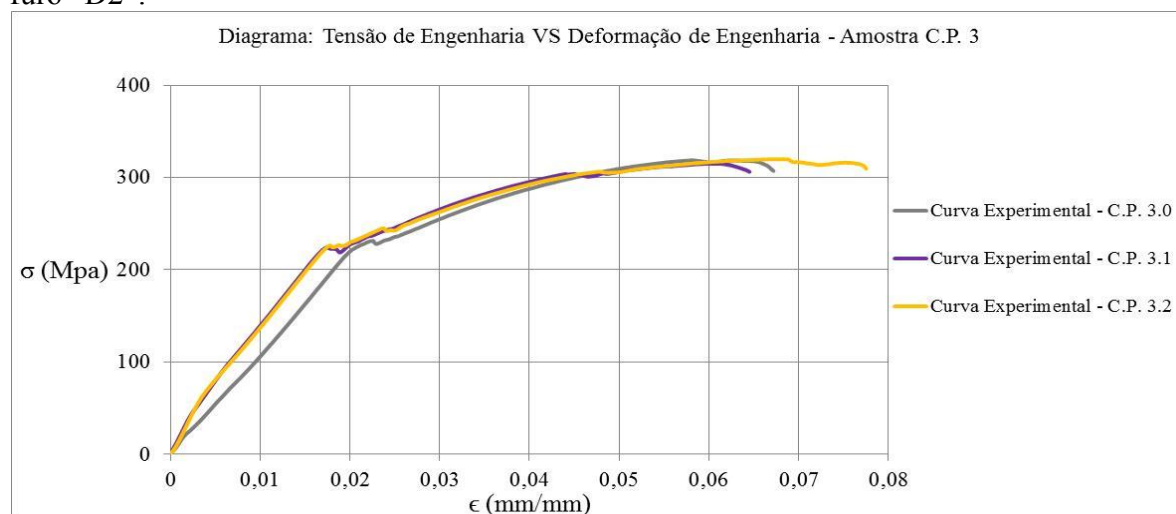
Tabela 10 - Características Dimensionais da amostra C.P. 3 – Com furo “D2”.

Características Dimensionais - Amostra C.P. 3 - Com furo "D2"	Corpo de Prova 3.0	Corpo de Prova 3.1	Corpo de Prova 3.2
Comprimento Total (mm)	200,00	200,00	200,00
Comprimento Útil "L ₀ " (mm)	100,00	100,00	100,00
Comprimento final "L _f " (mm)	105,70	105,20	105,80
Área (mm ²)	121,60	120,65	120,65
Diâmetro do furo “D2” (mm)	12,70	12,70	12,70

Fonte: Autoria própria (2017).

A seguir no Gráfico 5, é possível observar as curvas tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia proveniente do ensaio de tração para cada corpo de prova da amostra C.P. 3.

Gráfico 5 - Curvas tensão de engenharia VS deformação de engenharia – amostra C.P. 3 com furo “D2”.



Fonte: Autoria própria (2017).

As características observadas na Tabela 10 foram obtidas a partir de medições feitas antes e após o ensaio de tração para cada corpo de prova. A partir das medidas de comprimento útil “L₀”, comprimento final “L_f”, da área da seção transversal e com simultânea análise das curvas experimentais do Gráfico 5, pode-se determinar algumas propriedades observadas na Tabela 11:

Tabela 11 - Propriedades obtidas – amostra C.P. 3 com furo “D2 = 12,70 mm”

