

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROJETO E PROCESSOS DE
FABRICAÇÃO MESTRADO PROFISSIONAL

William Haubert Fripp

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA
DE UNIÕES PARAFUSADAS DE AÇOS ARBL FURADAS POR
ESCOAMENTO

Passo Fundo

2017

William Haubert Fripp

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA
DE UNIÕES PARAFUSADAS DE AÇOS ARBL FURADAS POR
ESCOAMENTO**

Orientador: Prof. Dr. Charles Leonardo Israel

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Passo Fundo
2017

William Haubert Fripp

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E NUMÉRICA
DE UNIÕES PARAFUSADAS DE AÇOS ARBL FURADAS POR
ESCOAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Projeto e Processos de Fabricação da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Projeto e Processos de Fabricação.

Data de aprovação: 03/04/2017

Os componentes da Banca examinadora abaixo aprovam a Dissertação:

Professor Doutor Charles Leonardo Israel
Orientador

Professor Doutor Luiz Airton Consalter
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Márcio Walber
Universidade de Passo Fundo

Professor Doutor Paulo Henrique Sanchez Cardoso
Universidade Federal do Rio Grande

Passo Fundo

2017

Dedico este trabalho a minha família pela oportunidade de viver e conviver; aos mestres, por me motivarem ao estudo; aos alunos, que no decorrer de sua jornada necessitarem apropriar-se deste conhecimento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar este presente que é a vida, por colocar cada coisa em seu lugar me dando condições de chegar aonde cheguei.

À família, por representar aquilo que realmente interessa em nossas vidas, servindo de pilar que sustenta nossa caminhada. Por estar presente das mais diversas formas, na criação, na formação, na educação, em todos os passos de minha vida, me guiando pelo caminho certo a ser seguido.

À Universidade de Passo Fundo, que por meio do Programa de Pós-Graduação em Projeto e Processos de Fabricação me agraciou com bolsa de 50%. Também agradeço ao CMPP, que esteve sempre à disposição para contribuir com o trabalho.

Ao professor orientador Dr. Charles Leonardo Israel, pela amizade e paciência, por transmitir seus conhecimentos em suas orientações, discutindo ideias e soluções e dando suporte para a execução do estudo.

A todos que contribuíram das mais diversas formas para que esse estudo fosse executado com êxito.

Muito Obrigado!

RESUMO

No trabalho realizado, buscou-se, através de um estudo teórico experimental, avaliar um modelo de análise estrutural utilizando o método de elementos finitos, em uma união parafusada constituída de tubos de aços de alta resistência e baixa liga USI-LN 700, furadas por escoamento, e identificar possíveis influências na ZTA, causadas pelo processo de furação por escoamento, nos resultados de tensões e resistência à fadiga. O estudo baseou-se em mapear as características do material fornecido, para verificar se o aporte térmico causado na furação por escoamento tem influência nas propriedades do material. Foram predefinidos os parâmetros de usinagem e, então, produzidos os corpos, os quais foram submetidos a ensaios de tração (arranque do parafuso) e de fadiga. Com isso, partiu-se para a descrição do modelo proposto no estudo, com o auxílio de *software*, e, posteriormente, os resultados dos testes práticos foram comparados com os das análises a fim de avaliar o modelo proposto pelo estudo. Foi possível identificar, através da metalografia, uma alteração na microestrutura do material, que resultou em uma redução da resistência mecânica, como mostrou o perfil de microdureza. O estudo não apresentou resultados que comprovassem a eficiência do modelo proposto quando se trata da tração no parafuso, nem se há influência do processo nos resultados. Já na fadiga pôde-se observar que os resultados foram mais conclusivos, uma vez que o modelo de análise apresentou uma resistência de 11000 ciclos comparados aos 12500 ciclos resultantes dos ensaios, não apresentando claras influências do processo para o modelo proposto.

Palavras-chave: Fadiga em uniões parafusadas. Método de elementos finitos. MEF. Aços de alta resistência e baixa liga. ARBL. Furação por escoamento.

ABSTRACT

In the work carried out, a theoretical study was carried out to validate a structural analysis model using the finite element method, in a screwed union made of tubes of high resistance and low alloy USI-LN 700 steels, and to identify possible influences in the HAZ caused by the flow drilling process, in the results of tensions and life in fatigue. The study was based on mapping the characteristics of the material supplied, to verify if the thermal input caused by the flow drilling influences the properties of the material. The machining parameters were pre-defined and then the bodies were subjected to tensile (screw start) and fatigue tests. This led to the description of the model proposed in the study with the aid of the ANSYS Software, and later the results of the practical tests were compared with those of the analyzes in order to validate the model proposed by the study. It was possible to identify through the metallography a change in the microstructure of the material, which resulted in a reduction of the mechanical strength as shown by the profile of microhardness traced. It was not possible to conclude if the proposed model is efficient when we talk about the traction on the screw or if there is influence of the process in the results. In the fatigue, the results were more conclusive, where the model withstand 11000 cycles compared to the 12500 cycles resulting from the tests, not presenting clear process influences for the proposed model.

Keywords: Fatigue in Screw Connections. Finite Element Method. FEM. High Strength Low Alloy Steels. HSLA Friction Drilling

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Distribuição das forças internas (tensão)	20
Figura 2 – Componentes de tensão na superfície normal à direção x	20
Figura 3 – Componentes tridimensionais de tensão	21
Figura 4 – Gráfico da curva S-N traçado a partir dos resultados de testes de fadiga	29
Figura 5 – Curva S – N de Wöhler para um aço obtida através de ensaios de fadiga	30
Figura 6 – Ciclos de histerese da tensão – deformação	31
Figura 7 – Gráfico da curva ϵ – N traçado a partir dos resultados de testes de fadiga	32
Figura 8 – Evolução histórica de novos processos de laminação, mecanismos	33
Figura 9 – Evolução verificada na redução no tamanho de grão através dos processos de laminação: a) Aço ao carbono convencional resfriado a ar; b) Aço microligado processado por laminação controlada; c) Aço com grão ultra fino	34
Figura 10 – Curva de fadiga para aço Domex 700	35
Figura 11 – Sequência da formação de uma bucha por furação por escoamento	36
Figura 12 – Gráfico dos esforços envolvidos na furação por escoamento e suas fases	37
Figura 13 – Fluxograma do método de estudo	39
Figura 14 – Corpo de prova para ensaio de tração	40
Figura 15 – Curva de vida em fadiga aço USI-LN700	41
Figura 16 – Corpo de prova	42
Figura 17 – Ferramenta de furação	43
Figura 18 – Dispositivo de fixação do corpo de prova	45
Figura 19 – Geometria gerada a partir dos corpos de prova	48
Figura 20 – Geometria de análise	49
Figura 21 – Malha de elementos finitos	50
Figura 22 – Regiões de refino da malha	51
Figura 23 – Carregamento de tração aplicado no modelo	52
Figura 24 – Carregamento de fadiga aplicado no modelo	52
Figura 25 – Restrição aplicada nos modelos de tração e fadiga	53
Figura 26 – Contato aplicado nos modelos de tração e fadiga	54
Figura 27 – Macrografia da união peça-parafuso	55
Figura 28 – Caracterização das regiões afetadas pelo calor, secção transversal	56
Figura 29 – Regiões microestruturais do material da peça	57
Figura 30 – Micrografia no MEV da região com crescimento de grão RC	59
Figura 31 – Micrografia no MEV da região com refino de grão RR	59
Figura 32 – Micrografia no MEV do material base RB. (Autor)	60
Figura 33 – Perfil de microdureza partindo da extremidade do furo até material base	61
Figura 34 – Corpo de prova após fratura por tração	63
Figura 35 – Corpo de prova após fratura por fadiga	64
Figura 36 – Distribuições das tensões de Von Mises no tubo	65
Figura 37 – Regiões com tensão acima de 700MPa	66
Figura 38 – Distribuição das tensões de Von Mises com carga de 10kN	67
Figura 39 – Distribuição da tensão máxima principal	68
Figura 40 – Distribuição da vida em fadiga do modelo	68
Figura 41 – Regiões com números de ciclos menores que o experimental	69
Figura 42 – Distribuição de tensões com carregamentos de 19,2kN e 32 kN	70
Figura 43 – Malha de elementos finitos para a geometria original	75
Figura 44 – Contatos aplicados entre peça-parafuso	76
Figura 45 – Distribuições das tensões de Von Mises no tubo com geometria original	76

Figura 46 – Regiões com tensão acima de 700MPa	77
Figura 47 – Distribuição da vida em fadiga do modelo original	78
Figura 48 – Regiões com números de ciclos menores que o experimental	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço DOMEX 700 (SSAB TUNNPLANT, 2003).....	35
Tabela 2 – Composição química do aço DOMEX 700 (SSAB TUNNPLANT, 2003).....	35
Tabela 4 – Composição química do aço USI-LN700 % em peso	40
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço USI - LN700	41
Tabela 5 – Parâmetros definidos para o processo de furação (PASINATO, 2015)	43
Tabela 6 – Descrição dos elementos utilizados na análise	51
Tabela 7 – Valores das microdurezas e suas regiões	61
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de tração	62
Tabela 9 – Resultados dos ensaios de fadiga	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
CAD	Computer Aided Design
$F_{f\text{máx.}}$	Força de Avanço Máximo
HSLA	High Strength Low Alloy
$M_{t\text{máx.}}$	Momento Torçor Máximo
S	Tensão
MEF	Método dos Elementos Finitos
S_f	Tensão Limite de Resistência a Fadiga
S_y	Tensão de Escoamento
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CP	Corpo de Prova
ZTA	Zona Termicamente Afetada
HAZ	Heat affected zone
RA	Região com crescimento de grão
RB	Região com refino de grão
RC	Região com microestrutura do metal base

