



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS - DCAT
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

YURI SLOVIC OLIVEIRA POMBO

**CONCENTRADORES DE TENSÃO: ANÁLISE SOBRE ALÍVIO GEOMÉTRICO DE
TENSÃO**

MOSSORÓ

2017

YURI SLOVIC OLIVEIRA POMBO

**CONCENTRADORES DE TENSÃO: ANÁLISE SOBRE ALÍVIO GEOMÉTRICO DE
TENSÃO**

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

Orientador: Prof^o.Dr. Fabrício José Nóbrega Cavalcante

MOSSORÓ

2017

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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

P784c Pombo, Yuri Slovic Oliveira.
Concentradores de Tensão: análise sobre alívio
de geométrico de tensão / Yuri Slovic Oliveira
Pombo. - 2017.
41 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. Alívio
geométrico de tensão. 3. Ensaio de tração. I.
Cavalcante, Fabrício José Nóbrega, orient. II.
Título.

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

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.

YURI SLOVIC OLIVEIRA POMBO

CONCENTRADORES DE TENSÃO: ANÁLISE SOBRE ALÍVIO GEOMÉTRICO DE TENSÃO

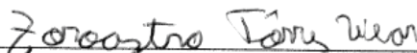
Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 22 / 05 / 2017.

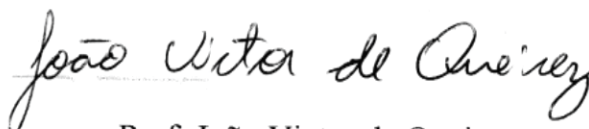
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Fabrício Jose Nóbrega Cavalcante



Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar



Prof. João Victor de Queiroz

AGRADECIMENTOS

Em meio a tantos que devo, no mínimo, esses agradecimentos, gostaria de poder me expressar da maneira mais clara e sincera possível, sem cometer injustiças quanto àqueles que fizeram e fazem parte desta jornada;

Primeiramente, devo tudo a Deus e gostaria de agradecê-lo da forma mais pura e próxima, onde neste projeto maior, a vida, sempre senti sua presença onde quer que fosse;

Aos meus pais que são soberanos e, para mim, sempre serão donos das melhores decisões que já tomei e tomarei. Eles formam grande parte de quem sou, com muito orgulho. Não me sinto capaz de expressar por meio deste o amor incondicional que tenho por eles;

Aos meus irmãos Ykaro Pombo, Yan Pombo, Yana Pombo e Yasmine Pombo, aos quais me sinto perto apesar da distância e tenho por eles um amor imensurável;

Aos meus sobrinhos Júlia Pombo, Gustavo Pombo, Clara Pombo e Murilo Pombo, aos quais tenho um amor enorme e são um dos meus maiores motivos de continuar seguindo;

A Tamires Brasil e sua família, sempre paciente e serena, agradeço-lhe pelo amor, carinho, atenção e por estar sempre ao meu lado quando achei que não conseguiria;

Aos meus primos, principalmente Eduardo Segundo e Daniel Segundo, por serem meus irmãos de coração e que desejo, sempre, que permaneçam em todas as jornadas da minha vida;

Aos meus amigos Allison Moura, Breno Figueirêdo, Paulo Vidal e Raimundo Nonato, quando, em momentos difíceis, pude perceber que nossa amizade é para toda a vida – Obrigado, amigos!

Ao meu orientador Fabrício José Nóbrega Cavalcante, que mostrou o caminho e me ajudou bastante para a conclusão deste projeto, sempre com paciência e prontidão;

RESUMO

O presente trabalho fez uma abordagem aos concentradores de tensão, analisando os efeitos do alívio geométrico de tensão, onde foram submetidos corpos de prova a ensaios destrutivos de tração. Para isso, foi utilizado de corpos de prova cilíndricos com entalhes que se assemelham a um acoplamento de anel de vedação, além de uma máquina de ensaios de tração, capaz de armazenar dados como tempo, força de tração durante o ensaio e o alongamento dos espécimes. Os corpos de prova foram fabricados de acordo com a norma ASTM E 8M, para o aço SAE 1020. Os resultados derivados do ensaio foram plotados no software Excel, gerando curvas de tensão de engenharia-deformação, possibilitando a determinação de uma gama de variáveis: tensão de engenharia de ruptura, limite de escoamento, força de tração, etc. Os resultados encontrados foram analisados e estão contidos neste trabalho, assim como tabelas e gráficos úteis. Pode-se concluir que o alívio geométrico de tensão mostrou uma relativa eficácia, diminuindo, portanto, os efeitos dos concentradores de tensão.

Palavras-Chave: Concentradores de tensão. Alívio geométrico de tensão. Ensaio de tração.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição e Características Mecânicas do Aço SAE 1020	25
Tabela 2 - Valores do diagrama tensão de engenharia-deformação para CP sem entalhe	32
Tabela 3 - Valores do diagrama tensão de engenharia-deformação para CP com entalhe de raio 1,5 mm.....	34
Tabela 4 - Valores do diagrama tensão de engenharia-deformação para CP com alívio geométrico de tensão	36
Tabela 5 - Comparativo entre os corpos de prova	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elemento de tensão bidimensional	14
Figura 2 - Tensões principais em um elemento bidimensional	15
Figura 3 - Estágios de uma fratura.....	17
Figura 4 - Barra plana com concentradores de tensão.....	18
Figura 5 - Análise fotoelástica da distribuição de tensão	19
Figura 6 - Diagrama Tensão-Deformação: aço baixo carbono.....	20
Figura 7 - Fator geométrico de concentrador de tensão K_t para um eixo com sulco em tração axial	22
Figura 8 - Alívios geométricos de tensão	23
Figura 9 - Exemplo de formas de alívio geométrico de tensão	24
Figura 10 - Exemplo de alívio geométrico de tensão	24
Figura 11 - Corpo de prova para Ensaio de Tração.....	25
Figura 12 - Diagrama tensão-deformação do aço baixo carbono.....	26
Figura 13 - Dimensões de corpo de prova sem entalhe.....	28
Figura 14 - Dimensões de corpo de prova com um entalhe	28
Figura 15 - Dimensões do corpo de prova com três entalhes.....	29
Figura 16 - Máquina de ensaios de Tração.....	29
Figura 17 - Corpos de prova usinados.....	31
Figura 18 - Curvas tensão de engenharia-deformação com CP sem entalhe.....	32
Figura 19 - Curvas tensão de engenharia-deformação para os CP com entalhe de raio 1,5 mm	33
Figura 20 - Curvas tensão de engenharia-deformação para os CP com alívio geométrico de tensão.....	35
Figura 21 - Comparativo entres os corpos de prova com entalhe de 1,5 mm e os corpos de prova com alívio geométrico de tensão	38

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. Objetivos Gerais	12
2.2. Objetivos Específicos.....	12
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	13
3.1. Definição de Tensão e deformação	13
3.1.1. Tensão	13
3.1.2. Deformação	14
3.1.3. Tensões principais	14
3.1.4. Estado Plano de Tensão e Deformação	15
3.2. Teoria das Falhas.....	16
3.2.1. Falhas em materiais dúcteis e frágeis.....	16
3.3. Definição de Concentradores de Tensão	17
3.3.1. Concentradores de tensão: cargas estáticas e sua relação com o material	19
Materiais Dúcteis.....	19
Materiais frágeis.....	20
3.3.2. Concentradores de tensão: materiais dúcteis e frágeis sob cargas dinâmicas	21
3.3.3. Fator de concentração geométrico K_t	21
3.3.4. Redução do efeito dos concentradores de tensão	22
3.4. Propriedade do Aço SAE 1020	24
3.5. Ensaio de Tração	25
4. METODOLOGIA	28

4.1.	Corpo de prova	28
4.2.	Ensaio de Tração	29
4.3.	Procedimentos realizados.....	30
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
5.1.	Corpo de prova Sem Entalhe.....	31
5.2.	Corpo de prova com um entalhe de raio 1,5 mm	33
5.3.	Corpos de prova com entalhe central de raio 1,5 mm e alívios geométricos de tensão de raio 1,0 mm	35
5.4.	Comparativo entre os corpos de prova com e sem entalhes	37
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
7.	REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

Mecanismos desenvolvidos para desempenhar funções são formados por conjuntos de componentes que possuem geometrias definidas a fim de garantir a funcionalidade dos mesmos. Eixos, por exemplo, possuem, entre outras características, diâmetros variáveis, rasgos de chavetas, furos etc., para garantir o acoplamento de outros componentes. São características inerentes à maioria dos mecanismos desenvolvidos e que muitas vezes não podem deixar de fazer parte deles. Todos os projetos que apresentem quaisquer mudanças geométricas na seção transversal de seus componentes estão sujeitos ao surgimento de concentradores de tensão e consequentemente a inutilização destes componentes em decorrência de falhas.

Podem ser submetidas a esses materiais cargas estáticas e/ou dinâmicas, onde os concentradores de tensão irão trabalhar como amplificadores de tensão naqueles pontos. Peças mecânicas que inicialmente suportariam magnitudes elevadas de cargas podem ter sua funcionalidade comprometida ao serem submetidas a cargas menores.

A ocorrência de falhas em materiais e, consequentemente, perda de funcionalidade dos mesmos, pode ser caracterizado, em termos do comportamento do componente mecânico, como falha dúctil ou frágil. A afirmação dessa característica é baseada em quantidade de material escoado em torno da falha; grande quantidade de material escoado na região pode ser considerada falha dúctil, caso contrário, frágil.