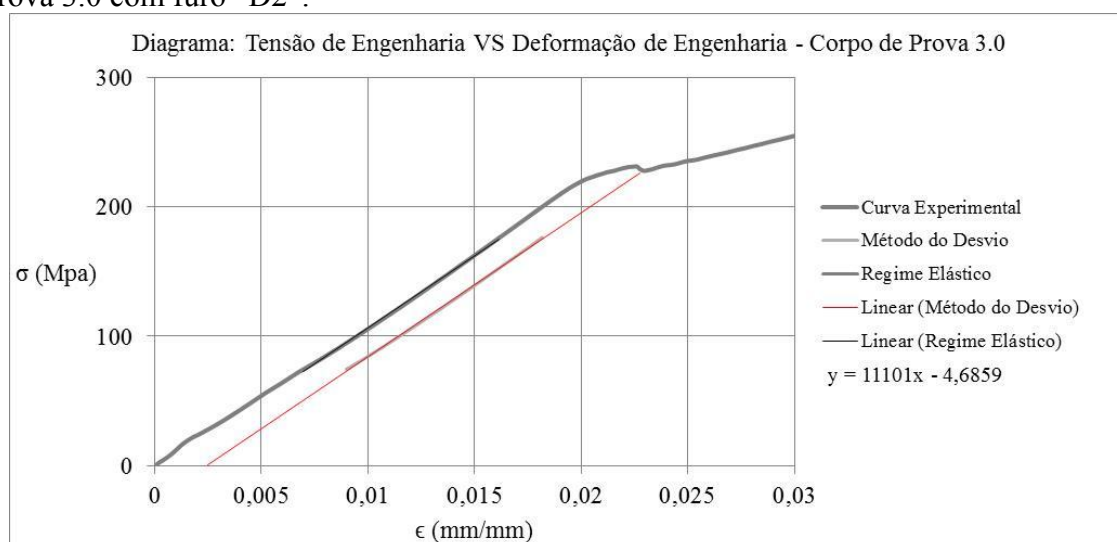
Amostra C.P. 3 - Com furo "D2"	Limite de Escoamento (Mpa)	Limite de Resistência a Tração (Mpa)	Limite de Ruptura (Mpa)	Módulo de Elasticidade (Gpa)	Alongamento até ruptura (ΔL %)	Deformação de Engenharia até ruptura
Corpo de Prova 3.0	231,021	318,557	307,066	11,101	5,700	0,039
Corpo de Prova 3.1	222,374	314,994	306,074	11,868	5,200	0,039
Corpo de Prova 3.2	226,284	319,813	309,488	11,484	5,800	0,050
Média	226,559	317,788	307,543	11,484	5,567	0,043
Desvio Padrão	4,330	2,500	1,756	0,384	0,321	0,006

Fonte: Autoria própria (2017).

Analisando após o ensaio de tração os corpos de prova 3.0, 3.1 e 3.2, verificou-se que ambos apresentaram, respectivamente, comprimento final: “ $L_f = 105,70\text{mm}$ ”, “ $L_f = 105,20\text{mm}$ ” e “ $L_f = 105,80\text{mm}$ ”. O que fornece através da Equação 8 os seguintes valores de alongamento até a ruptura: $\Delta L\% = 5,70$, $\Delta L\% = 5,20$ e $\Delta L\% = 5,80$.

O método utilizado para determinação gráfica dos limites de escoamento dos corpos de prova da amostra C.P. 3, foi o mesmo especificado para a amostra C.P. 2, ou seja, o “*método do desvio*”. A pré-deformação específica utilizada foi a de 0,2%, onde de mesmo modo, traçou-se uma reta paralela à região retilínea ou de proporcionalidade da curva tensão *versus* deformação, de tal forma que a mesma tocasse justamente no ponto correspondente ao limite de escoamento do material. O Gráfico 6 ilustra o diagrama que representa a curva tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia ampliada para o Corpo de Prova C.P. 3.0.

Gráfico 6 - Curva tensão de engenharia VS deformação de engenharia (ampliado) – Corpo de Prova 3.0 com furo “D2”.



Fonte: Autoria própria (2017).

Para determinação do limite de resistência a tração, bem como limite de ruptura de cada corpo de prova da amostra C.P. 3, foram utilizadas as equações 7 e 10 bem como as curvas experimentais do Gráfico 5.

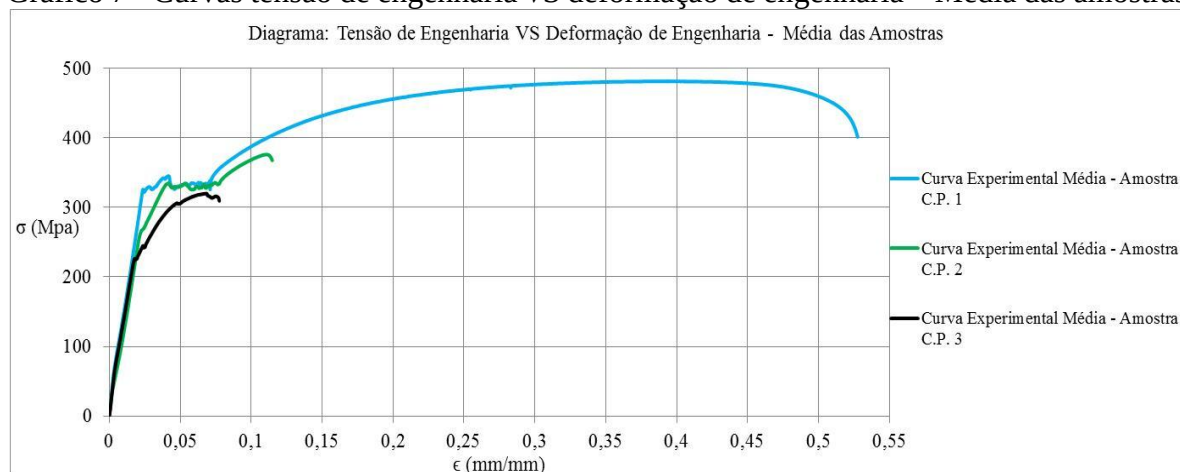
O módulo de elasticidade dos corpos de prova da amostra C.P. 3 foram determinados pelo mesmo princípio utilizado para cada corpo de prova das amostras C.P.1 e C.P. 2. Logo, pelo valor do coeficiente angular da equação da reta do Gráfico 6, que descreve a região de proporcionalidade, foi possível obter os valores já mostrados.