LISTA DE SÍMBOLOS

Al	Alumínio
C	Carbono
D	Diâmetro
f	Avanço
Mn	Manganês
Nb	Nióbio
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio
V	Vanádio
η	Rendimento
σ	Tensão normal
τ	Tensão cisalhante
ω	Velocidade angular
E	Módulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson
G	Módulo de elasticidade transversal

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DOS SÓLIDOS	19
2.2 CRITÉRIOS DE FALHA	22
2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOSDEFINIÇÃO	24
2.3.1 Análise dinâmica ou estática	25
2.3.2 Análise não linear ou linear	25
2.3.3 Tipo de estrutura	25
2.3.4 Fundamentos básicos do MEF	26
2.4 FADIGA DOS MATERIAIS	27
2.4.1 Método da vida sob tensão	28
2.4.2 Método da vida sob deformação	30
2.5 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)	32
2.6 PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO	36
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 DEFINIÇÃO DO MATERIAL	39
3.1.1 Determinação da composição química	40
3.1.2 Determinação das propriedades mecânicas	40
3.1.3 Curva S-N do material	41
3.2 DETERMINAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	42
3.2.1 Definição da ferramenta e dos parâmetros de furação	42
3.2.2 Definição da ferramenta e dos parâmetros de rosqueamento	44
3.2.3 Máquinas utilizadas no processo de fabricação dos corpos de prova	44
3.3 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA	45
3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO	46
3.5 ENSAIO DE FADIGA	46
3.6 METALOGRAFIA	47
3.7 ENSAIO DE MICRODUREZA	47
3.8 DEFINIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE NUMÉRICA	47
3.8.1 Modelagem da geometria	48
3.8.2 Definição do tipo de elemento	49
3.8.3 Definição do tipo da análise e malha	50
3.8.4 Carregamentos e restrições	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 ANÁLISE MACROESTRUTURAL	55
4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL	56
4.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA	60
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO	62
4.5 ENSAIO DE FADIGA	63
4.6 ANÁLISE NUMÉRICA	64
4.7 ANÁLISE DE FADIGA	67

5 CONCLUSÕES	71
APÊNDICE A – Análise numérica com geometria original do CP	75
APÊNDICE B – Gráficos dos ensaios de tração (arranque do parafuso)	80

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da tecnologia, a indústria mecânica busca suprir as necessidades de diversas maneiras, a fim de desenvolver produtos mais competitivos e atraentes. Na fase de projeto, engenheiros e projetistas têm à disposição métodos numéricos de cálculos que, muitas vezes, por intermédio de *softwares*, possibilitam obter uma previsão de possíveis locais da estrutura que possam apresentar falhas, seja por um subdimensionamento ou uma falha por fadiga.

A grande vantagem desse método é a rapidez e precisão dos resultados, porém é importante frisar que esses *softwares* simplesmente interpretam condições a ele informadas, e qualquer decisão precipitada e errônea inviabiliza a utilização do método.

As ligações parafusadas têm suas vantagens em relação a uniões soldadas, rapidez e agilidade na montagem, além de permitirem que o procedimento se repita por várias vezes, sem interferir na integridade da estrutura.

Por sua vez, o processo de furação por escoamento já é bem conhecido da indústria, mostrando-se como alternativa eficiente na substituição dos processos convencionais. Esses benefícios ficam mais evidenciados quando existe a necessidade de produzir estruturas com uniões removíveis.

Na furação por escoamento uma ferramenta de geometria definida entra em contato com a peça a ser usinada em alta rotação. O atrito entre ferramenta-peça gera uma grande quantidade de calor, facilitando a conformação do material, formando, assim, uma bucha, que depois de rosca serve como ponto de fixação de parafuso.

O excesso de calor gerado durante o processo altera sua microestrutura principalmente no caso dos aços ARBL. Sabe-se que as propriedades mecânicas, químicas e físicas dos materiais, em especial os aços, dependem de sua composição química e sua microestrutura. Sendo assim, a otimização da microestrutura tem um papel importante na melhoria das propriedades mecânicas, influenciando também em uma menor probabilidade de falha (SAKATA, 2003).

A utilização deste processo elimina uniões convencionais, como a que utiliza porca soldada, reduzindo o custo de produção. Existem, no entanto, limitações na utilização de uniões com buchas escoadas referentes a espessuras e solicitações de trabalho, de modo que vários estudos estão sendo desenvolvidos a fim de validar ou não sua utilização.

Em meados do século XIX, a constante evolução da indústria devido à revolução industrial, agregada ao crescimento da implantação de várias ferrovias na Europa, acelerou

consideravelmente a utilização do aço, atingindo uma produção nunca vista. Nos dias de hoje é evidente que o aço se faz presente direta ou indiretamente em quase tudo o que nos rodeia, tornando-se um dos materiais mais utilizados na era moderna.

Inicialmente os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL, ou HSLA do inglês High Strength Low Alloy) foram desenvolvidos para substituir os aços comuns na indústria automobilística e hoje os ARBLs são indispensáveis em vários setores de aplicação, como o naval, petrolífero, de linhas de transporte de gás, vasos de pressão, entre outros. São materiais com propriedades bem características e, de modo geral, esses aços especiais recebem microadições de Nb, Ti e V associados a tratamentos termomecânicos, o que os tornam mais resistentes, tenazes e dúcteis que aços comuns, além de possuírem melhor conformabilidade e soldabilidade (NATHAN, 2015).

Neste trabalho, propõe-se avaliar, de forma comparativa, os resultados encontrados em análises utilizando métodos numéricos (MEF) com os encontrados em testes experimentais, em uniões parafusadas de LN 700. Com a comparação, pretende-se determinar quais influências as alterações causadas no material pela furação por escoamento têm nos valores de tensão e resistência à fadiga obtidos no modelo proposto na análise.

1.1 JUSTIFICATIVA

A utilização do MEF é uma tendência das empresas quando se fala em analisar o comportamento de uma estrutura, pois a grande parte dos problemas encontrados não podem ser resolvidos de forma analítica. Dessa forma, é vital para o sucesso de uma análise que a discretização do modelo represente a realidade do componente a ser estudado.

No cenário da indústria metal mecânica, é muito grande a presença de uniões parafusadas em projeto que necessitam unir duas ou mais peças. Diante disso, busca-se, nesta pesquisa, avaliar um modelo de análise de uma união parafusada em ARBL através de ensaios mecânicos realizados em condições controladas.

Enfatizando a importância em produzir componentes cada vez mais otimizados e confiáveis, justifica-se este estudo pela forte tendência na utilização do método de elementos finitos para análise de estruturas, considerando ainda a influência nas propriedades do material devido à utilização do processo de furação por escoamento e, conseqüentemente, sua alteração nos resultados dos valores de resistência à tração e resistência à fadiga, objetos da análise.

1.2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos do presente trabalho, sendo que para a compreensão do objetivo geral apresentado, foram determinados objetivos mais específicos da proposta de estudo.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar numérica e experimentalmente uma junta parafusada constituída de tubo de aço USI-LN 700 furada através do processo de furação por escoamento, a fim de verificar o comportamento da união.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa consistem em:

- Caracterizar a união a ser estudada;
- Reproduzir ensaios de tração e fadiga através de corpos de prova em condições controladas;
- Propor um modelo de análise numérica da junta avaliando o comportamento das tensões e resistência à fadiga;
- Confrontar os resultados obtidos a fim de avaliar o comportamento do modelo proposto;
- Avaliar a influência da furação por escoamento nos resultados da análise numérica.

1.3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A seguir apresenta-se a metodologia empregada no estudo avaliativo da união parafusada, buscando atender os objetivos propostos inicialmente. A estrutura está distribuída nas seguintes etapas:

Etapa 1 – Nesta etapa serão realizados estudos exploratórios de bibliografias referentes aos assuntos abordados na proposta do trabalho, buscando aprofundar-se nos conceitos das principais áreas, como furação por escoamento, método dos elementos finitos, aços de alta resistência e baixa liga e materiais de construção mecânica.

Etapa 2 – Nesta etapa o material utilizado no estudo é caracterizado através de ensaios mecânicos e químicos para determinar sua conformidade como as normas do fabricante.

Etapa 3 – Nesta etapa são fabricados os copos de prova que serão utilizados nos ensaios experimentais da união, são determinadas as condições de conformação do furo e usinagem da rosca.

Etapa 4 – Nesta etapa são feitos os ensaios de tração e fadiga da união e, no ensaio de tração do parafuso, serão obtidos os valores de carga de escoamento da união e carga de ruptura dos filetes de rosca. Já para o ensaio de fadiga serão obtidos valores do número de ciclos até a falha.

Etapa 5 – Nesta etapa será realizada uma análise numérica linear utilizando o método dos elementos finitos, considerando algumas simplificações na geometria do modelo e visando um melhor processamento dos dados. Os resultados na análise serão comparados com os ensaios experimentais, a fim de avaliar a conformidade do modelo e sua possível utilização.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir será apresentada a primeira etapa descrita anteriormente: a fundamentação teórica sobre alguns assuntos necessários para o desenvolvimento do estudo avaliativo teórico e experimental da união parafusada.