Toda essa análise na confecção de um projeto faz-se necessário por motivos óbvios, onde o intuito sempre é eliminar ou reduzir os efeitos de concentradores de tensão em seus componentes. Quando se faz um estudo de projeto a ser fabricado, levam-se em consideração os tipos e formatos de entalhes, raios de curvatura, furos etc., para que se defina o fator de concentração de tensão, e partir dele, definir o fator de projeto. Esses parâmetros servirão para determinar a máxima aplicação que aquele projeto poderá suportar.

O presente trabalho utilizará de metodologia consolidada de alívio geométrico de concentradores de tensão, analisando as forças internas de tensão de componentes sob efeito de força trativa. Para isso, foi utilizado de corpos de prova cilíndricos, com entalhes variados, que se assemelham a um acoplamento de anel de vedação, além de uma máquina de ensaios de tração. O presente estudo foi embasado na norma ASTM E 8M, com objetivo de validação de ensaio, utilizando do Aço SAE 1020.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

Estudo dos concentradores de tensão, utilizando-se de formas de alívio geométrico de tensão para o aço SAE 1020 com formato cilíndrico, realizando ensaio destrutivo de tração.

2.2. Objetivos Específicos

- Submeter corpos de prova cilíndricos de aço SAE 1020 à ensaio de tração;
- Avaliar resultados obtidos através do ensaio de tração para corpos de prova com alívio geométrico de tensão;

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Definição de Tensão e deformação

3.1.1. Tensão

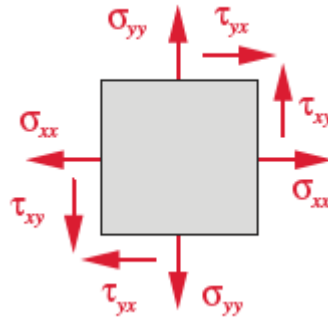
A tensão pode ser definida como a força aplicada em uma unidade de área, onde geralmente é expressa em psi ou MPa. Em se tratando de análises infinitesimais do material, é possível que eles experimentem diferentes tensões ao mesmo tempo. Dessa forma, devemos olhar as tensões atuando sobre elementos extremamente pequenos dentro do corpo. É comum encontrar figuras cúbicas para a representação destes elementos e as tensões as quais estes experimentam. Podem haver duas formas de componentes de tensão sobre a face dos cubos: tensões normais, segundo Norton (2013), atuam na direção perpendicular à face do cubo e tendem a puxá-lo (tensão normal de tração) ou empurrá-lo (tensão normal de compressão). As tensões de cisalhamento atuam em pares e em direções opostas, são paralelas as faces dos elementos infinitesimal do cubo e tendem a distorcer-lo. Quando há tensões normais e de cisalhamento atuando em um elemento infinitesimal podemos caracterizá-los como termos de um tensor. (NORTON, 2013)

A tensão é um tensor de segunda ordem e por isso necessitam de nove componentes que o descrevam em três dimensões. Muitos dessas componentes requerem uma representação 3D, porém em alguns casos especiais é possível trata-los com estado de tensões bidimensionais. A matriz de um tensor bidimensional é evidenciada abaixo. (NORTON, 2013)

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A Figura 1 ilustra uma disposição em 2D das tensões normais e de cisalhamento experimentadas por um elemento infinitesimal e está disposta abaixo.

Figura 1 - Elemento de tensão bidimensional



Fonte: Norton, (2013).

A Figura 1 representa as direções normais do plano xy de um cubo.

3.1.2. Deformação

A lei de Hooke relaciona a tensão e deformação de forma linear na zona elástica da maioria dos materiais de engenharia. A deformação também é um tensor de segunda ordem e pode ser expressa para o caso 2D como mostrado na matriz abaixo. (NORTON, 2013)

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Sendo ϵ a deformação normal ou de cisalhamento. O que as diferem são os subscritos. Os subscritos xx e yy representam tensões normal nos respectivos eixos, podendo ser simplificada simplesmente por x, para indicar tensão normal naquele eixo, ou apenas y, pelo mesmo motivo. Os subscritos xy e yx representam as tensões de cisalhamentos, indicando o sentido na qual cada uma acontece. (NORTON, 2013)

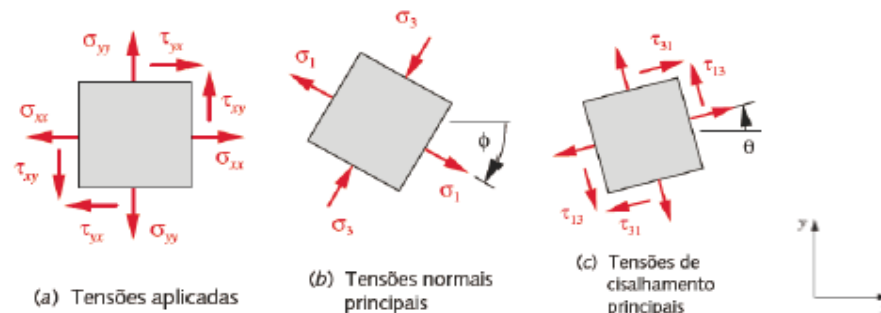
3.1.3. Tensões principais

A Figura 2 ilustra sistemas de eixos arbitrários, geralmente escolhido por conveniência para facilitar cálculos. Para o Norton, qualquer combinação particular de tensões aplicadas,

haverá uma distribuição contínua deste campo de tensão em torno de qualquer ponto analisado. Ele prossegue: as tensões normal e de cisalhamento no ponto irão variar com a direção em qualquer sistema de coordenada escolhido e haverá sempre planos nos quais as componentes de tensão de cisalhamento serão nulas. (NORTON, 2013)

As tensões principais são tensões normais que atuam nestes planos, que por sua vez, atuam nos planos principais. As direções da superfície normais aos planos principais são chamadas de eixos principais, sendo as tensões que atuam nestas direções chamadas de tensões normais principais. As tensões de cisalhamento principais atuam em planos com angulação de 45° em relação aos planos das tensões normais principais. A figura 2 ilustra os planos e tensões principais para o caso bidimensional utilizado anteriormente. (NORTON, 2013)

Figura 2 - Tensões principais em um elemento bidimensional



Fonte: Norton, (2013).

3.1.4. Estado Plano de Tensão e Deformação

Geralmente o estado de tensão e deformação é tridimensional, porém existem geometrias particulares que podem ser tratadas de maneira diferente.

Estado plano de tensões

Estado plano de tensões é também conhecido como estado de tensões bidimensional, ou biaxial. Segundo Norton, o estado plano de tensões requer que uma das tensões principais seja igual a zero, considerando esta situação bastante comum em algumas condições. Uma placa fina, por exemplo, pode apresentar um estado de tensão plano em seus contornos ou pontos de fixação.

Estado plano de deformação

Segundo Norton, existem deformações principais associadas a tensões principais e, no caso de uma dessas deformações ser zero e as outras deformações não variarem seu valor ao longo do eixo principal, então tem-se um estado plano de deformações.

3.2. Teoria das Falhas

As explicações acerca de tensões principais e estado plano de tensão realizado anteriormente é muito importante para compressão do que acontece quando submetemos um elemento a determinados esforços e suas direções vetoriais. Porém, a nível de engenharia, é vital nos atermos mais nas teorias de falhas, como elas ocorrem, como caracterizá-las e, principalmente, evitá-las.

Os motivos as quais se deseja eliminar as falhas são óbvios: custo adicionais, segurança de operadores, retrabalho, parada de produção, etc. É serviço do engenheiro preveni-las e, na grande maioria dos casos, é tarefa complicadíssima, visto que temos diversos fatores que podem resultar em falhas: aplicação de material impróprio, cargas elevadas, condições ambientais adversas (clima, ambiente corrosivo, etc.), projeto falho, plano de manutenção mal executado, etc. Caso não seja possível evita-las, também é de obrigação do engenheiro identificar os motivos das ocorrências, sempre com intuito de evita-las posteriormente.

3.2.1. Falhas em materiais dúcteis e frágeis

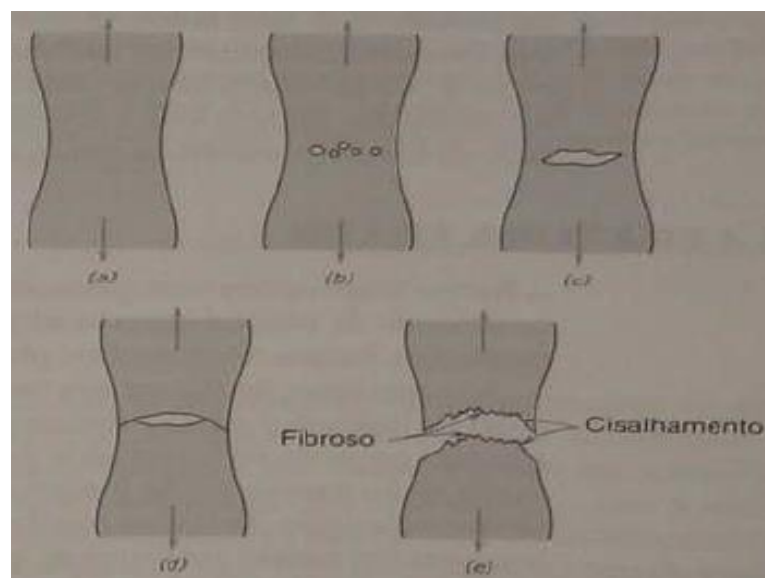
Um dos modos de falha mais conhecido é por fratura, que é a separação de um corpo em duas ou mais partes. Em se tratando do comportamento do aço (material que iremos abordar neste projeto) no momento em que fraturas ocorrem, existem duas formas que são tipicamente utilizadas para defini-la: fratura dúctil ou frágil. São classificadas através da característica do material em apresentar deformação plástica diante de uma falha. Embora em algumas situações específicas materiais dúcteis podem se comportar como frágeis, porém demonstrar este comportamento não é intuito deste projeto. As tensões aplicadas a estes materiais podem ser de diversas naturezas: tração, compressão, cisalhamento ou torção. (CALLISTER, 2008)