Os valores de deformação até a ruptura foram possíveis de serem determinados pelo método descrito para a amostra C.P. 1 e C.P. 2. Onde a partir da reta traçada paralelamente a região de proporcionalidade e que começa no ponto da tensão de ruptura e se finaliza ao tocar o eixo da deformação de engenharia, determinou-se tais valores.

4.1.4 Análise dos resultados – Média das amostras

Para melhor análise dos resultados provenientes do experimento, o Gráfico 7 apresenta o diagrama que representa as curvas experimentais médias tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia para cada amostra ensaiada. Através do mesmo, é possível fazer a analogia comparativa entre as amostras.

Gráfico 7 - Curvas tensão de engenharia VS deformação de engenharia – Média das amostras



Fonte: Autoria própria (2017).

Observando a Curva Experimental Média – Amostra C.P.1, permite-se inferir que seus corpos de prova ao serem tracionados, exibiram comportamento semelhante ao observado em

materiais dúcteis. Isso quer dizer que o material ao ser sobrecarregado se deformou plasticamente, sofrendo grandes quantidades de deformação antes de sua ruptura (CALLISTER, 2002). Tal característica descrita acima é definida por Hibbeler (2010), como comportamento elástico e plástico. É possível perceber nesta curva a semelhança em relação a representação esquemática de como se dar o comportamento de um diagrama tensão-deformação em tração para um material dúctil carregado até o rompimento da Figura 9 - Curva B' (sessão 2.5.3). Percebe-se também as diferentes regiões características de um gráfico de ensaio tensão – deformação convencional de tração. Isso quer dizer que esse aço exibiu uma região elástica bem definida, seguida de uma região de escoamento na qual houveram aumentos na deformação e nenhum aumento na tensão. Em seguida a região de endurecimento por deformação, onde houve um escoamento adicional, com correspondente aumento da tensão, até alcançar o limite de resistência a tração do material. Por fim a curva se acaba na região de estricção onde ocorreu a fratura do material. A Figura 18 ilustra um dos corpos de prova da amostra C.P. 1, já após o ensaio de tração. Ao se observar a Figura 18 é possível fazer um comparativo ao perfil mais comum de uma fratura do tipo moderadamente dúctil (Sessão 2.2.2; Figura 2 (b)), onde há um “empescoamento” moderado do material antes da ruptura.

Figura 18 - Corpo de prova fraturado – amostra C.P. 1.



Fonte: Autoria própria (2017).

Analisando as demais curvas experimentais médias, amostras C.P. 2 e C.P. 3, é nítida a mudança com que as mesmas se comportaram em função da presença de concentradores de tensão a medida em que seus corpos de prova eram tracionados. Ambas as curvas apresentaram uma região bem acentuada de regime elástico, entretanto, diferentemente da amostra C.P. 1, as demais regiões (Região de escoamento, endurecimento e estricção) começaram a ficar menos explicitas à medida em que se aumentava o diâmetro do concentrador ($D1 = 7,94$ mm para $D2 = 12,70$ mm). Fato este que pode ser explicado pelo motivo de que: materiais dúcteis ao serem submetidos à sobrecargas na presença de concentradores de tensão severos possuem a tendência

de se comportarem como materiais frágeis, ou seja, tendem a exibirem pouco ou nenhum escoamento antes de falharem (CALLISTER, 2002; CÂMARA, 2015).