2.1 FUNDAMENTOS DA MECÂNICA DOS SÓLIDOS

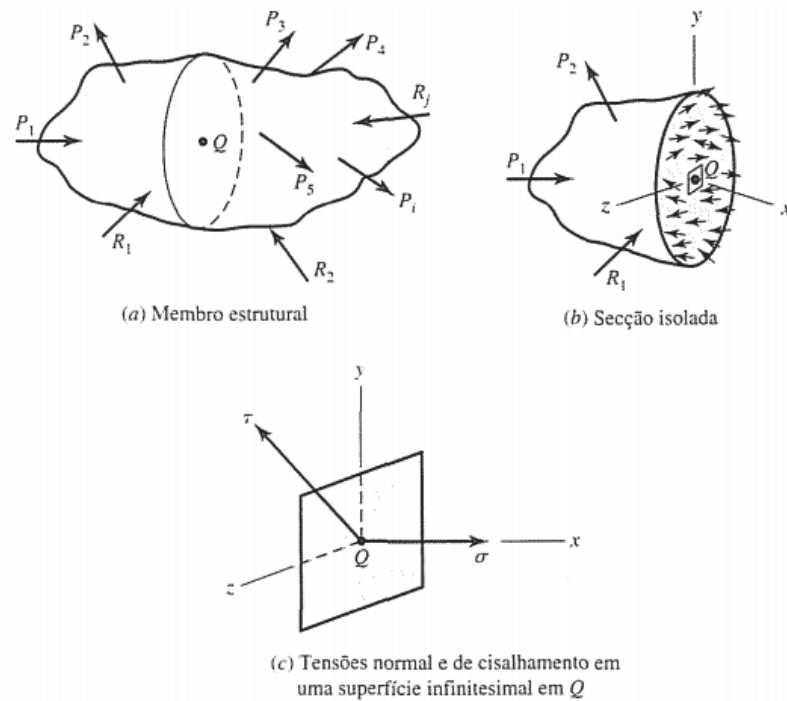
Muito dos materiais utilizados na engenharia possuem características elásticas, ou seja, quando submetidos a um carregamento externo sofrem deformação. Se essa força não exceder o limite de resistência do material, as deformações voltam ao estado original quando essas forças cessam. Esta teoria adota a hipótese de que os materiais são homogêneos e isotrópicos, apresentando as mesmas propriedades físicas em qualquer elemento e direção do corpo. Porém, materiais como os aços não atendem essa condição, pois possuem uma rede cristalina que podem apresentar variações ao longo de seu volume (TIMOSHENKO, 1980).

Mesmo sabendo que os materiais não são homogêneos, Timoshenco (1980) comprova que essa teoria pode ser aplicada com grande precisão em estruturas de aço. A explicação consiste em que os cristais formadores da microestrutura são muito pequenos em relação às dimensões do corpo, de tal forma que a aleatoriedade da distribuição desses cristais forma uma média ponderada das diferentes propriedades elásticas dos cristais.

Todo corpo submetido a um esforço está sujeito a tensões, considerando um corpo sólido carregado, conforme a Figura 1 (a) representa: P_i são as cargas e R_i as reações. Para saber a tensão no ponto Q, é necessário criar um plano no ponto de intersecção. O corte, Figura 1 (b), é arbitrariamente orientado normal ao eixo x estabelecendo o plano yz. As unidades de distribuição da força no corpo são em relação à área e, de modo geral, essa distribuição não é uniforme ao longo da superfície, tampouco normal ou tangencial ao plano.

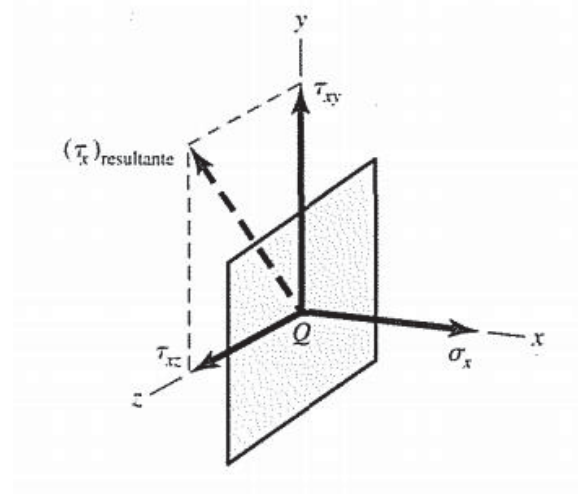
As componentes normais e tangenciais formadas no ponto Q dão origem às tensões normais (σ) e de cisalhamento (τ), como mostrado na Figura 1 (c). A normais podem ser denominadas de tração se a direção do carregamento for para fora da superfície, ou compressão quando a direção indicar para o interior da superfície (SHIGLEY, 2008).

Figura 1 – Distribuição das forças internas (tensão)



Fonte: SHIGLEY (2008).

Uma vez estabelecido o plano que intersecciona o ponto Q , normal ao eixo cartesiano x , determina-se o eixo y de forma arbitrária, formando, assim, um sistema de coordenadas cartesianas. Analisando a superfície infinitesimal representada pelo ponto Q da Figura 2, tem-se a tensão normal σ_x e a tensão cisalhante resultante τ_x . Sendo conhecido as direções y e z , pode-se então decompor τ_x em relação a esses eixos dando origem τ_{xy} e τ_{xz} .

Figura 2 – Componentes de tensão na superfície normal à direção x 

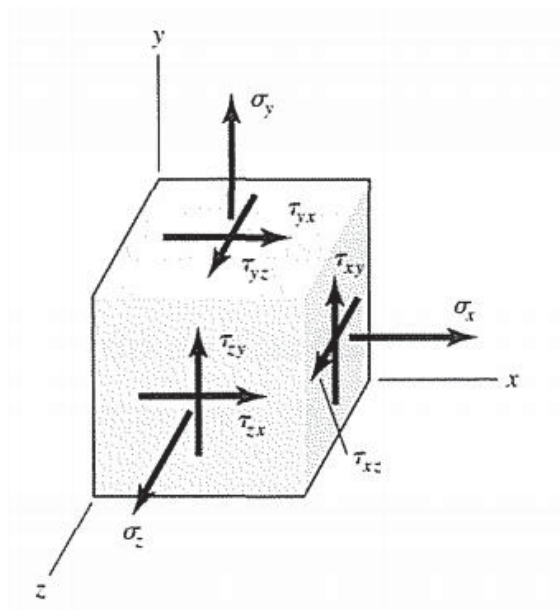
Fonte: SHIGLEY (2008).

O mesmo procedimento é utilizado para entender o estado de tensão no ponto Q, normal ao eixo y (Figura 3). Entretanto, as tensões na superfície cuja normal está na direção y serão designadas como $\sigma_y, \tau_{yx}, \tau_{yz}$. Um terceiro corte ortogonal é feito perpendicularmente à direção z, e as tensões resultantes são, $\sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$. Em geral um estado completo de tensões representado por nove componentes, $\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \sigma_y, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \sigma_z, \tau_{zx}, \tau_{zy}$. Para obter equilíbrio, as componentes opostas de cisalhamento devem ser iguais (SHIGLEY, 2008).

$$\tau_{yx} = \tau_{xy}, \quad \tau_{zy} = \tau_{yz}, \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad (1)$$

Dessa forma, é possível simplificar o número de constituintes, reduzindo para seis elementos de tensão: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

Figura 3 – Componentes tridimensionais de tensão



Fonte: SHIGLEY (2008).

A Lei de Hooke baseia-se na elasticidade dos corpos e estabelece uma relação entre tensão e deformação. A alongação por comprimento unitário de uma barra, estabelecida em um ensaio de tração, por exemplo, é denominada alongação unitária, e é fornecida por:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (2)$$

em que δ é a alongação e l o comprimento da barra, a Lei de Hooke para uma barra sobre tração e dada pela equação 3.

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

em que a constante E , é denominada com módulo de elasticidade cujo valor para os aços é em torno de 210 GPa

Uma barra submetida à tração tende a sofrer não somente deformação axial, mas também deformações laterais de contração. Poisson comprovou essa teoria através de vários experimentos, identificando uma proporcionalidade dentro do regime elástico e estabelecendo uma relação entre elas (SHIGLEY, 2008).

$$\nu = - \frac{\text{deformação lateral}}{\text{deformação axial}} \quad (4)$$

Tal relação é conhecida como coeficiente de Poisson ν , do qual é adotado 0,3 para os aços. A deformação de cisalhamento γ é a mudança no ângulo reto de um elemento de tensão quando submetido à tensão de cisalhamento pura, e a lei de Hooke para cisalhamento é fornecida por:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (5)$$

Pode-se verificar que, para um material linear, isotrópico e homogêneo, as três constantes elásticas estão relacionadas entre si, como segue equação 6.

$$E = 2 \cdot G(1 + \nu) \quad (6)$$

2.2 CRITÉRIOS DE FALHA

Para o estudo das tensões são considerados dois critérios de análise, a Teoria de Tresca e Von Mises. Esses métodos são muito utilizados por engenheiros em projetos, por produzirem resultados consideravelmente precisos para a previsão de possíveis falhas em matérias dúcteis (BORESI, 2003).

O critério da tensão máxima de cisalhamento, também conhecida como Critério de Tresca, afirma que o escoamento começa quando a tensão de cisalhamento máxima atingem o valor da tensão de cisalhamento que provoca escoamento no material quando submetido a

tensão uniaxial. As linhas de deslizamento de um material dúctil formam um ângulo de 45° com a superfície de tração. Para um estado multiaxial de tensões é aceitável que:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (7)$$

Logo, para um estado uniaxial de tensões ($\sigma_1=\sigma$, $\sigma_2=\sigma_3=0$), o valor máximo para a tensão de cisalhamento fica $\tau_{max}=\sigma/2$, sabendo que a tensão máxima cisalhante é igual a de escoamento, pode-se afirmar que $\tau_{max}=S_y/2$. A magnitude dos valores máximos de tensão cisalhamento é determinada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \geq \frac{S_y}{2} \\ \tau_2 &= \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2} \geq \frac{S_y}{2} \\ \tau_3 &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \geq \frac{S_y}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

O critério de energia de distorção, muitas vezes atribuída como Teoria de Von Mises, define que o escoamento do material começa quando a intensidade de energia de deformação ultrapassa o ponto máximo de energia estabelecido para o escoamento de um corpo submetido a uma força axial.

A teoria da energia de distorção originou-se a partir da observação de que materiais dúcteis tensionados hidrosticamente exibiam resistências de escoamento muito acima dos valores fornecidos pelo ensaio de tração simples. Como consequência, postulou-se que o escoamento não era em absoluto um fenômeno simples de tração ou compressão, pelo contrário, estava relacionado, de alguma maneira, com a distorção angular do elemento tensionado (SHIGLEY, 2008).