Para Callister (2008), ambos os processos de fratura envolvem duas etapas: formação e propagação de trincas em resposta à imposição de uma tensão. Dessa forma, o modo de falha é

altamente dependente do mecanismo da propagação da trinca. A fratura dúctil é caracterizada por uma extensa deformação plástica na vizinhança de uma trinca em desenvolvimento. O processo prossegue de maneira relativamente lenta, na medida em que o comprimento da trinca aumenta. Em se tratando de fratura frágil, as trincas podem se propagar de maneira extremamente rápida, acompanhada de pouquíssima deformação plástica. Este tipo de trinca é considerada instável e não estaciona uma vez que a trinca iniciada, mesmo sem aumento de tensão. (CALLISTER, 2008)

Segundo Callister (2008), o processo de fratura ocorre normalmente em vários estágios. Primeiramente ocorre o empescoamento (a), logo após pequenas cavidades no interior da seção transversal do material (b), à medida que a deformação prossegue. Depois disso, esses microvasios aumentam, se unem e coalescem formando uma trinca elíptica (c). A trinca cresce paralelamente ao seu eixo principal (d) e finalmente a fratura (e) ocorre devido a rápida propagação da trinca ao redor do pescoço. A Figura 3 ilustra esse processo. (CALLISTER, 2008)

Figura 3 - Estágios de uma fratura



Fonte: Callister, (2008).

3.3. Definição de Concentradores de Tensão

Projetos desenvolvidos surgem da necessidade de se solucionar problemas dos mais variados tipos, exigindo daquele que o executa habilidades suficientes para a entrega de um bom projeto. Projetos mecânicos são meticulosamente desenvolvidos onde, em síntese, são

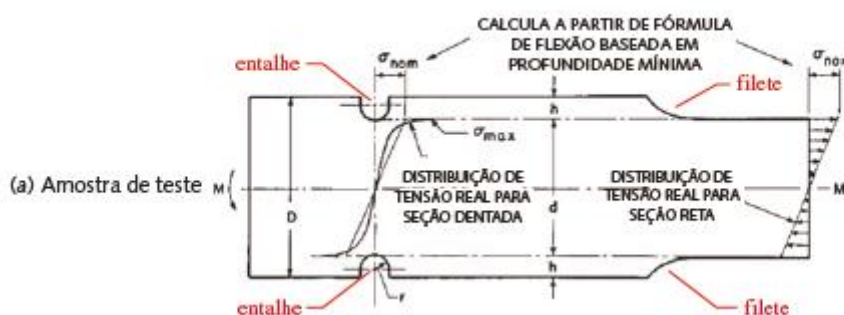
considerados alguns pontos como: funcionalidade, segurança, confiabilidade, custo e peso. Estes fatores não foram citados ao acaso, já que em todos eles há a influência dos concentradores de tensão, um dos maiores causadores de falhas em projetos mecânicos. (BUDYNAS E NISBETT, 2011)

A distribuição de tensão em determinado elemento é considerada uniforme quando não há variações na sua seção, dessa forma, a aplicação das equações fundamentais de tensão por tração, compressão, flexão e torção, podem ser aplicadas.

Concentradores de tensão são caracterizados na presença de variação na seção transversal dos mecanismos, onde na maioria dos casos são inerentes ao funcionamento dos mesmos. Essas variações ocorrem devido a peculiaridades como furos, rasgos, diminuições diametrais, entre outros, apresentando alteração na distribuição de tensão acerca da descontinuidade. Dessa forma, faz-se necessário mais do que as equações fundamentais de tensão, já que é rara a inexistência de projetos que não apresentem variação geométrica. As regiões às quais se observam os concentradores de tensão podem ser chamadas de áreas de concentração de tensão. (NORTON, 2013)

A figura 4 ilustra uma barra plana, onde podem ser observadas características de fabricação que ocasionam concentradores de tensão.

Figura 4 - Barra plana com concentradores de tensão



Fonte: Norton, (2013).

A barra está sujeita a um momento fletor, onde através de uma análise de tensão fotoelásticas foi possível estabelecer sua distribuição de tensão, bem como a influência dos concentradores de tensão. A figura 5 ilustra a distribuição de tensão na barra sujeita a um momento fletor na presença de entalhes e chanfros. (NORTON, 2013)

Figura 5 - Análise fotoelástica da distribuição de tensão



Fonte: Norton, (2013).

É possível observar distorções na orientação da tensão nas regiões de concentração de tensão e uma distribuição de tensão uniforme na extremidade direita da barra, representada pelas retas igualmente espaçadas, explicado pela não variação na geometria da barra.

Para se eliminar e/ou reduzir os concentradores de tensão provinda das características geométricas de cada mecanismo deve-se quantificar a influência que este exerce no elemento. Esta quantificação é feita através da determinação do fator geométrico de concentração de tensão (K_t e K_{ts}), que varia de acordo com a geometria da peça e do entalhe. Através das equações abaixo é possível determinar a tensão máxima teórica a qual um concentrador de tensão pode ser submetido. (NORTON, 2013)

$$\sigma_{\text{máx}} = K_t \cdot \sigma_{\text{nom}} \quad (2)$$

$$\tau_{\text{máx}} = K_{ts} \cdot \tau_{\text{nom}} \quad (3)$$

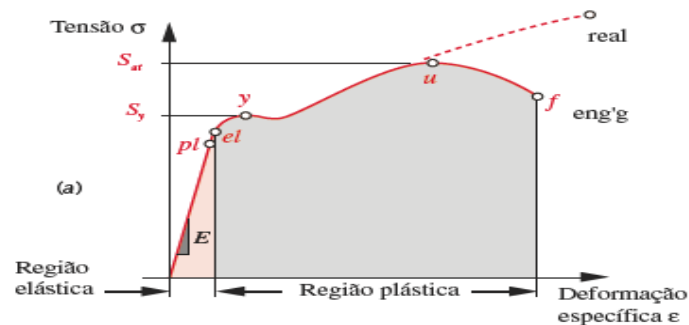
Onde K_t e K_{ts} são fatores de concentração de tensão teóricos para tensões normais e cisalhantes, respectivamente. E, σ_{nom} e τ_{nom} , são as tensões nominais e de cisalhamento, respectivamente, que correspondem as tensões às quais uma geometria uniforme é submetida.

3.3.1. Concentradores de tensão: cargas estáticas e sua relação com o material

Materiais Dúcteis

Segundo Norton (2013) “os materiais dúcteis escoam localmente em torno do ponto de aumento de tensão enquanto as partes do material distantes da descontinuidade geométrica permanecem abaixo do ponto de escoamento”. Ao escoar localmente, este apresenta uma zona de não-linearidade e baixa declividade na curva tensão-deformação, evitando aumentos consideráveis de tensão naquele ponto. Devido a esta característica apresentada pelos materiais dúcteis diante de solicitações estáticas a utilização do fator de concentração de tensão geométrico é desconsiderada. A figura 6 mostra a curva de tensão-deformação para materiais de baixo carbono, com o intuito de ilustrar as zonas de não-linearidade e declividade citadas acima. (NORTON, 2013)

Figura 6 - Diagrama Tensão-Deformação: aço baixo carbono



Fonte: Norton, (2013).

Norton (2013) “Apenas quando toda a seção transversal atingir o ponto de escoamento é que o diagrama $\sigma - \epsilon$ continuará até o ponto onde ocorre a falha por fratura”.