Caso o material fosse realmente frágil, o mesmo ao ultrapassar a tensão de escoamento iria se romper, pois na maioria dos casos tais materiais possuem limite de proporcionalidade igual a tensão de ruptura (daí a importância que se usem fatores de concentração de tensão em projetos nos quais são utilizados materiais frágeis) e exibiriam perfil de fratura frágil semelhante ao descrito anteriormente (Sessão 2.2.2; Figura 2 (c)). Entretanto, por se tratarem de materiais dúcteis, nenhuma tensão que ultrapassou o limite de proporcionalidade resultou em trincas, pois nitidamente o material possuía resistência de reserva devido ao escoamento e endurecimento (GERE e GOODNO, 2013). Isso quer dizer que: durante o aumento da carga o material escoou ao redor do furo até que nenhuma carga maior pôde ser sustentada pelo corpo de prova (HIBBELER, 2010). Porém sob ação de um concentrador de tensão severo é perceptível que esse comportamento tende a ser menos nítido, fato esse que pode ser observado claramente comparando as curvas entre si, bem como com a representação esquemática de como se dar o comportamento de um diagrama tensão-deformação em tração para um material Frágil (Figura 9 – Curva B; sessão 2.5.3). As Figuras 19 e 20 mostram como ficaram um dos corpos de prova de cada amostra após o ensaio de tração.

Figura 19 - Corpo de prova fraturado – amostra C.P. 2.



Fonte: Autoria própria (2017).

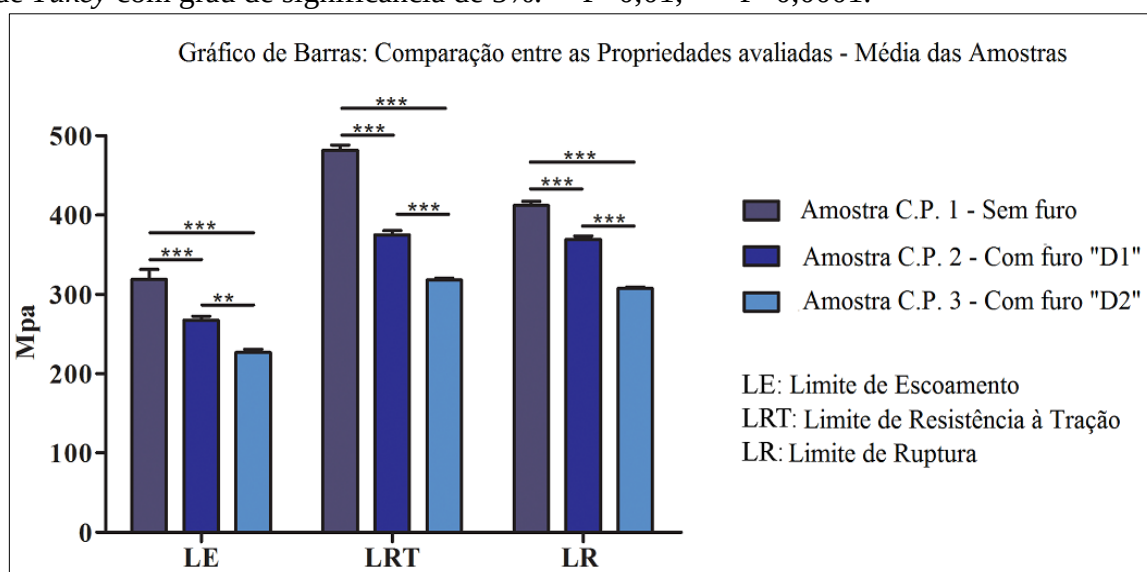
Figura 20 - Corpo de prova fraturado – amostra C.P. 3.



Fonte: Autoria própria (2017).

A seguir, no Gráfico 8 é possível verificar a análise estatística da média $\pm$ desvio padrão, de algumas propriedades (Limite de Escoamento, Limite de Resistência a Tração e Limite de Ruptura) obtidas do ensaio de tração entre amostras C.P. 1 – Sem furo, C.P. 2 – Com furo “D1” e C.P. 3 – Com furo “D2”.

Gráfico 8 - Propriedades médias das amostras $\pm$ desvio padrão: Limite de Escoamento, Limite de Resistência à Tração e Limite de Ruptura. Teste ANOVA *one-way* seguido de teste de Tukey com grau de significância de 5%. ** $P < 0,01$; *** $P < 0,0001$.



Fonte: Autoria própria (2017).