Considerando um caso simples de tração, a tensão máxima de escoamento coincidiria com S_y e, assim, determina-se uma equação única, equivalente, para o estado geral de tensão completo fornecido por meio de σ_1 , σ_2 , σ_3 , onde $\sigma' < S_y$. A equação pode, portanto, ser assim escrita:

$$\sigma' = \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

2.3 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DEFINIÇÃO

Na elaboração de um projeto, os engenheiros e projetistas são expostos a vários problemas técnicos, uns mais simples e outros mais complexos, e através da utilização de várias equações, tabelas e teorias básicas os resultados devem ser satisfatórios. Na área de cálculo estrutural, é de responsabilidade do engenheiro garantir a integridade da estrutura nas mais diversas condições de trabalho, em que, geralmente, utilizam teoremas da mecânica clássica e da resistência dos materiais como base de análise (ALVES FILHO, 2014).

Para o sucesso no desenvolvimento de um cálculo estrutural, não basta o engenheiro conhecer um aparato matemático, mas ter a capacidade de entender a natureza física do fenômeno, identificando os pontos relevantes em questão e gerando hipóteses sobre o comportamento da estrutura analisada.

De modo geral, os métodos analíticos clássicos permitem cálculos exatos de deslocamentos, deformações e tensões em todos os pontos da estrutura. Essas soluções, entretanto, são conhecidas para alguns casos, que não representam a maioria das aplicações do dia a dia.

Dessa forma, tem-se como uma alternativa de cálculo aproximado o Método dos Elementos Finitos (MEF), que pode ser aplicado em caráter geral independentemente da forma da estrutura ou dos carregamentos aplicados, dentro de uma precisão aceitável para um problema de engenharia (ALVES FILHO, 2014).

No âmbito da Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem como principal objetivo a determinação de tensão e de deformação de um sólido de geometria arbitrária, sujeito a carregamentos exteriores. Durante o projeto há possibilidade de realizar uma série de análises e modificações das características da estrutura, cujo objetivo é alcançar uma solução satisfatória do ponto de vista econômico, garantindo sua integridade funcional.

Quando surge a necessidade de resolver um problema de análise estrutural, alguns fatores que influenciam no desenvolvimento do modelo de análise entram em questão, como a classificação quanto à geometria, ao material constituinte e às condições de contorno (apoios, carregamento, etc.). O modelo de análise formulado e aplicado depende, em parte, das simplificações inerentes a cada tipo de problema. Diante disso, alguns aspectos que devem ser conhecidos previamente estão expostos a seguir (AZEVEDO, 2003).

2.3.1 Análise dinâmica ou estática

As ações externas às quais as estruturas são submetidas, em geral, são dinâmicas, devendo ser consideradas as forças de inércia associadas às acelerações que cada um de seus componentes estão sujeitos. Dessa forma, é coerente e muito oportuno que a análise leve em consideração os efeitos dinâmicos.

Contudo, em muitas situações, é razoável considerar que as ações são aplicadas de um modo suficientemente lento, tornando desprezíveis as forças de inércia e passando o modelo em questão, à uma análise estática (AZEVEDO, 2003).

2.3.2 Análise não linear ou linear

Na análise de uma estrutura sólida, é plausível considerar que os deslocamentos provocados pelos esforços são muito pequenos quando comparados com as dimensões dos componentes da estrutura. Neste caso assume-se que modificações na geometria da estrutura não influenciam no comportamento das tensões e todo o estudo é feito com base na geometria inicial indeformada, denominando-se como análise linear. Na análise não linear, a hipótese considerada não satisfaz a realidade, na qual a variação da geometria deformada influencia na distribuição dos esforços.

Na análise não linear ainda é possível considerar que a relação entre tensão e deformação do material são lineares. Nos casos em que essa simplificação não é considerada, é necessário recorrer a algoritmos específicos de análise não linear material (AZEVEDO, 2003).

2.3.3 Tipo de estrutura

Quanto à estrutura, podem ser classificadas dependendo de sua geometria como reticuladas, laminares ou sólidas. A maneira mais genérica de representar uma estrutura seria a sólida, visto que não apresenta características mínimas necessárias para enquadrar-se nas laminares ou reticuladas.

As estruturas laminares são as que se desenvolvem para ambos os lados de uma superfície média, mantendo-se na sua vizinhança, como o caso de uma lâmina cuja espessura é muito inferior em relação as outras duas dimensões.

Quando a superfície média é plana, a estrutura laminar pode ser classificada como parede, laje ou casca plana. Uma parede apenas encontra-se sujeita a ações paralelas ao seu

plano médio. Uma laje pode ter aplicadas forças perpendiculares ao plano médio e momentos cujo vetor está contido no plano médio. Uma estrutura laminar plana sujeita a outros tipos de ações é designada casca plana.

As estruturas reticuladas são as constituídas por barras prismáticas, cujas dimensões transversais são muito menores que o comprimento do respectivo eixo. Nesse tipo de estruturas, é comum distinguir os pórticos das treliças, conforme se considera ou não a compatibilidade de rotações nas extremidades de barras adjacentes (AZEVEDO, 2003).

2.3.4 Fundamentos básicos do MEF

Para Alves Filho (2014), ao subdividir um sistema em componentes individuais torna-se aceitável dizer que, a partir do entendimento do comportamento de cada um dos elementos, é possível entender o comportamento do conjunto por mais complexo que seja.

Como já comentado, as teorias da mecânica clássica fornecem subsídios para a resolução de problemas simples, tornando sua aplicação inviável em estruturas complexas, e as soluções analíticas permitem cálculos de valores exatos para os infinitos pontos da estrutura, denominando-se como sistema contínuo.

A ideia de discretização de um sistema contínuo consiste na divisão da estrutura em partes separadas e distintas, conectadas entre si em pontos (nós). Nesse caso, a solução aproximada simula a estrutura como uma montagem de elementos que têm um comprimento finito. Assim, a estrutura é representada por um número finito de elementos, de tal forma que esse número seja julgado suficiente para se ter resultados aceitáveis.

A utilização do conceito do MEF em dividir a estrutura em diversas partes produz muitas equações algébricas simultâneas. Uma maneira muito utilizada para armazenar tantas informações é através de matrizes, nas quais, com o auxílio de computadores, as equações são geradas e resolvidas a partir da condição de equilíbrio de cada elemento.

Uma análise utilizando o MEF tem como principal interesse a determinação da configuração da estrutura deformada, a partir do cálculo dos deslocamentos em cada um de seus nós. As forças que atuam em um determinado elemento e os correspondentes deslocamentos estão relacionados entre si por intermédio das diversas rigidezes associadas ao elemento. Desse modo, a rigidez da estrutura inteira está ligada diretamente com a rigidez de cada um de seus elementos (ALVES FILHO, 2014).

O modelo matemático que representa de forma discreta a estrutura pode ser estabelecido a partir da aplicação de algumas leis importantes da mecânica estrutural. A estrutura em equilíbrio deve satisfazer três leis fundamentais:

a) Equilíbrio de forças

Considerando a condição de equilíbrio da estrutura, podemos aplicar as equações de equilíbrio conhecidas da mecânica a cada um de seus elementos isoladamente. Da mesma forma, a condição de equilíbrio aplica-se internamente a cada elemento.

b) Compatibilidade de deslocamentos

Os elementos estão conectados entre si através de nós e, mesmo em condições de deformação, os elementos devem manter-se conectados nos mesmos nós.

c) Lei do comportamento do material

Ao transmitir esforços, os corpos deformam-se, e as forças internas crescem proporcionalmente às deformações. Essa relação, já conhecida da resistência dos materiais, é a Lei de Hooke.

Em um problema real, temos muitos componentes de deslocamento e de rigidez, sendo assim, a relação geral linear entre todas as forças externas e todos os deslocamentos nodais é expressa em notação matricial, como

$$\{F\} = [K].\{U\} \quad (10)$$

em que: F é matriz coluna com todas as cargas nodais; K é matriz de rigidez da estrutura inteira que relacionam todas as forças e deslocamentos nodais; e U , matriz coluna com todos os deslocamentos nodais.

A montagem da matriz de rigidez da estrutura depende do modo como os elementos são arrançados na estrutura e como estão conectados entre si, contabilizando a partir da rigidez de cada elemento a rigidez do conjunto.

De maneira geral, os diversos componentes de deslocamentos presentes nas estruturas são chamados de graus de liberdade, que são as variáveis de estado do problema.

2.4 FADIGA DOS MATERIAIS

Mesmo que, muitas vezes, alguns fenômenos não sejam totalmente explicados pela ciência, os engenheiros devem continuar utilizando as ferramentas das quais dispõem para projetar equipamentos confiáveis e de qualidade. A falha por fadiga é um desses fenômenos e

está relacionada a 90% das falhas relacionadas a componentes metálicos, como em aeronaves e automóveis.

A fadiga é o processo de degradação das propriedades mecânicas do material, em que componentes são submetidos a carregamentos cíclicos, podendo sofrer fraturas mesmo operando em estado de tensão abaixo do limite de escoamento do material (HOSFORD, 2005).

Em um estado de tração convencional, a relação entre a tensão e a deformação do material é obtida por um carregamento gradativo e lento, que permite a deformação plena do material até o instante de sua ruptura. Isso é conhecido como carregamento estático (SHIGLEY, 2008).

Os estudos mostram que os componentes de uma máquina não estão submetidos única e exclusivamente a carregamentos estáticos, mas também estão expostos a esforços que variam em níveis de forma flutuante. Esses esforços de carregamento produzem tensões que são conhecidas como variáveis, repetidas, alternantes ou flutuantes.