Materiais frágeis

Os materiais frágeis não escoam localmente, uma vez que não apresentam uma zona plástica de deformação, dessa forma, concentradores de tensão tem efeitos sobre este material quando sujeitos a cargas estáticas. Ao ser excedido além do limite de ruptura, o material apresentará trincas o que, por sua vez, ocasionará no aumento da concentração de tensão, assim

falhando rapidamente. Sendo assim, mesmo sob solicitações estáticas, o fator de concentrador de tensão deve ser aplicado aos materiais frágeis. (NORTON, 2013)

Mesmo com o comportamento dos materiais frágeis em solicitações estáticas é comum não considerar o fator de concentrador de tensão em materiais fundidos frágeis. A explicação é que, já que o processo de fundição imprime ao material muitas heterogeneidades e descontinuidades (concentradores de tensão), os dados de resistência apresentados por esses materiais já possuem tais fatores embutidos, fazendo com que os concentradores de tensão resultantes da geometria do material contribuam de forma mínima. (NORTON, 2013)

3.3.2. Concentradores de tensão: materiais dúcteis e frágeis sob cargas dinâmicas

Os materiais dúcteis se comportam como frágeis quando são submetidos a carregamentos dinâmico, isto ocorre devido ao encruamento realizado pelo material ocasionado pela constante solicitação mecânica imposta ao mesmo. Ao longo deste processo, o material dúctil diminui sua capacidade de deformar plasticamente, falhando de forma frágil. Por tanto, materiais dúcteis se comportam como frágeis, havendo a necessidade de se utilizar o fator de concentrador de tensão para ambos. (NORTON, 2013)

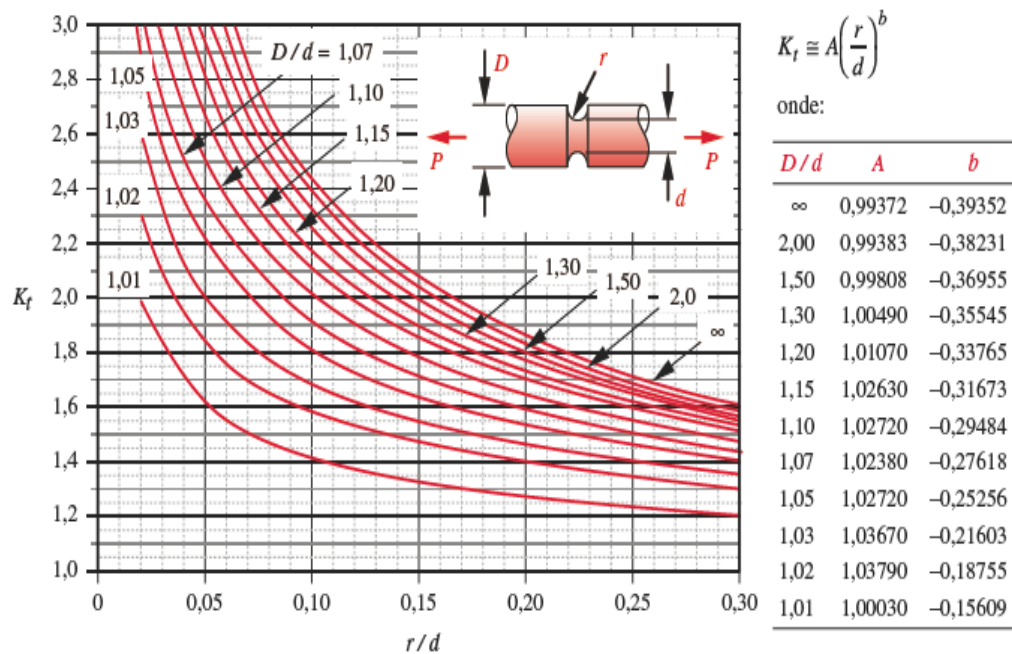
3.3.3. Fator de concentração geométrico K_t

Como já dito, concentradores de tensão variam de acordo com geometria do elemento em estudo, onde a teoria da elasticidade consegue fornecer funções de concentradores de tensão para algumas geometrias simples. Outra forma de determinação desses fatores é através de métodos empíricos, obtendo funções matemáticas através de resultados obtidos em ensaios. Segundo NORTON (2013) a mais conhecida coleção de fatores de concentração de tensão pode ser encontrada em Peterson e Roark e Young, onde apresentam resultados teóricos e experimentais de muitos pesquisadores na forma de gráficos úteis, fornecendo valores de K_t e K_{ts} para diversas condições. (NORTON, 2013)

A Figura 7 mostra a função de concentração de tensão para um eixo com sulco em tração axial. A redução do diâmetro D para d gera concentração de tensão, onde r (raio) também foi

considerado nesta função. A carta fornece valores de K_t relacionando curvas, determinadas pelos fatores adimensionais D/d , e os valores, também adimensionais r/d . O valor r/d é utilizado como variável independente e D/d representa, como já dito, as curvas a serem interceptadas para, então, selecionar o valor K_t . (NORTON, 2013)

Figura 7 - Fator geométrico de concentrador de tensão K_t para um eixo com sulco em tração axial



Fonte: Norton, (2013).

Alguns valores de A e b são fornecidos ao lado da carta de acordo com a relação adimensional D/d . A função abaixo é capaz de fornecer o concentrador de tensão para esta geometria:

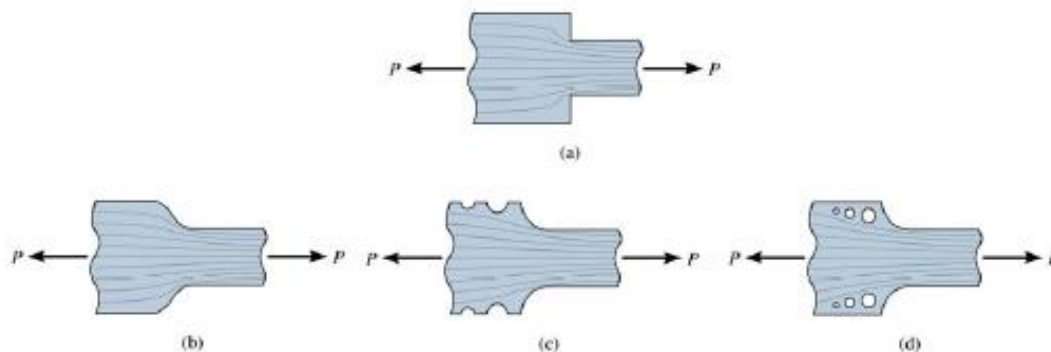
$$K_t \cong A \left(\frac{r}{d} \right)^b \quad (4)$$

3.3.4. Redução do efeito dos concentradores de tensão

A redução dos efeitos dos concentradores de tensão, além de minimizar a chance de ocorrência de falhas, impacta diretamente em fatores como: redução em geometrias gerais de projeto, aumento da vida a fadiga, aumento da confiabilidade etc., sendo todos estes fatores importantíssimos para diferenciar projetos bons e ruins.

Softwares computacionais auxiliam na compreensão dos concentradores de tensão através de uma análise das forças em tornos de pontos de concentradores de tensão de alguns componentes. Segundo Franquetto (2007) “para uma peça submetida a um dado carregamento e que se encontra em equilíbrio, pode-se dizer que os todos os esforços que são aplicados em uma região da peça são retirados, ou “saem”, por outras regiões, sendo que a peça é o meio por onde as linhas de força passam“. A Figura 8 abaixo ilustra as linhas de força citadas acima.

Figura 8 - Alívios geométricos de tensão

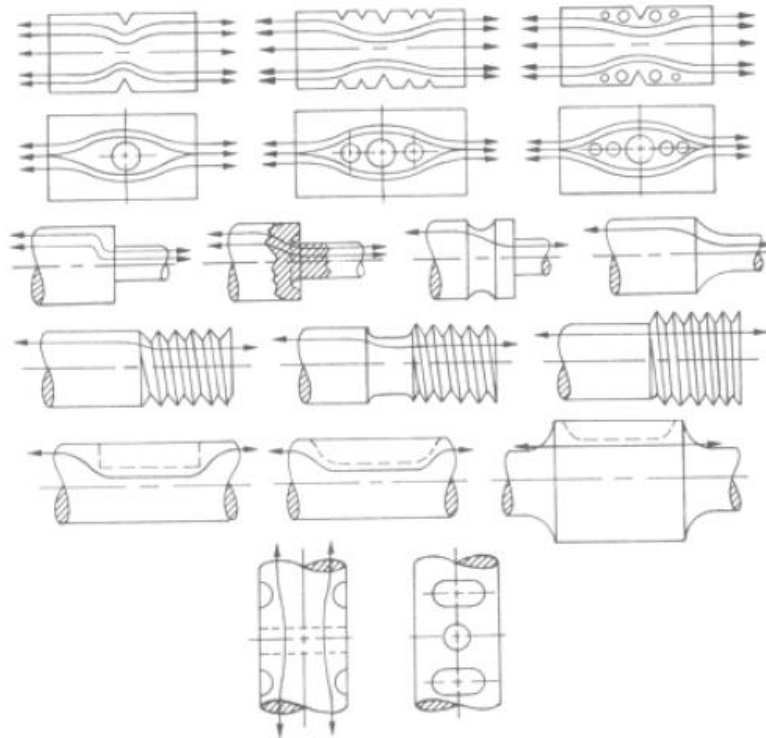


Fonte: Franquetto, (2007).

A Figura 8(a) ilustra um elemento cilíndrico sob efeito de concentrador de tensão devido a geometria, sem alívio. Já as figuras 8(a), (b) e (c) apresentam algumas formas de alívio de tensão através da variação da geometria do elemento em questão. Os pontos em que as linhas estão mais próximas apresentam maior carga de tensão.

Existem diversas formas com as quais pode-se buscar a redução do efeito dos concentradores de tensão, onde na grande maioria dos casos haverá uma solução para cada geometria. As Figuras 9 e 10 ilustram alguns elementos com mecanismos de alívio de tensão.

Figura 9 - Exemplo de formas de alívio geométrico de tensão



Fonte: Franquetto, (2007).

Figura 10 - Exemplo de alívio geométrico de tensão



Fonte: Franquetto, (2007).

3.4. Propriedade do Aço SAE 1020

Os aços SAE 1020 são considerados de baixo teor de carbono, sendo utilizados em variados elementos estruturais devido seu baixo custo por peso e facilidade de compra no mercado onde, teoricamente, as propriedades mecânicas do material não são consideradas, já que apenas a composição química do aço é assegurada pela especificação SAE. Em geral, o aço 1020 apresenta 0,20% de Carbono e 0,45% Manganês. Sua resistência mecânica pode ser melhorada através de trabalhos à frio. São formados por perlita e ferrita, apresentando boa ductilidade e tenacidade. A Tabela 1 tiveram seus valores retirados do Callister (2008) e apresenta valores sobre a composição química e características mecânicas do Aço SAE 1020.