A partir do Gráfico 8, a análise estatística demonstrou que as amostras são significativamente diferentes entre si. Isso pode ser percebido na análise comparativa entre as amostras C.P. 2 e C.P. 3, respectivamente em relação à amostra C.P. 1. Tem-se que para Limite de Escoamento, houve redução de 16,23% e de 28,92%. Para o Limite de Resistência à Tração a redução foi maior, sendo de 22,15% e de 33,98%. Já para Limite de Ruptura, houveram valores de redução um pouco menores sendo de 10,33% e de 25,32%. Percebe-se deste modo que quanto mais representativo o concentrador de tensão, maiores serão as restrições em relação à deformação elástica, plástica e ao endurecimento por deformação do material. Ao se observar cada amostra separadamente, nota-se que com o efeito do concentrador de tensão, os valores das propriedades de Limite de Resistência a Tração e Limite de Ruptura tendem a se aproximarem bastante, e que quanto maior esse efeito, tal fenômeno começa também a ser observado com valores de Limite de escoamento (CÂMARA, 2015). A Tabela 12 fornece as informações tidas como base para esta analogia.

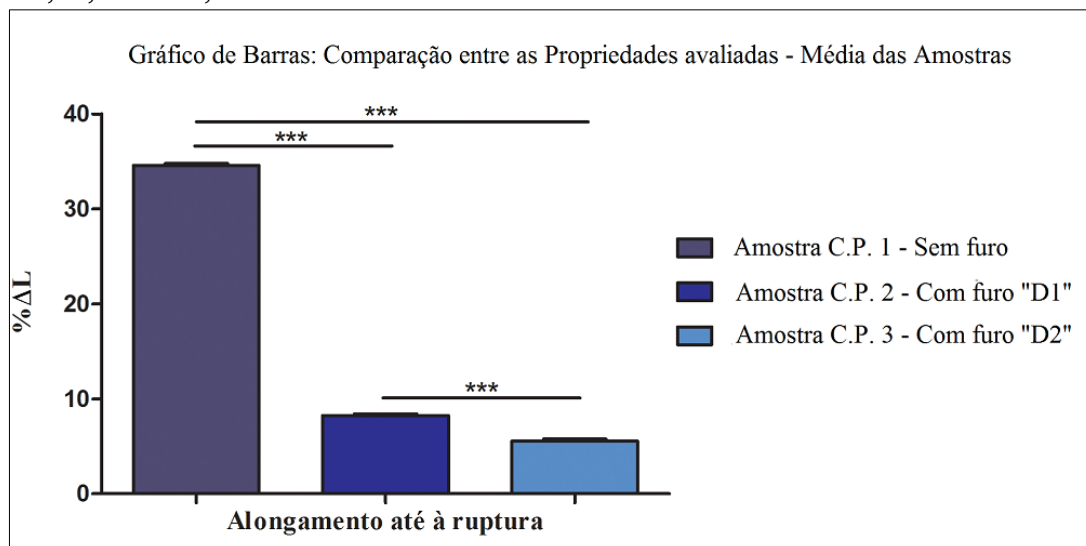
Tabela 12 - Análise comparativa entre as propriedades médias das amostras: Limite de Escoamento, Limite de Resistência à Tração e Limite de Ruptura.

Amostras C.P.	Limite de Escoamento (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)	Limite de Resistência a Tração (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)	Limite de Ruptura (Mpa)	Desvio Padrão (Mpa)
Amostra C.P. 1 – Sem furo	318,719	12,523	481,377	6,842	411,802	5,492
%Redução de C.P. 2 comparado à C.P. 1	16,23%	-	22,15%	-	10,33%	-
Amostra C.P. 2 – Com furo "D1"	267,006	5,474	374,754	5,447	369,273	4,256
%Redução de C.P. 3 comparado à C.P. 1	28,92%	-	33,98%	-	25,32%	-
Amostra C.P. 3 – Com furo "D2"	226,559	4,330	317,788	2,500	307,543	1,756

Fonte: Autoria própria (2017).