Para Kou (2003), a falha por fadiga consiste em três estágios: iniciação da trinca, propagação da trinca e fratura. No estágio inicial, uma descontinuidade na geometria ou uma alteração da microestrutura do material dá início à formação de uma microtrinca, que continua a propagar-se através dos planos cristalográficos em consequência da carga cíclica. Por fim, a trinca se propaga de tal forma que causa uma falha abrupta e irreversível do material.

Antes de falar dos métodos de estudo da vida em fadiga dos materiais, é importante comentar que uma série de fatores influencia na resistência à fadiga de um componente, projeto (rasgos de chaveta, furos, reduções bruscas de seção), estrutura metalúrgica do material (composição química, laminação, forjamento, fundição etc.).

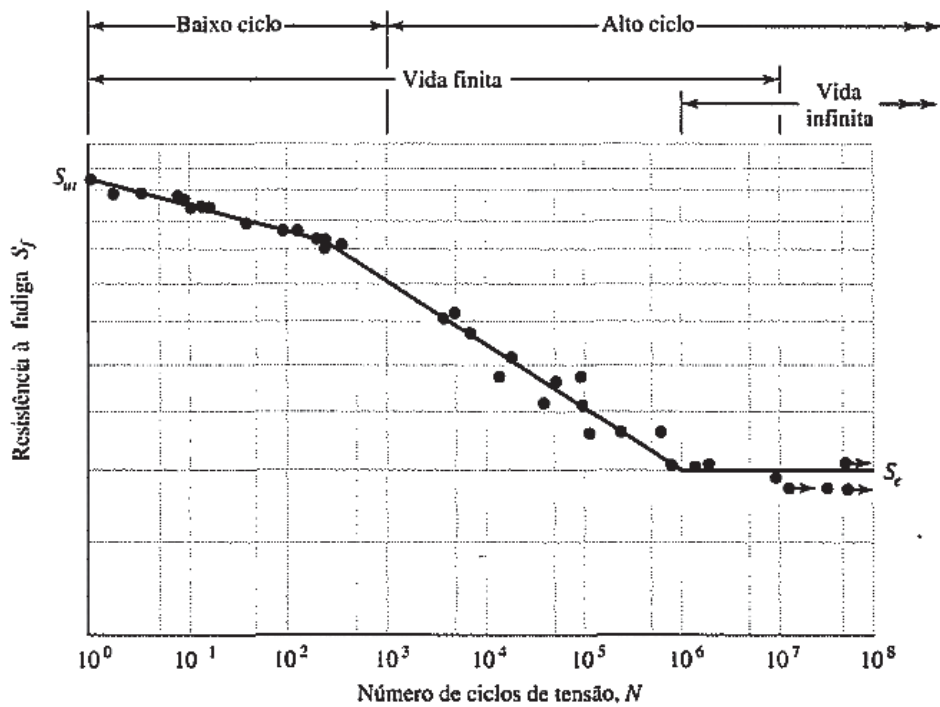
Para Shigley (2008), existem basicamente três métodos de análise de vida sob fadiga, dos quais os dois mais utilizados para estudo de fadiga são o de alto ciclo e baixo ciclo. Esses métodos tentam prever a vida em números de ciclos (N) até a ruptura para um dado carregamento (S). Classifica-se fadiga de baixo ciclo na qual a ruptura ocorre entre $1 \leq N \leq 10^3$ e fadiga de alto ciclo com ocorrência em $N > 10^3$.

2.4.1 Método da vida sob tensão

O método da vida sob tensão é o mais utilizado, pois representa, de forma precisa, aplicações de alta ciclagem. Caracterizando-se como o mais fácil de aplicar-se em projeto, o método baseia-se somente na tensão aplicada ao material, e a quantidade de dados de informação disponíveis favorecem sua utilização (SHIGLEY, 2008).

Para determinar a resistência de um material sob ação de cargas de fadiga, um corpo de prova é sujeito a uma dada carga cíclica repetitiva ou variável de forma que os ciclos são contados até a ruptura. Esse procedimento é repetido várias vezes, reduzindo a carga de aplicação afim de gerar um gráfico S-N (Figura 4) que represente o limite de resistência à fadiga (S_f) para um determinado número de ciclos (N).

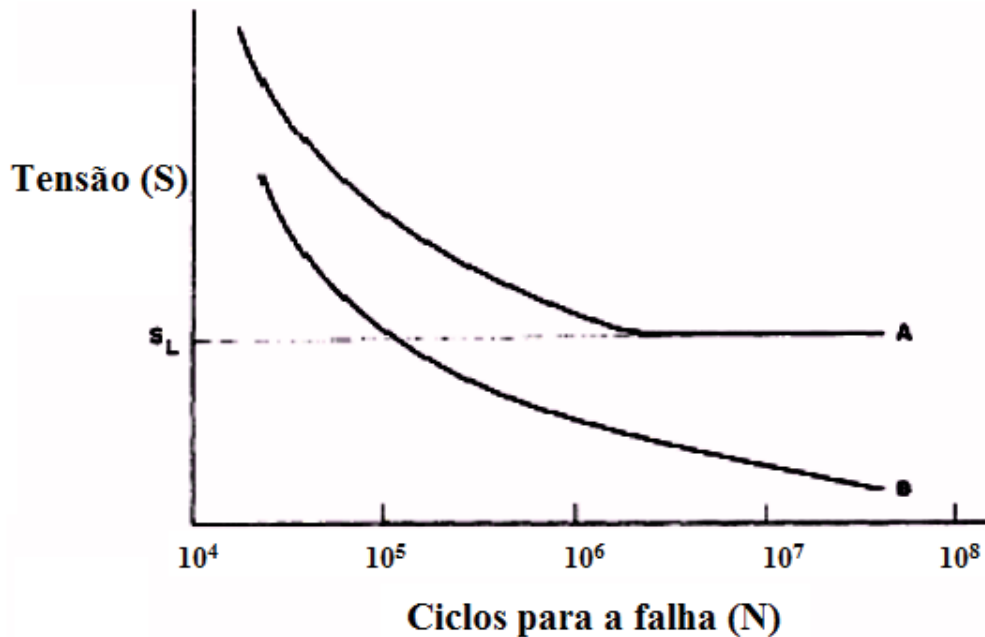
Figura 4 – Gráfico da curva S-N traçado a partir dos resultados de testes de fadiga



Fonte: SHIGLEY (2008).

O estudo desenvolvido por Wöhler possibilitou, de maneira rápida e prática, apresentar resultados de ensaios de fadiga de um material, o que pode ser observado na Figura 5, que representa a curva de fadiga ou também conhecida como curva de Wöhler. Para montar tal curva, é necessário fazer inúmeros ensaios em vários corpos de prova, a fim de determinar a vida do material para cada amplitude de carga aplicada (CASTRO, 2007).

Figura 5 – Curva S – N de Wöhler para um aço obtida através de ensaios de fadiga



Fonte: CASTRO (2007).

Como é possível observar na Figura 5, à medida que diminui a amplitude da tensão aplicada, maior é o número de ciclos suportado pelo material. O valor da tensão S que resulta em uma determinada vida N é chamada de limite de resistência à fadiga.

Os ensaios que resultam na curva S-N fornecem dados do limite de resistência à fadiga para um determinada geometria, condição de carregamento e processamento do material. Esses dados podem ser ajustados utilizando-se fatores empíricos de correção obtidos através de ensaios, para as diversas condições reais de uso de um componente como entalhes, acabamento superficial, tamanho etc., além de várias condições de carregamento.

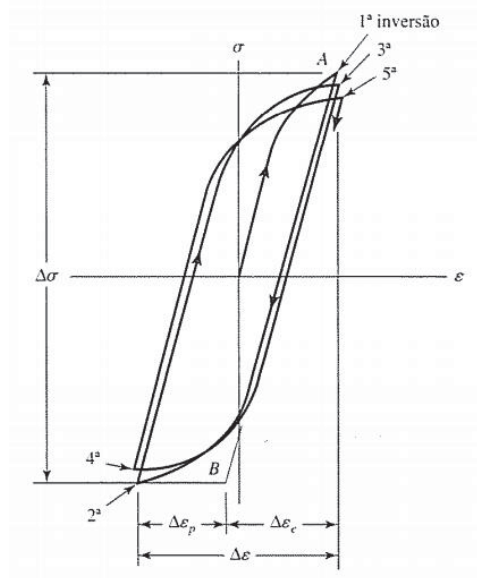
2.4.2 Método da vida sob deformação

Utilizado geralmente para aplicações que envolvem fadigas de baixo ciclo, o método da vida sob deformação estuda de forma mais aprofundada a deformação plástica, nos patamares em que as tensões e as deformações são consideradas para estimativas de vida.

Sabe-se que a falha por fadiga tem início em uma descontinuidade do material. Quando a tensão na descontinuidade excede o limite elástico, ocorre uma deformação plástica e, nesse caso, quando uma falha por fadiga está para acontecer é porque houve deformação plástica cíclica.

Em 1910, Bairstow verificou, por experimento, a teoria de Bauschinger, segundo a qual os limites elásticos do ferro e do aço podem ser mudados por variações cíclicas de tensão. Em geral, os limites elásticos de aços recozidos devem provavelmente aumentar quando sujeitos a ciclos de inversão de tensão, ao passo que aços repuxados a frio exibem um limite elástico decrescente (SHIGLEY, 2008). A Figura 6 ilustra esse fenômeno.