Tabela 1 - Composição e Características Mecânicas do Aço SAE 1020

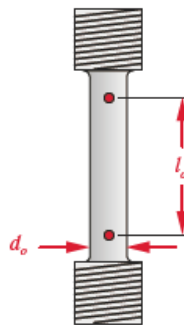
	Composição (%)		Limite de Resistência à Tração (Mpa)	Limite de Escoamento (Mpa)
ABNT/SAE/AISI	C	Mn		
1020	0,2	0,45	380	205

Fonte: Autoria própria, (2017).

3.5. Ensaio de Tração

O ensaio de tração é destrutivo, ou seja, os corpos de prova são inutilizáveis ao fim do processo, e busca fornecer informações sobre o material em estudo, aplicando esforços trativos sobre os mesmos, resguardando dados ponto a ponto, como tempo, força aplicada e alongamento. Normas regulamentadoras, caso da ASTM E 8M, existem para criar um padrão acerca dos espécimes utilizados, aumentando as chances de obtenção de resultados coerentes. A Figura 11 ilustra o corpo de prova mais utilizado nestes ensaios.

Figura 11 - Corpo de prova para Ensaio de Tração

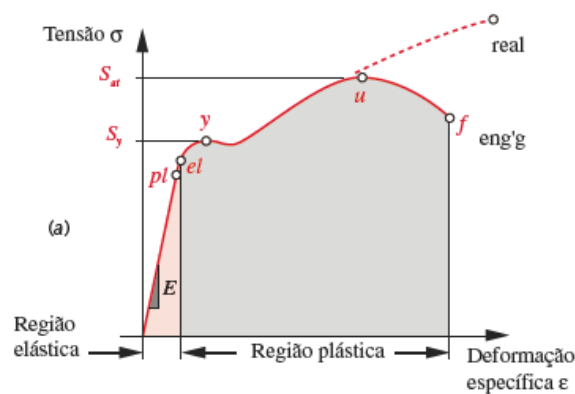


Fonte: Norton, (2013).

A norma, ASTM E 8M, escolhida para realização dos testes fornece as medidas que os corpos de prova devem apresentar, como na figura os valores de l_0 e d_0 . As geometrias de maior diâmetro não interferem no ensaio, porém o raio que a mesma faz com a zona de comprimento útil de ensaio (l_0), sim. Ambos os valores são geralmente expressos em milímetro ou polegadas.

Durante o ensaio, o corpo de prova é estendido com uma velocidade pré-estabelecida na máquina, onde segue até o rompimento do mesmo. Enquanto o processo discorre, o computador da máquina monitora uma série de pontos, contendo tempo e deformação para uma dada força. Destes valores obtidos, pode-se plotar o diagrama tensão-deformação, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Diagrama tensão-deformação do aço baixo carbono



Fonte: Norton (2013)

Inúmeros parâmetros do material nos é oferecido pela curva tensão-deformação apresentada no gráfico. O ponto *pl* na Figura 12 é o limite de proporcionalidade abaixo do qual a tensão é proporcional à deformação, mostrada de acordo com a lei de Hooke:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5)$$

Onde *E* é o módulo de elasticidade, ou módulo de Young, representando a inclinação da reta linear no diagrama. O ponto *el* da Figura 12 indica o limite elástico do material e, uma vez que superado este valor, o material irá experimentar deformação plástica, não retornando a sua dimensão original.

A tensão limite de escoamento do material (*S_y*) pode ser encontrado no ponto *y* do diagrama, onde o material começa a ceder mais facilmente a força aplicada. A maior tensão experimentada pelo material antes do rompimento está no ponto *u* e representa a tensão limite de ruptura na tração (*S_{ut}*), apresentando não-linearidade.

A parte final do diagrama, entre os pontos f e u, apresenta uma queda de tensão antes do rompimento no ponto u. Ao nos aproximarmos do ponto de empescoçamento, ou seja, redução da área da seção transversal localizada, a tendência da tensão é aumentar seu valor, porém, como dito anteriormente, a tensão utilizada no gráfico é calculada com valores iniciais de área da seção transversal do corpo de prova, não levando em consideração sua redução localizada, desta forma, apresentando valores menores que os reais. A tensão verdadeira é ilustrada no diagrama, como *real*, considerando a redução de área da seção transversal localizada.

Como tratamos de um gráfico com curva tensão-deformação e, sabendo que a máquina nos fornece apenas valores de força (N) e alongamento (mm), temos que aplicar a equação da tensão. Desta forma, segundo Norton (2013), podemos encontrar o valor da tensão σ , força por unidade de área, através da equação abaixo.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (6)$$

A equação utiliza-se da carga P registrada pela máquina de ensaio, em Newton (N), e da área inicial da seção transversal da peça no comprimento útil de ensaio l_0 . A unidade de tensão é dada em Psi ou Pa e a tensão encontrada é dita tensão de engenharia, já que não se considera a redução da seção transversal durante o ensaio.

A deformação é a razão da variação do comprimento pelo comprimento inicial e é dada pela Equação 7.

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (7)$$

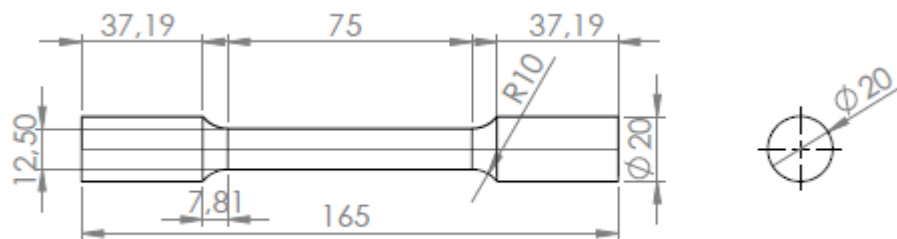
Sendo l o comprimento útil final do corpo de prova e l_0 , como já mencionado, comprimento útil inicial da peça, onde a diferença destes caracteriza o alongamento do corpo de prova, valor já fornecido pela máquina ao fim do ensaio.

4. METODOLOGIA

4.1. Corpo de prova

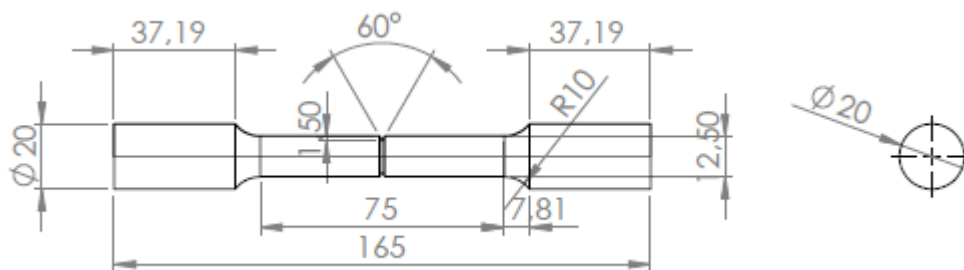
Para a realização do ensaio dos corpos de prova, buscando obter as curvas tensão de engenharia-deformação, foram confeccionados corpos de provas do aço SAE 1020 apresentando três características distintas: o primeiro corpo de prova foi utilizado sem entalhe (Fig. 13); o segundo apresenta um entalhe com raio de 1,5 mm (Fig. 14); o terceiro apresenta três entalhes, sendo um centralizado com raio de 1,5 mm e os outros dois igualmente espaçados com raio de 1,0 mm (Fig. 15).

Figura 13 - Dimensões de corpo de prova sem entalhe



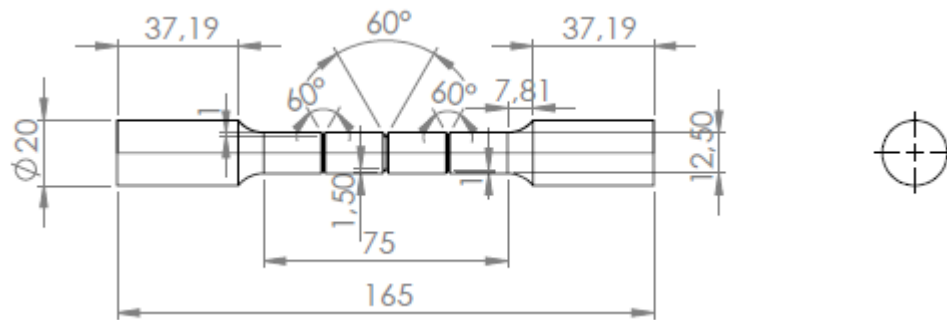
Fonte: Autoria própria, (2017).

Figura 14 - Dimensões de corpo de prova com um entalhe



Fonte: Autoria própria, (2017).

Figura 15 - Dimensões do corpo de prova com três entalhes



Fonte: Autoria própria, (2017).

4.2. Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de ensaio de tração eletromecânica EMIC DL-10000 com capacidade de 100KN e uma precisão de obtenção dos dados de 0,001 para a carga e para o deslocamento. O software TESC compatível com as máquinas microprocessadas da marca EMIC é conectado à máquina para receber os dados do ensaio e fornece o gráfico força $\times$ deslocamento ao mesmo tempo que gera os dados de tensão de escoamento, limite de resistência a tração, tensão de ruptura, deformações específicas para força máxima e ruptura. Baseado nesses dados, foram feitos os gráficos tensão de engenharia-deformação. A Figura 16 mostra a máquina utilizado no ensaio de tração.