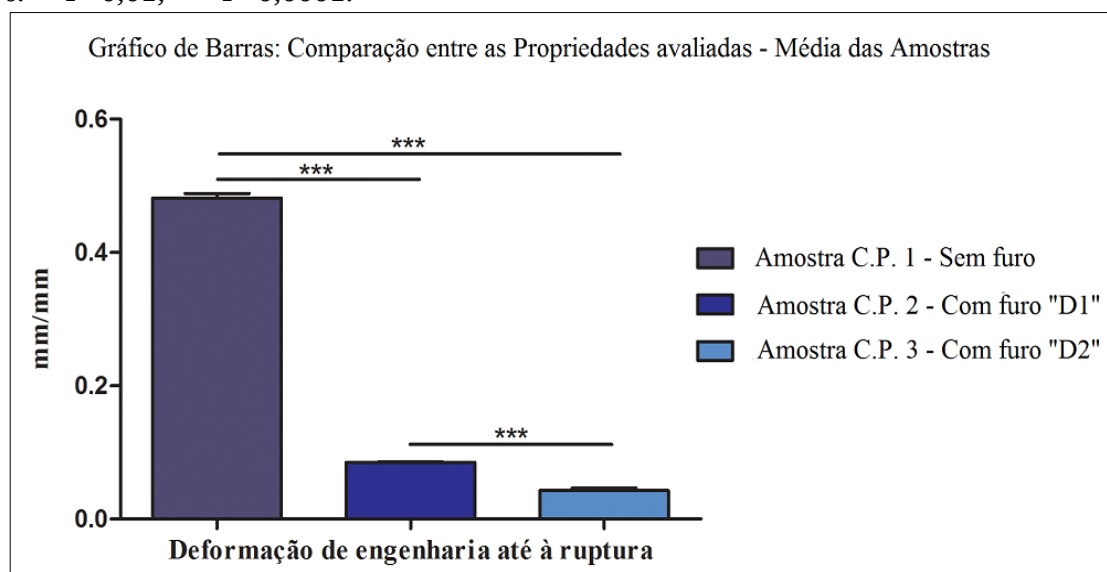
Os Gráficos 9 e 10 mostram a análise estatística da média $\pm$ desvio padrão de algumas propriedades (Alongamento até a ruptura e deformação de engenharia até a ruptura, respectivamente) obtidas do ensaio de tração das amostras C.P. 1 – Sem furo, C.P. 2 – Com furo “D1” e C.P. 3 – Com furo “D2”.

Gráfico 9 - Propriedades médias das amostras $\pm$ desvio padrão: Alongamento até à ruptura (ΔL %). Teste ANOVA one-way seguido de teste de Tukey com grau de significância de 5%. **P<0,01; ***P<0,0001.



Fonte: Autoria própria (2017).

Gráfico 10 - Propriedades médias das amostras $\pm$ desvio padrão: Deformação de engenharia até à ruptura. Teste *ANOVA one-way* seguido de teste de *Tukey* com grau de significância de 5%. ** $P < 0,01$; *** $P < 0,0001$.



Fonte: Autoria própria (2017).

A partir dos Gráficos 9 e 10, é perceptível que a análise estatística demonstrou que as amostras são significativamente diferentes entre si. Isso significa que para a propriedade de Alongamento até a ruptura (ΔL %) a amostra C.P. 1 apresentou um comportamento totalmente dúctil, diferentemente das amostras C.P. 2 e C.P. 3 que, devido a presença do concentrador, tiveram uma redução dessa propriedade numa ordem de 76,08% e 83,90%, respectivamente. Para a Deformação de engenharia até a ruptura, observou-se o mesmo comportamento já mencionado para a amostra C.P. 1, enquanto que para as amostras C.P. 2 e C.P. 3, a presença do concentrador fez com que houvesse, respectivamente, uma redução 82,29% e 91,16% dessa propriedade. Com isso é possível constatar o que já foi dito no início dessa sessão: que na presença de concentradores de tensão severos, materiais dúcteis ao serem sobrecarregados possuem a tendência de se comportarem como materiais frágeis, ou seja, tendem a exibirem pouco ou nenhum escoamento antes de falharem (CALLISTER, 2002; CÂMARA, 2015). A Tabela 13 fornece as informações tidas como base para esta analogia.

Tabela 13 - Análise comparativa entre as propriedades médias das amostras: Deformação de Engenharia até a ruptura e Alongamento até a ruptura (ΔL %).

Amostras C.P.	Deformação de Engenharia até ruptura	Desvio Padrão	Alongamento até ruptura (ΔL %)	Desvio Padrão
Amostra C.P. 1 – Sem furo	0,4817	0,012	34,567	0,379
%Redução de C.P. 2 comparado à C.P. 1	82,29%	-	76,08%	-
Amostra C.P. 2 – Com furo "D1"	0,0853	0,001	8,267	0,208
%Redução de C.P. 3 comparado à C.P. 1	91,16%	-	83,90%	-
Amostra C.P. 3 – Com furo "D2"	0,043	0,006	5,567	0,321

Fonte: Autoria própria (2017).

A análise do Módulo de Elasticidade para esta parte do trabalho foi desconsiderada, uma vez que os valores médios obtidos através do ensaio de tração não forneceram valores satisfatórios. Uma possível fonte de erro para este fato, pode ter sido a execução do ensaio de tração sem a utilização de extensômetros, uma vez que a máquina de ensaios de tração por si só não é capaz de medir com precisão as deformações que ocorrem na região de regime elástico do material (DINIZ, 2014).