Figura 6 – Ciclos de histerese da tensão – deformação



Fonte: SHIGLEY (2008).

onde:

$[\Delta\sigma]$ - intervalo de tensão

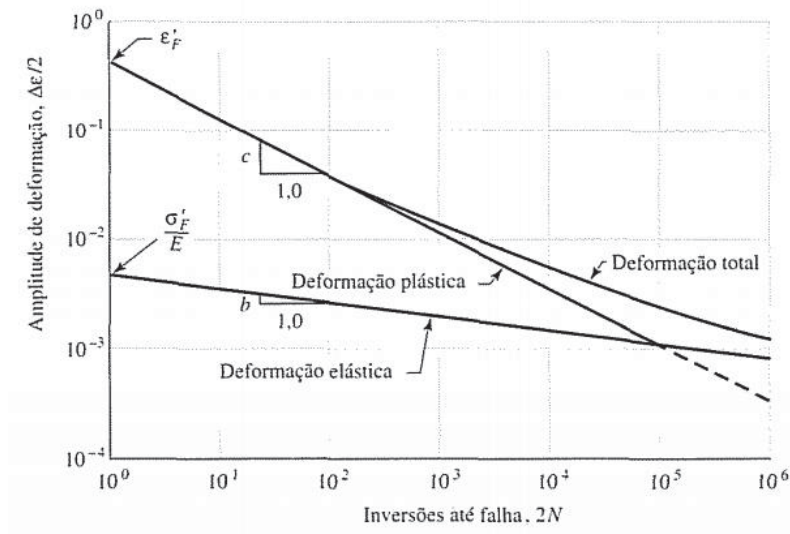
$[\Delta\varepsilon_p]$ - intervalo de deformação plástica

$[\Delta\varepsilon_e]$ - intervalo de deformação elástica

$[\Delta\varepsilon]$ - somas dos intervalos de deformação

Sendo assim, os gráficos plotados para a estimativa de vida em fadiga é a relação entre a deformação plástica e deformação elástica versus o número de ciclos, como mostra a Figura 7.

Figura 7 – Gráfico da curva $\epsilon - N$ traçado a partir dos resultados de testes de fadiga



Fonte: SHIGLEY (2008).

2.5 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)

Basicamente a literatura define que aços de alta resistência e baixa liga são aços com baixo teor de carbono, resultantes de processo que incorpora, durante sua produção, conceitos de endurecimento por precipitação, refinamento de grão e adição de microligantes em pequenas quantidades, resultando em aços com maior resistência e melhores características de trabalhabilidade (KOU, 2003).

Produzidos inicialmente para substituir os aços estruturais comuns na indústria automobilística a fim de aumentar a relação resistência-peso, hoje os ARBLs estão sendo utilizados em diversos outros setores, graças aos vários estudos realizados ao longo dos anos para procurar entender o comportamento desses aços e assim melhorar cada vez mais sua aplicação (NATHAN, 2015).

Classificados como aços com baixo teor de carbono ou seja, contendo menos de 0,25%, os ARBLs possuem em sua composição elementos de liga, como cobre, vanádio, níquel e molibdênio, e uma microestrutura ferrítica-perlítica que, juntamente com o processo de laminação, melhoram consideravelmente as propriedades mecânicas do aço (CALLISTER, 2008).

O avanço dos processos de fabricação possibilitaram às siderúrgicas a criação de novos materiais otimizados e de melhor desempenho. A laminação a quente, juntamente com uma posterior normalização, resulta em uma recristalização da microestrutura do aço, influenciando

positivamente no limite de escoamento e na capacidade de deformação do material (SAKATA, 2003).

A laminação controlada é um processo em que os vários estágios de trabalho possuem temperaturas controladas e quantidades de reduções previamente especificadas. Esse processo é largamente utilizado na obtenção de ARBL e tem como principal objetivo a deformação dos grãos de austenita, para obter grãos de ferrita finos após o resfriamento (JÚNIOR, 2004). A Figura 8 demonstra a evolução histórica dos novos processos de laminação e os mecanismos de endurecimento.

Figura 8 – Evolução histórica de novos processos de laminação, mecanismos

Ano	1970	1980	1990	2000
Processos termo-mecânico	Laminação controlada	Laminação intercrítica		P&D sobre aço com TG ultra-fino
		SHT	OLAC	TMCP
	Laminação sob baixa temperatura	Laminação sob baixa temperatura de reaquecimento	Resfriamento acelerado	
			Tempera direta	Modelamento matemático da laminação a quente
Mecanismo de endurecimento	Refino de grão Endurecimento por precipitação	Endurecimento por encruamento	Endurecimento por martensita ou bainita Endurecimento por transformação	Endurecimento por ultra-refino de grão
Normas			ASTM A841 Aço resfr. acel.	JIS-SN (constr. civil)

Fonte: GORNI (2007).

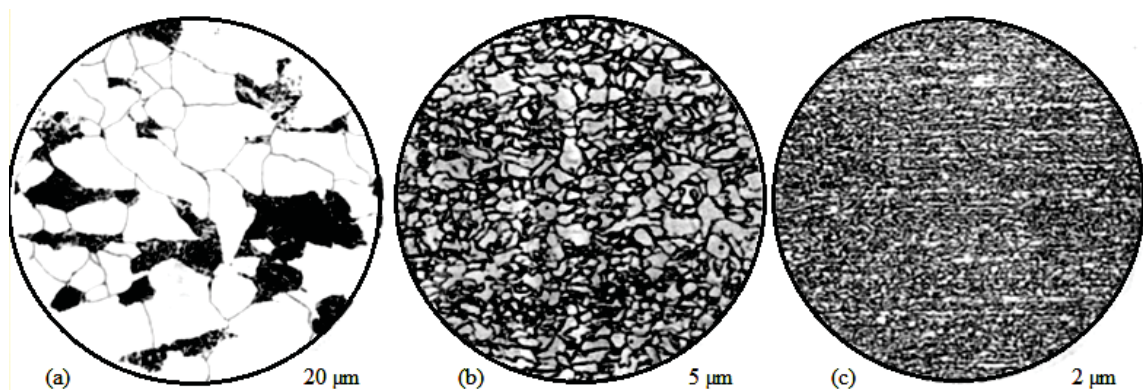
O processo de laminação controlada é formado por dois estágios. Inicialmente a chapa de aço é submetida a um passe de desbaste em altas temperaturas, entre 950°C e 1100°C, cujo principal objetivo é, após todos os passes de desbaste, obter um refino do grão através da completa recristalização da austenita, conforme Figura 9. Na segunda etapa, o acabamento, tem-se a influência dos elementos de liga na estabilização da austenita e retardação na sua recristalização em temperaturas inferiores a 900°C. Ao final do processo, o resultado são grãos de austenita muito deformados e alongados, que dão origem a grãos finos de ferrita acicular (SHOW, 2010).

Figura 9 – Evolução verificada na redução no tamanho de grão através dos processos de laminação

a) Aço ao carbono convencional resfriado a ar

b) Aço microligado processado por laminação controlada

c) Aço com grão ultra fino



Fonte: GORNI (2007).

Os elementos de liga são adicionados com o objetivo de ajustar as propriedades dos diferentes tipos de aços devido a cada aplicação. Como nos aços estruturais comuns, os aços ARBL possuem manganês (até 1,5%) e silício (até 0,7%). No entanto, recebem quantidades pequenas de nióbio, vanádio e titânio, que são elementos fortemente formadores de carbonetos e se precipitam à medida que a interface austenita/ferrita se movimenta, quando presentes em teores menores que 0,15% do peso. Refinam o grão quando precipitam a austenita e endurecem a ferrita (SILVA, 2009).

Existem vários tipos de aços ARBL, entre eles está o DOMEX 700, que é uma marca registrada da siderúrgica SSAB Tunnplant. Essa classe de aço pertence à classe de aços LN700 microligados com nióbio, titânio e vanádio, que são produzidos por um rigoroso processo de metalurgia, garantindo um elevado grau de pureza, e, posteriormente, são laminados em plantas modernas de laminação a quente a, fim de assegurar as propriedades finais desejadas.

Pertencente à classe de aços representados pela norma DIN EM 10149, a qual define propriedades mecânicas, químicas e nomenclatura, a Tabela 1 apresenta as propriedades mecânicas do DOMEX 700 aço (SSAB TUNNPLANT, 2003).

Tabela 1 – Propriedades mecânicas do aço DOMEX 700

Tensão de Escoamento min. (MPa)	Tensão de Ruptura min. (Mpa)	Tensão de Ruptura Máx (Mpa)	Alongamento % min.
700	750	950	12

Fonte: SSAB TUNNPLANT (2003).

Por possuir um baixo teor de carbono, conforme demonstra a Tabela 2, o aço Domex 700 recebe a adição de elementos que ajudam no refinamento de grão (Ni, Ti e V), melhorando a capacidade de deformação e a soldabilidade (SSAB TUNNPLANT, 2003).

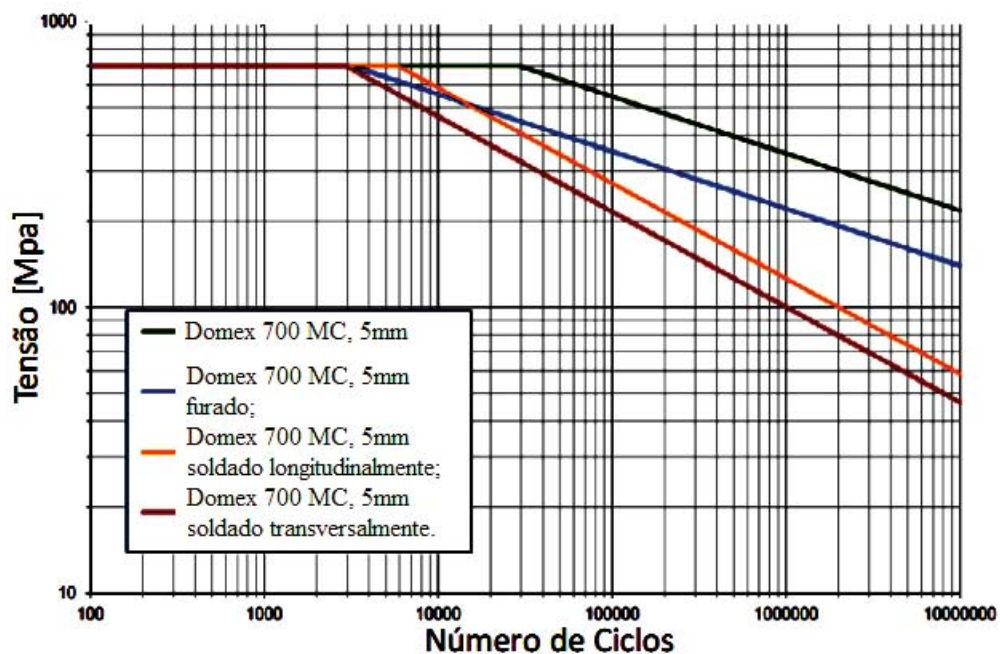
Tabela 2 – Composição química do aço DOMEX 700

C%	Si%	Mn%	P%	S%	Al%	Nb%	V%	Ti%
Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.
0,12	0,10	2,10	0,025	0,010	0,015	0,09	0,20	0,15

Fonte: SSAB TUNNPLANT (2003).