Figura 16 - Máquina de ensaios de Tração



Fonte: Autoria própria, (2017).

4.3. Procedimentos realizados

Foram utilizados 9 (nove) corpos de prova, onde utilizou-se de três de cada geometria para plotar as curvas tensão de engenharia-deformação. Os parâmetros computados à máquina estão descritos abaixo, onde não foram embasados em norma, apenas o comprimento útil.

- Comprimento útil dos corpos de prova: 75mm;
- Taxa de deformação: 10^{-3}s^{-1} ;
- Velocidade: 0,006 mm/s;

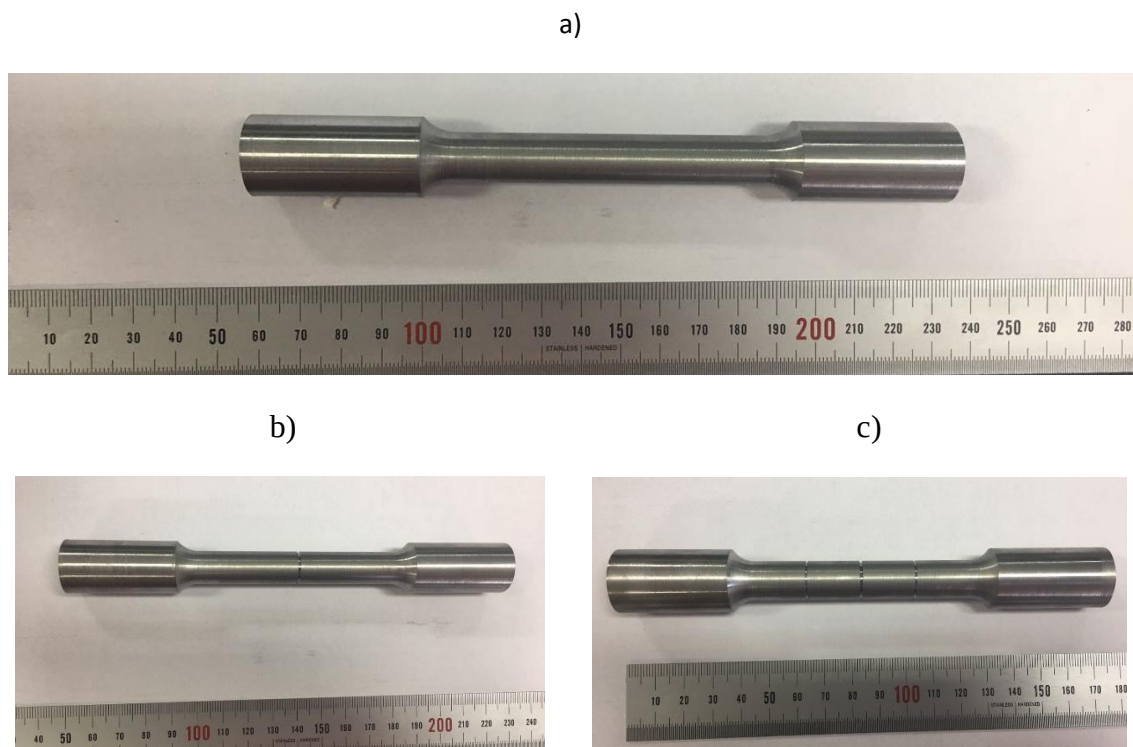
Todos os dados coletados pela máquina de tração através do software TESC foram utilizados para a plotagem do diagrama tensão-deformação através do software Excel. Nele foi possível determinar todos os pontos possíveis nas curvas, semelhante aos ilustrados na Figura 12.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Usinagem dos Corpos de prova

Os corpos de prova foram usinados através do Torno CNC da marca ROMI, com comando SIEMENS e estão evidenciados na Figura 17a, b e c, onde as geometrias desses corpos de prova foram explicitadas nas Figuras 13, 14 e 15. A Figura 17a é o corpo de prova sem entalhe, já a Figura 17b é com entalhe de 1,5mm e a última, 17c, é o corpo de prova com alívio geométrico de tensão.

Figura 17 - Corpos de prova usinados

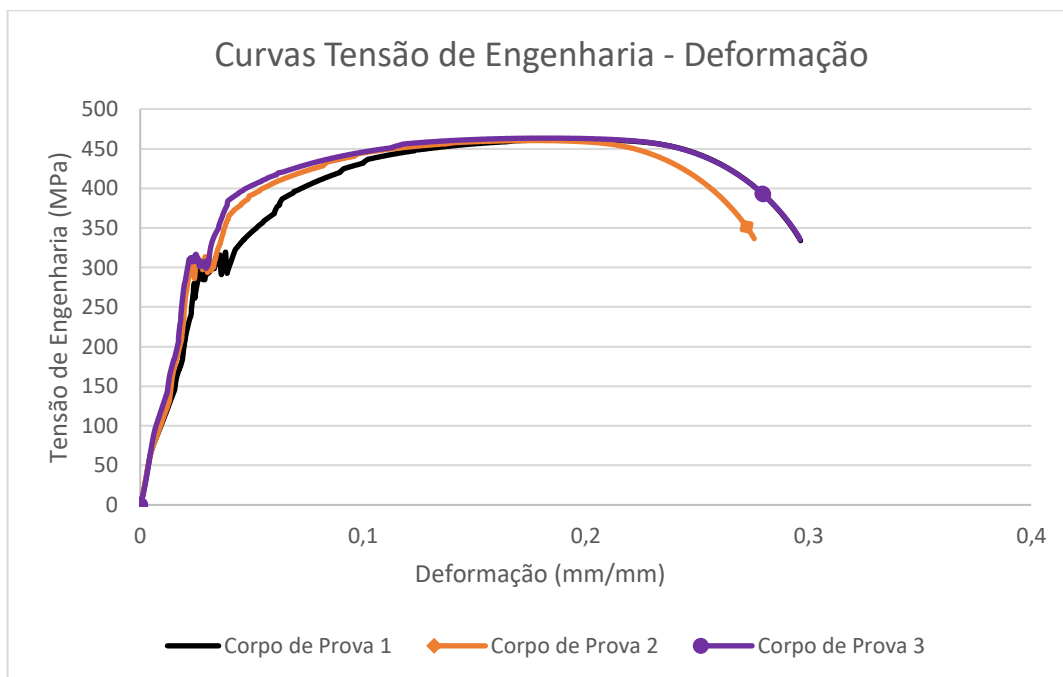


Fonte: Autoria própria, (2017).

5.2. Corpo de prova Sem Entalhe

Com a utilização dos dados recolhidos durante o ensaio destrutivo de tração, foi possível plotar o diagrama dos corpos de prova sem entalhe através do Excel e, a partir dele, retirar valores importantes do ensaio. Na Figura 18 estão representas as curvas geradas a partir dos valores encontrados durante o ensaio de tração, para os três corpos de prova sem entalhe (A Figura 13 evidencia as dimensões gerais dos corpos de prova).

Figura 18 - Curvas tensão de engenharia-deformação com CP sem entalhe



Fonte: Autoria própria, (2017).

Através das curvas na Figura 18, pode-se entender que os resultados obtidos dos corpos de prova sem entalhe apresentaram pouca variação, o que está melhor evidenciado na Tabela 2. Isto indica uma amostragem com características semelhantes, já que sofreram os mesmos processos de usinagem e ensaio de tração, e ainda assim alcançaram resultados semelhantes.

A Tabela 2 mostra alguns dos valores retirados da curva tensão de engenharia-deformação gerada através do ensaio de tração para os corpos de prova sem entalhe.

Tabela 2 - Valores do diagrama tensão de engenharia-deformação para CP sem entalhe

	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2	Corpo de prova 3	Desvio Padrão
Limite de Resistência à Tração (MPa)	461,64	460,46	463,53	1,55
Tensão de Engenharia de Ruptura (MPa)	333,88	336,50	335,32	1,31
Força Máxima de Tração (kN)	56,71	56,51	56,90	0,20
Limite de Escoamento (MPa)	302,63	300,26	301,20	1,19
Alongamento (mm)	22,23	20,67	22,21	0,89
Deformação máxima de Ruptura	0,30	0,28	0,30	0,01

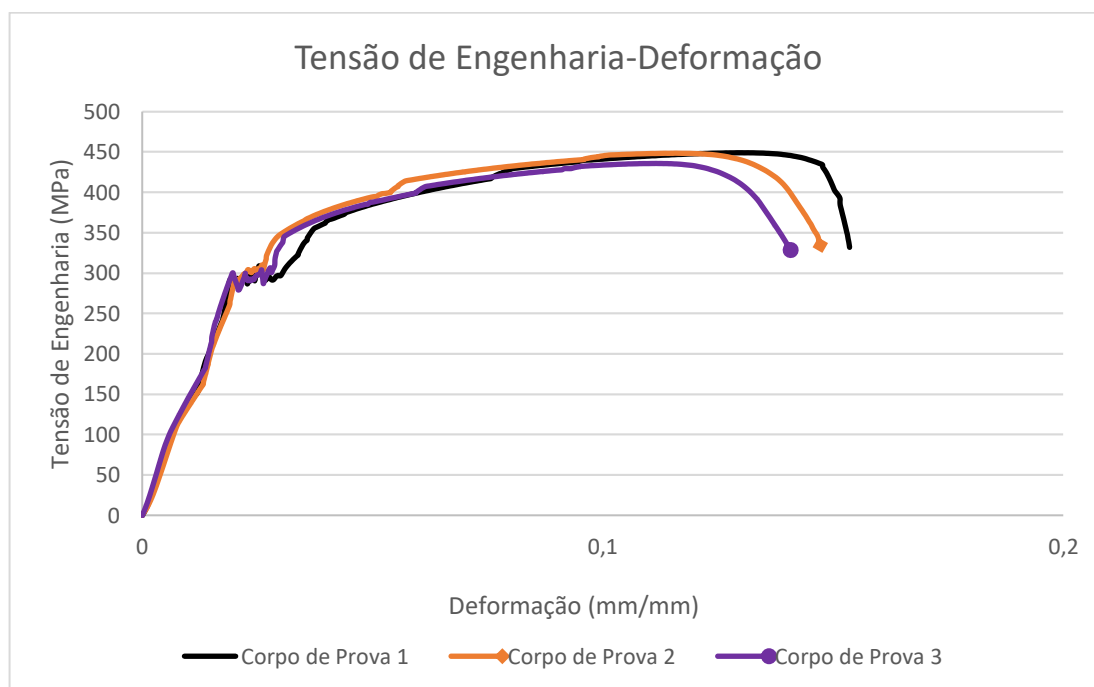
Fonte: Autoria própria, (2017).