4.1.5 Fator de concentração de tensão “K”

Antes de se estimar o valor do fator de concentração “K” para cada uma das amostras, é importante lembrar alguns pontos ditos na literatura estudada: 1) O efeito de concentração de tensão é muito mais significativo em materiais que se comportam de maneira frágil, quando comparado com materiais dúcteis (Sessão 2.3.1). Caso o material seja dúctil, os projetistas normalmente desprezam a utilização de concentradores de tensão; 2) As curvas de concentração de tensão conhecidas podem ser determinadas considerando carregamento estático, contando que a tensão do material não ultrapasse o limite de proporcionalidade (Sessão 2.3.4); 3) Do princípio de Saint – Venant, sabe-se que em distâncias em relação ao furo iguais ou maiores que a largura b da barra, a distribuição de tensão será uniforme e igual à carga P dividida pela área total da seção transversal ($\sigma = P/bt$). De acordo com Shigley (2011), é perspicaz basear a avaliação do fator de concentração de tensão na área não entalhada, ou seja, considerando pelo o *princípio de Saint-Venant*, uma região suficientemente distante do furo de modo que a área utilizada para cálculo das tensões máxima e nominal da Equação 4, será a área não entalhada ou área total. 4) A distribuição de tensão que fornece os valores de tensão máxima e

mínima para determinação dos valores de “ K_t ” na região do furo podem ser determinadas pela análise matemática, pela teoria da elasticidade ou por meio de experimentos onde mede-se deformação normal e determina-se a tensão por meio da Equação 3 da Lei de Hooke (HIBBELER, 2010). A deformação normal máxima e mínima pode ser medida experimentalmente através da colocação de extensômetros na borda interna do furo e na borda externa lateral da barra alinhada ao centro do furo, conforme Franquetto (2007).

Como já foi mencionado o fator geométrico de concentração de tensão pode ser determinado pela Equação 4. De acordo com Budynas (2011) é possível estimar uma tensão nominal se o elemento estiver livre de concentrações de tensão. Para a situação de solicitação em que foram submetidos os corpos de prova da amostra C.P. 1 o fator geométrico de concentração é definido como sendo ($K_{t1médio} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 1$), pois a tensão máxima em quem o material sofre escoamento deve ser igual tensão nominal se o membro estiver livre de concentradores de tensão (SHIGLEY, 2011). Logo, $\sigma_{max} = \sigma_{nom} = 318,719$ Mpa (Tabela 12).

Para a amostra C.P. 2, tem-se para o Limite de Escoamento médio correspondente (Tabela 12) e a tensão máxima definida inicialmente para o membro em estado livre de concentradores de tensão um $K_{t2médio} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{318,719}{267,006} = 1,194$.

Já para a amostra C.P. 3. Tem-se para o Limite de Escoamento médio dado (Tabela 12) e a tensão máxima definida inicialmente para o membro em estado livre de concentradores de tensão $K_{t3médio} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{318,719}{226,559} = 1,407$

Para esta análise, percebe-se que o efeito de aumento de concentração de tensão em relação a amostra C.P.1 é de 19,4% para amostra C.P.2, já para a amostra C.P.3 é de 40,7%.

É importante comentar sobre tais resultados que a máquina de ensaios de tração fornece apenas valores de força crescente em função da deformação do material como um todo, o que não permite uma análise mais criteriosa da região de concentração de tensão. A Tabela 14 fornece os valores dos “ $K_{tmédio}$ ” para cada amostra, bem como a porcentagem de aumento de concentração de tensão em relação à amostra C.P. 1.

Tabela 14 - Valor estimado do concentrador de tensão médio para as amostras C.P. 1 – sem furo, C.P. 2 – com furo “D1” e C.P. 3 – Com furo “D2” – Análise de uma região suficientemente distante do furo.

Amostras C.P.	Valor estimado do concentrador de tensão " $K_{tmédio}$ "	Área Considerada (mm ²)
Amostra C.P. 1	$K_{t1médio} = 1$	120,968
%Aumento K_t de C.P. 2 comparado à C.P. 1	19,4%	-
Amostra C.P. 2 - Com furo "D1"	$K_{t2médio} = 1,194$	120,968
%Aumento K_t de C.P. 3 comparado à C.P. 1	40,7%	-
Amostra C.P. 3 - Com furo "D2"	$K_{t3médio} = 1,407$	120,968

Fonte: Autoria própria (2017).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

Para este trabalho, permitiu-se através do ensaio de tração convencional com carga axial, entender de forma mais clara os fundamentos e conceitos teóricos relacionados a falha e concentradores de tensão em materiais metálicos, especificamente em corpos de provas de aço de baixo carbono, com e sem concentradores de tensão.