A Figura 10 representa a curva S-N do aço Domex 700, como pode ser observado o gráfico faz uma comparação entre quatro condições de ensaios, dos quais o mesmo aço apresentou diferentes propriedades de resistência à fadiga.

Figura 10 – Curva de fadiga para aço Domex 700

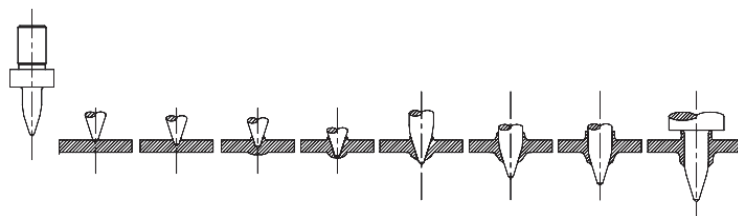


Fonte: SSAB TUNNPLANT (2003).

2.6 PROCESSO DE FURAÇÃO POR ESCOAMENTO

Na furação por escoamento, uma ferramenta de metal duro em alta rotação é pressionada contra uma chapa de aço, produzindo atrito na região de contato. E o calor produzido entre a ferramenta/peça torna o material maleável, diminuindo a resistência à deformação. Produz-se, então, o furo na chapa metálica com a deformação plástica do material. Todo o material do furo apresenta-se como uma rebarba que ascende e descende na periferia do furo. A sequência da conformação da bucha é ilustrada na Figura 11 (LOPES, 1994).

Figura 11 – Sequência da formação de uma bucha por furação por escoamento



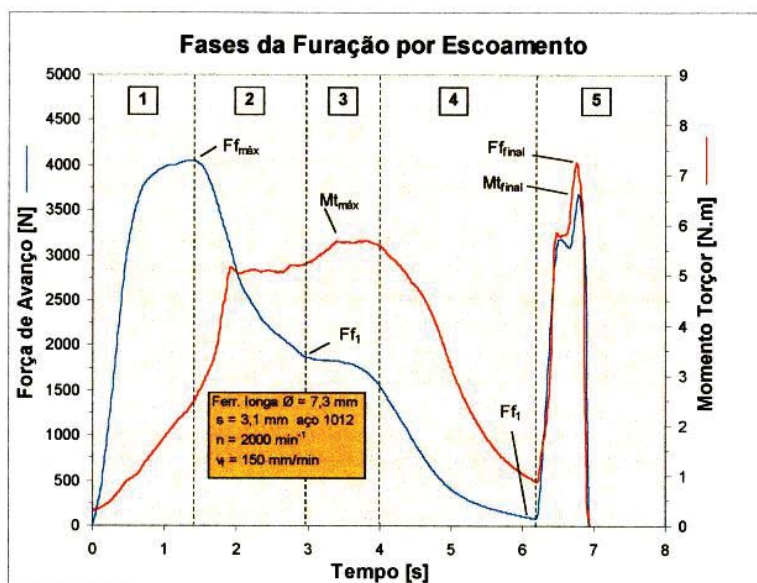
Fonte: LOPES (1994).

Ainda para Lopes (1994), as principais vantagens do processo de furação por escoamento são a inexistência de cavaco e a grande precisão dimensional dos furos, além de uma longa vida útil da ferramenta. A utilização desse novo método destaca-se na furação de perfis e chapas de espessuras finas na indústria automotiva, de eletrodoméstico e nos sistemas de distribuição de gases, entre outros.

Assim como na furação com broca helicoidal, a cinemática do processo envolve dois principais esforços – força de avanço e momento torçor –, que variam durante as fases do processo e dependem basicamente dos parâmetros de entrada, ferramenta e material da peça (BOOPATHI, 2013).

A Figura 12 representa as fases envolvidas no processo de furação por escoamento. Na fase 1, a entrada da ponta da ferramenta na peça aumenta a força de avanço, com o material inicialmente sendo deformado na direção contrária ao avanço. O momento torçor apresenta um aumento semelhante, porém em menor proporção, devido ao crescimento da área de contato entre peça/ferramenta (FILHO, 1998).

Figura 12 – Gráfico dos esforços envolvidos na furação por escoamento e suas fases



Fonte: FILHO (1998).

A máxima força de avanço determina o fim da fase 1 e o início da fase 2, momento em que a temperatura gerada pelo atrito diminui a resistência do material, permitindo que a ferramenta penetre mais facilmente na peça. Como visto na Figura 12, a força de avanço diminui à medida que a ferramenta fura a peça, e o momento torçor chega ao máximo na fase 3, devido ao aumento da área de contato. A fase 4 indica o final do escoamento do material, quando os valores de força de avanço e momento torçor chegam ao mínimo.

A rebarba superior formada pelo escoamento do material para a superfície da peça é tratada na fase final do processo (fase 5). Essa rebarba pode ser removida por ferramentas com gumes escareadores ou conformada por um colar. Quando uma ferramenta padrão é utilizada, o acabamento dado na rebarba superior da peça leva aos picos de força de avanço e momento torçor. Esses valores são maiores em ferramentas com colar conformador, em comparação com as de gumes escareadores (FILHO, 1998).

As condições de trabalho impostas têm grande influência nos níveis de esforços envolvidos no processo. À medida que os valores das velocidades de avanço aumentam, os níveis de força de avanço são influenciados positivamente, em função da maior taxa de deformação axial imposta, diminuindo o tempo para a execução do furo. Por outro lado, aumentando a rotação da ferramenta, a quantidade de energia fornecida à peça na forma de calor aumenta, tornando o material mais plástico, diminuindo a força axial (WEINGAERTNER, 1999).

Como já mencionado, o calor é o principal mecanismo que possibilita a conformação do furo, porém a alta temperatura gerada no processo influencia na microestrutura na zona termicamente afetada, modificando as características do material nessas regiões (MILLER, 2005).

Para a realização do processo, a árvore da máquina-ferramenta deve fornecer uma potência mínima necessária, cujo valor depende do momento torçor máximo da fase de escoamento, devido aos esforços de torque nesta etapa solicitarem por um tempo mais longo do eixo-árvore da máquina. A potência de acionamento mínima requerida durante o processo pode ser obtida pela equação 11:

$$P = Mt_{m\acute{a}x} \cdot \omega \quad (11)$$

onde:

[P] – Potência da máquina (kW)

[ω] – Velocidade angular

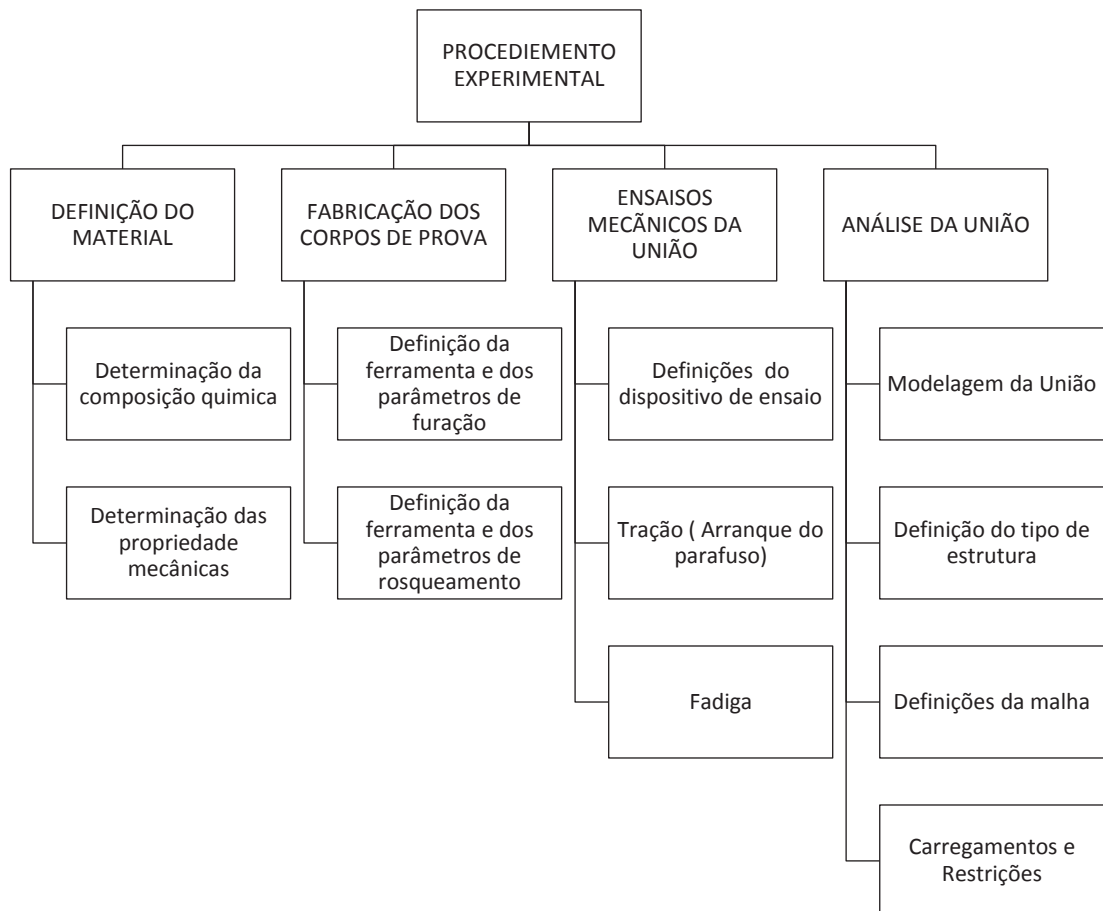
[$Mt_{m\acute{a}x}$] – Momento Torçor Máximo

A principal razão da formação da bucha resultante do processo de furação por escoamento é a posterior utilização como uma alternativa na união de peças. Para isso é necessária a produção de uma rosca interna empregando machos convencionais de corte ou de machos de conformação. Nesse caso, o rosqueamento por conformação é particularmente vantajoso devido à não ocorrência de remoção de material da parede da bucha, o que diminui sensivelmente a resistência à tração da bucha roscada (LOPES, 1994)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na sequência será abordada a organização do procedimento experimental e, para isso, foi criado um fluxograma, como mostra a Figura 13, dividindo as principais etapas a serem desenvolvidas durante o decorrer do estudo, as quais serão tratadas mais detalhadamente nos subitens a seguir.