Foram inseridas as três curvas, uma de cada corpo de prova sem entalhes, em apenas um gráfico, com o intuito de facilitar a visualização do comportamento dos mesmos durante o ensaio de tração, tornando a comparação entre os mesmos mais simples, e, posteriormente, inserindo-os na Tabela 2. Podemos perceber a pouca variação nos resultados encontrados, em especial as forças trativas máximas, limites de escoamento e limites de resistência à tração.

5.3. Corpo de prova com um entalhe de raio 1,5 mm

Na Figura 19 está o gráfico tensão de engenharia-deformação dos corpos de prova com entalhe de raio 1,5 mm (Ver Figura 14 com as dimensões gerais dos corpos de prova), gerado através do software Excel, onde foi possível inserir as três curvas, uma de cada corpo de prova, com o intuito de facilitar a compreensão e eventuais comparativos.

Figura 19 - Curvas tensão de engenharia-deformação para os CP com entalhe de raio 1,5 mm



Fonte: Autoria própria, (2017).

Os corpos de prova com entalhe de raio 1,5 mm também apresentaram pouca variação em seus resultados, principalmente a tensão de escoamento, tensão de resistência à tração e tensão de ruptura. Isto já era esperado, obviamente, já que os corpos de prova possuíam os mesmos

entalhes e provieram do mesmo lote. Na Tabela 3 é possível identificar claramente essa variação.

Através dos resultados fornecidos pelo software TESC da máquina de ensaio de tração foi possível gerar o gráfico da Figura 19. Este, por sua vez, forneceu uma gama de valores listados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores do diagrama tensão de engenharia-deformação para CP com entalhe de raio 1,5 mm

	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2	Corpo de prova 3	Desvio Padrão
Limite de Resistência à Tração (MPa)	449,02	448,50	435,80	7,49
Tensão de Engenharia de Ruptura (MPa)	331,86	334,61	328,52	3,05
Força Máxima de Tração (kN)	55,10	55,00	53,50	0,90
Limite de Escoamento (MPa)	298,43	301,66	300,32	1,62
Alongamento (mm)	11,52	11,04	10,53	0,50
Deformação máxima de Ruptura	0,15	0,15	0,14	0,01

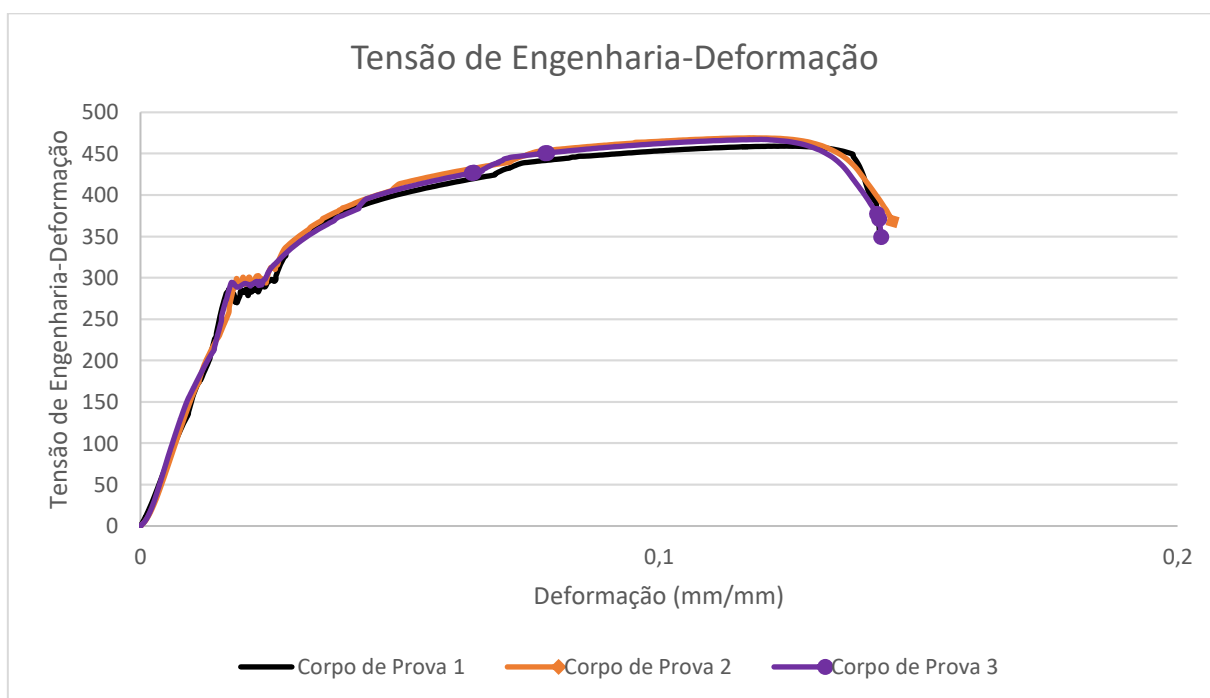
Fonte: Autoria própria, (2017).

Todos os valores inseridos na Tabela 3 foram retidos a partir das curvas tensão de engenharia-deformação de cada corpo de prova. As deformações máximas até a ruptura completa do material seguiram para todos os espécimes sem grandes variações. Os alongamentos dos corpos de prova também não apresentaram valores incoerentes em nenhum dos casos. Os valores das tensões de rupturas encontradas, assim como os limites de resistência à tração e limites de escoamento apresentaram valores próximos. Como estamos tratando aqui de alívio geométrico de tensão, onde pode ser caracterizado por análise das curvas e tabelas, não será fornecido os valores dos coeficientes K_t .

5.4. Corpos de prova com entalhe central de raio 1,5 mm e alívios geométricos de tensão de raio 1,0 mm

Da mesma forma que os anteriores, foi gerado um gráfico, através do Excel, englobando todas as curvas tensão de engenharia-deformação dos corpos de prova com raio de 1,5 mm e alívio geométrico de tensão (Ver Figura 15 com as geometrias gerais dos corpos de prova) através dos dados obtidos pela máquina de ensaio de tração. A Figura 20 contém as curvas com dos três corpos de prova.

Figura 20 - Curvas tensão de engenharia-deformação para os CP com alívio geométrico de tensão



Fonte: Autoria própria, (2017).

Todos os corpos de prova com alívio geométrico de tensão apresentaram valores muito próximos, sem exceção, o que nos remete a uma amostragem utilizada com características semelhantes, o que já era esperado. É possível visualizar essas diferenças através da Tabela 4, evidenciadas pelo desvio padrão.

Através da Figura 20, gerado pelo do software TESC da máquina de tração, foi possível encontrar valores importantes relativos aos corpos de prova com três entalhes. Tais valores estão contidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores do diagrama tensão de engenharia-deformação para CP com alívio geométrico de tensão

	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2	Corpo de prova 3	Desvio Padrão
Limite de Resistência à Tração (MPa)	459,01	469,15	467,26	5,39
Tensão de Engenharia de Ruptura (MPa)	356,67	368,43	349,25	9,67
Força Máxima de Tração (kN)	56,33	57,60	57,34	0,67
Limite de Escoamento (MPa)	299,92	300,71	298,51	1,11
Alongamento (mm)	10,69	10,88	10,71	0,10
Deformação máxima de Ruptura	0,14	0,15	0,14	0,01

Fonte: Autoria própria, (2017).

Os valores da Tabela 4, provindos do diagrama tensão de engenharia-deformação, mostram que os valores não distorceram de forma muito acentuada entre os corpos de prova, em especial os limites de resistência à tração, assim como as tensões de engenharia de ruptura, limites de escoamento e as forças máximas de tração, além das deformações máximas até o rompimento e alongamentos máximo.

5.5. Comparativo entre os corpos de prova com e sem entalhes

Com base nos resultados encontrados para os corpos de prova sem entalhe, com entalhe e com alívio geométrico de tensão inseridos nas tabelas 2,3 e 4, respectivamente, foi gerada a Tabela 5, que tem por finalidade apresentar valores médios pertinentes a cada caso para efeito comparativo.