Percebeu-se que os corpos de provas que não haviam concentradores de tensão exibiram comportamento semelhante ao observado em materiais dúcteis, se deformando plasticamente ao serem sobrecarregados até a ruptura. Através da análise estatística das propriedades obtidas pelas curvas tensão de engenharia *versus* deformação de engenharia demonstrou-se que as amostras eram significativamente diferentes entre si e que a presença de um concentrador de tensão tem sim influência significativas sobre as propriedades avaliadas do material. De um modo mais geral, notou-se que materiais dúcteis ao serem sobrecarregados na presença de concentradores de tensão severos possuem uma forte tendência de se comportarem como materiais frágeis, exibindo pouco ou nenhum escoamento antes de falharem.

5.2 Sugestões para estudos futuros

Este trabalho se faz importante, pois dá subsídios para outras tentativas de estudos futuros visando melhoria do que foi executado. Entre essas melhorias, podem ser listadas: 1) Utilização de maior quantidade de corpos de provas (no mínimo 5) de modo a reduzir os erros aleatórios e sistemáticos, bem como o desvio padrão dos resultados obtidos; (2) Obtenção de um material considerado frágil para análise, uma vez o fator de concentração não é considerado em projetos onde há a aplicação de materiais dúcteis; (3) Para uma avaliação mais acurada do fator de concentração " K_t " se utilizar de métodos computacionais como o método dos elementos finitos. Já para a abordagem experimental utilizar método da foto-elasticidade, ou ainda, os métodos de malha, de película frágil e os métodos de medida elétrica de deformação.

REFERÊNCIAS

HIBBELER, R. C. **Estática: mecânica para engenharia**, vol. 1 / R. C. Hibbeler; tradução Everi Antonio Carrara, Joaquim Nunes Pinheiro; revisão técnica Wilson Carlos da Silva Junior. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

HIBBELER, R. C.; **Estática: Mecânica para engenharia** / Tradução Daniel Vieira – 12 Ed. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

HIBBELER, R. C.; **Resistência dos Materiais** / Tradução Arlete Simille Marques; Revisão técnica Sebastião Simões da Cunha Jr. – 7. Ed. – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010, 641p.

GERE, J. M.; GOODNO. B. J.; **Mecânica dos Materiais** / Tradução Luis Fernando de Castro Paiva, All Tasks; revisão técnica Marco Lucio Bittencourt, Demetrio C. Zachariadis. – 7. Ed. – São Paulo: Cengage Learning, 2013, 860p.

BEER, F. P., et al.: **Mecânica dos Materiais** / Tradução técnica José Benaque Rubert, Walter Libardi. – 5. Ed. – Porto Alegre: AMGH, 2011, 800p.

BEER, F.P. e JOHNSTON, R.E. e EISENBERG, E.R.: **Mecânica Vetorial para Engenheiros: Estática**. 7. Ed. São Paulo: MacGraw-Hill, 2006, 620p.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 705 p.

CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5e d. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 2002.

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

SHIGLEY, J. E. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005. 960p.

BUDYNAS, Richard G. **Elementos de Máquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mécânica**. 8ª ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

CALLISTER William D., Jr. - John Wiley & Sons, Inc. **Materials Science and Engineering An Introduction**, New York, NY, 1991.

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

ASTM E 8M, **Standard Test Method for Tension Testing of Metallic Materials**. American Society for Testing and Materials, 2008.

CHIAVERINI Vicente, **Aços e Ferros Fundidos – ABM**, 7 ed, São Paulo, 1988.

MONTEIRO, Alberto de Castro. **Estudo do Comportamento dos Aços Ferramentas Soldados em Fadiga**. 2011. 88f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2011.

ASKELAND, D.R.; PHULÉ, P.P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2013.

CÂMARA, J. B. C. **Estudo dos concentradores de tensão no aço sae 1020 submetido ao ensaio de tração**. 2015. 49 p. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

DINIZ, G. F. **Comportamento mecânico do aço sae 1045: identificação de parâmetros de comportamento não linear através de experimentos e simulações numéricas**. 2014. 92 p. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

FRANQUETTO, P. R. **Otimização paramétrica de concentradores de tensões clássicos**. 2007. 183 p. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

FREITAS, E. H. S. **Avaliação da influência de concentradores de tensão em chapas de aço: uma abordagem experimental**. 2015. 76 p. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.