Tabela 5 - Comparativo entre os corpos de prova

	Resultados para os corpos de prova sem entalhe	Resultado para os corpos de prova com entalhe de 1,5 mm	Resultado para os corpos de prova com alívio geométrico de tensão	Desvio Padrão
Limite de Resistência à Tração (MPa)	461,88	444,44	465,14	11,13
Tensão de Engenharia de Ruptura (MPa)	335,23	331,66	358,12	14,36
Força Máxima de Tração (kN)	56,71	54,53	57,09	1,38
Limite de Escoamento (MPa)	301,36	300,14	299,71	0,86
Alongamento (mm)	21,70	11,03	10,76	6,24
Deformação máxima de Ruptura	0,29	0,15	0,14	0,09

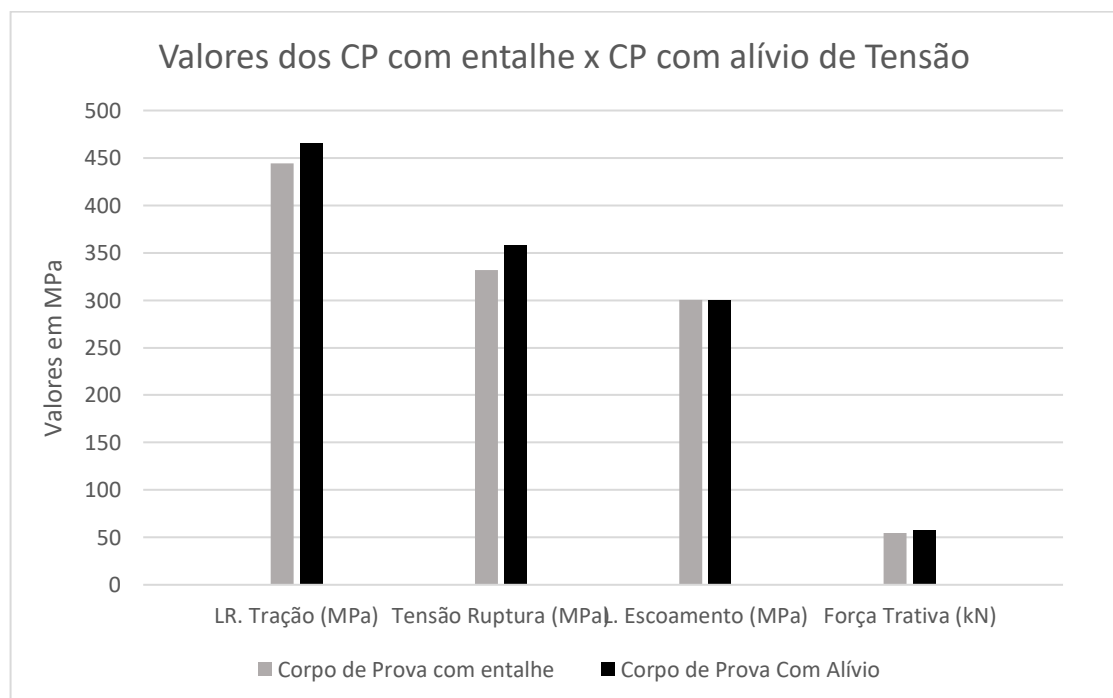
Fonte: Autoria própria, (2017).

Através da Tabela 5 podemos visualizar claramente todos os valores retirados das curvas tensão de engenharia-deformação, plotadas através dos dados obtidos pelo ensaio de tração. Os corpos de prova com alívio geométrico de tensão apresentaram limite de resistência à tração (LRT) de 465,14 MPa, apresentando valor 0,7% superior em relação aos corpos de prova sem entalhe e 4,45% em relação aos corpos de prova com entalhe sem alívio. A tensão de engenharia de ruptura dos corpos de prova com alívio de tensão foi de 358,12 MPa, 6,39% maior em relação aos corpos de prova sem entalhe e 7,39% em relação aos corpos de prova com entalhe sem alívio. Os corpos de prova sem entalhe apresentaram maior deformação máxima de ruptura, 0,29, em torno de 48,28% e 51,72% se comparado aos corpos de prova com entalhes e com alívio geométrico de tensão, respectivamente. O alongamento seguiu-se no mesmo sentido da

deformação máxima, sendo para os corpos de prova sem entalhe de 21,70 mm, superando os corpos de prova com entalhe e os com alívio geométrico tensão em 49,17% e 50,41%, respectivamente. O limite de escoamento apresentou a maior constância, sendo maior para os corpos de prova sem entalhe, no valor de 301,36 MPa, representado superioridade de 0,40% sobre os com entalhe e 0,54% sobre os corpos de prova com alívio geométrico. Nos corpos de prova com alívio de tensão foi onde apresentou-se maiores forças trativas durante o ensaio, sendo esta de 57,09 kN, superando em 0,67% os corpos de prova sem entalhe e em 4,48% os corpos de prova com entalhe, sem alívio geométrico de tensão.

A Figura 20 tem por objetivo evidenciar de forma mais clara as diferenças entre os valores encontrados dos corpos de prova com entalhe de 1,5 mm sem alívio e os corpos de prova com alívio geométrico de tensão. Para a correta compreensão da Figura 20, deve-se ter ciência que os valores exibidos são comparativos dos corpos de prova com alívio de tensão em relação aos corpos de prova entalhados sem alívio de tensão.

Figura 21 - Comparativo entres os corpos de prova com entalhe de 1,5 mm e os corpos de prova com alívio geométrico de tensão



Fonte: Autoria própria, (2017).

Através da Figura 21 é possível ter uma visão mais clara dos valores obtidos para os corpos de prova com entalhe e com alívio geométrico de tensão, esta comparação é bastante relevante para os cumprimentos dos objetivos deste trabalho. O limite de resistência à tração, assim como a tensão máxima de ruptura encontrada para os corpos de prova com alívio geométrico de tensão apresentaram valores superiores em 4,45% e 7,39%, respectivamente, em relação aos corpos de prova com entalhe, sem alívio geométrico de tensão. O limite de escoamento apresentou uma variação de 0,14%, impossibilitando qualquer afirmação a respeito deste quesito. A força de tração nos corpos de prova com alívio geométrico de tensão foi superior em 4,48% em relação aos corpos de prova com entalhe, sem alívio de tensão. Os valores apresentados já eram esperados devido a adição dos alívios de tensão, onde pressupõe uma suavização das linhas de tensão no material.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente projeto utilizou-se de corpos de provas, com geometrias garantidas por meio da norma ASTM E 8M, com o intuito de submetê-los a ensaio destrutivo de tração. Foram utilizados os resultados de nove corpos de provas, desta forma, três corpos de prova para cada geometria específica. Os corpos de possuem entalhe semelhante ao de um acoplamento de anel de vedação. Como anteriormente dito, foram utilizadas três geometrias de corpos de prova: sem entalhe; com um entalhe centralizado de raio 1,5 mm; e entalhe centralizado de raio 1,5 mm, além de dois igualmente espaçados em relação ao centralizado, de raio 1 mm, para alívio geométrico de tensão. O material escolhido para análise foi o SAE 1020, por sua vasta utilização em equipamentos e facilidade de obtenção no mercado.

Por meio de análise das curvas geradas nos gráficos tensão de engenharia-deformação para cada uma das geometrias dos corpos de prova previamente estabelecidas neste projeto, pode-se constatar que as adições dos dois entalhes, de raio 1,0 mm, nos corpos de prova com alívio geométrico de tensão, reduziram os efeitos dos concentradores de tensão. Isto é resultado do afastamento das linhas de tensão do rasgo de maior raio (1,5 mm), devido aos aliviadores de 1,0 mm de raio. Este resultado já esperado, pois como disse Franquetto (2007) retirando-se material do componente pode-se reduzir os efeitos dos concentradores de tensão, neste caso, foram colocados elementos geométricos de alívio no entorno do concentrador de forma a suavizar o fluxo de linhas de força através da peça. Esta afirmação também se baseia na Figura 21, que faz um comparativo quantitativo entre os corpos de prova com alívio geométrico de tensão e corpos de prova entalhados sem alívio. Pode-se perceber o acréscimo de 4,45% no limite de resistência à tração, além do acréscimo de 7,39% na tensão de engenharia de ruptura e conseguiu experimentar uma força de tração máxima 4,48% superior aos corpos de prova sem aliviadores de tensão. Esses valores foram tirados das médias dos corpos de prova dos dois grupos em questão, com alívio geométrico de tensão e com entalhe. Os valores médios do alongamento e deformação máxima de ruptura dos corpos de prova com alívio de tensão mostraram uma redução de 4,12% e 4,76%, respectivamente, em relação aos corpos de provas entalhados sem alívio geométrico de tensão. Este efeito pode ser explicado devido ao maior número de entalhes presentes nos corpos de prova com alívio: alguns materiais com entalhes, no momento da falha, tendem apresentar características frágeis, embora sejam dúcteis, e, por isso, apresentam menores taxas de alongamento e deformação máxima de ruptura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NORTON, Robert L. **Projeto de Máquinas**. Porto Alegre: Bookman, 2013

BUDYNAS, Richard G.; NISBETT, J. Keith. **Elementos de Máquinas de Shigley**. Porto Alegre: Bookman, 2011

CALLISTER, Jr., William D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**, 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

FRANQUETTO, Paulo Rogério. **Otimização Paramétrica de Concentradores de Tensões Clássicos**. 2007. 183 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

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

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