Figura 13 - Fluxograma do método de estudo



Fonte: Autor (2017).

3.1 DEFINIÇÃO DO MATERIAL

O material utilizado no presente trabalho é o aço ARBL fabricado pela empresa USIMINAS denominado USI-LN-700, produzido em forma de tubo com dimensões 80x40x4,75 mm de espessura. Dessa forma, alguns ensaios são indispensáveis para a caracterização do material, bem como a verificação de sua conformidade com as especificações do fabricante.

3.1.1 Determinação da composição química

A análise da composição química tem como principal objetivo comprovar se o aço em questão realmente pertence à classe descrita. Dessa forma, o teste foi realizado em uma amostra do material utilizando um espectrômetro de massa modelo FOUNDRY-MASTER Xline com potência de 600 VA. Posteriormente, os resultados encontrados são comparados com os dados fornecidos pelo fabricante, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – Composição química do aço USI-LN700 % em peso

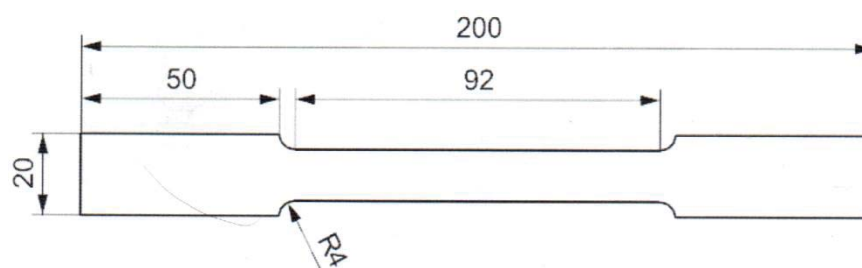
Elemento	C	Si	Mn	P	S	AL	Cu	Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	Sn	Bo	Ca	Pb
Amostra	0,097	0,034	1,510	0,028	0,004	0,058	0,016	0,042	0,004	0,136	0,538	0,070	0,003	0,001	0,001	0,003	0,013
USI-LN700	0,090	0,030	1,560	0,021	0,004	0,062	0,020	0,044	0,007	0,114	0,440	0,060	0,010	0,002	0,000	0,001	0,001

Fonte: Autor (2017).

3.1.2 Determinação das propriedades mecânicas

Para a avaliação das propriedades mecânicas do material, foram fabricados três corpos de prova seguindo a norma (ASTM E8M, 2004), conforme a Figura 14, e, após o seccionamento dos tubos, os corpos de prova foram usinados no sentido longitudinal. Para a realização dos ensaios de tração, foi utilizada uma máquina universal de tração SHENCK modelo UPM-200.

Figura 14 – Corpo de prova para ensaio de tração



Fonte: ASTM E8M (2004).

Os valores obtidos no ensaio de tração, comparados com a norma interna USIMINAS, podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço USI - LN700

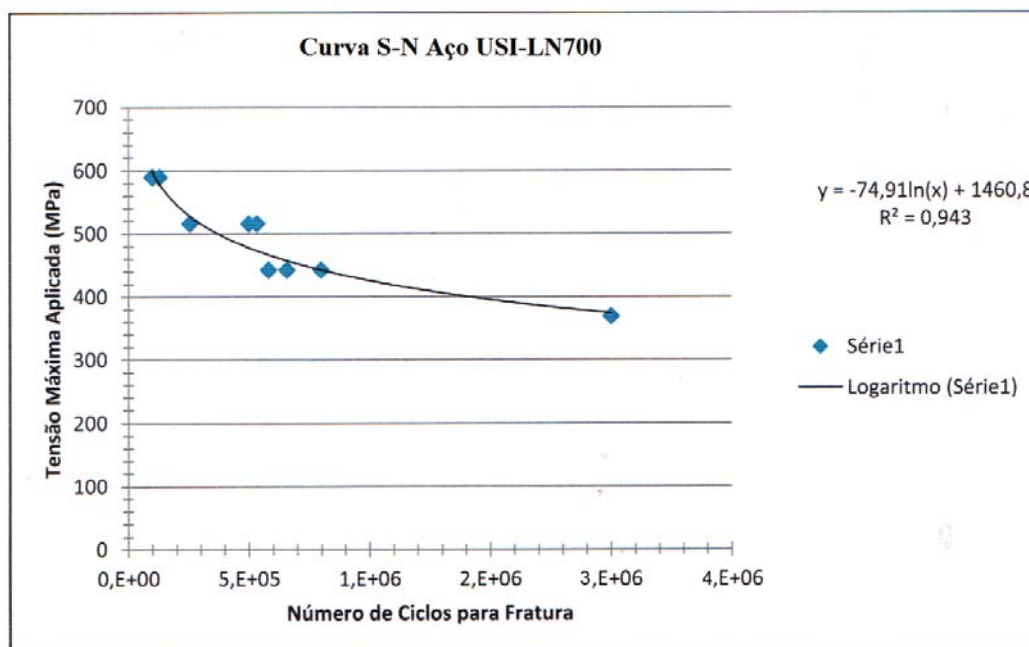
	Tensão de Escoamento (MPa)	Tensão Máxima (MPa)	Alongamento (%)
Amostra	714,4	758,5	18
USI-LN700	738,3	779,1	17,9

Fonte: Autor (2017).

3.1.3 Curva S-N do material

A curva S-N é uma característica do material indispensável para a realização da análise de fadiga. No trabalho desenvolvido por Esmelindro (2015), os valores encontrados nos ensaios de tração foram utilizados como parâmetro para a determinação da curva S-N do aço USI-LN 700. A vida em fadiga do material foi determinada iniciando com a carga de 80 % do limite de escoamento, decrescendo a tensão até que o corpo de prova ultrapassasse 2×10^6 ciclos, caracterizando-o como vida infinita. Para o estudo proposto, foi considerada a curva S-N, representada pela Figura 15.

Figura 15 – Curva de vida em fadiga aço USI-LN700



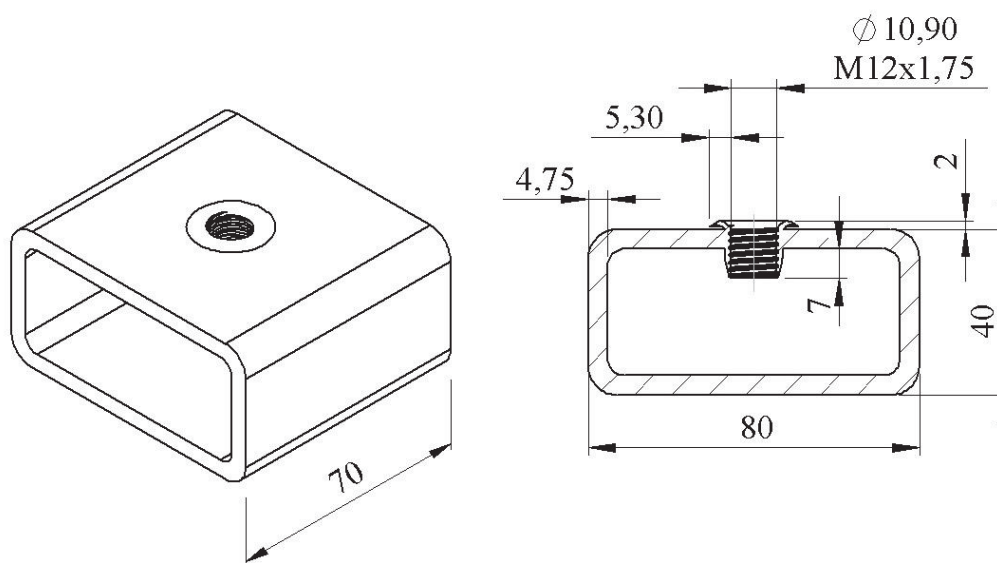
Fonte: ESMELINDRO (2015).

3.2 DETERMINAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os ensaios de fadiga e tração que serão realizados necessitam de corpos de prova, os quais devem ser desenvolvidos de forma que possam ser reproduzidos no modelo a ser analisado numericamente através do método dos elementos finitos, pois os resultados encontrados nos testes serviram como base de comparação para a validação do modelo utilizado na análise.

Confeccionou-se um total de 11 corpos de prova, dos quais 5 foram destinados ao ensaio de tração (arranque do parafuso), 5 para o ensaio de fadiga, e 1 para a análise metalográfica e microdureza. Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados tubos com dimensões 80x40x4,75 mm, conforme Figura 16, seccionados com 70 mm de comprimento. O corpo de prova foi furado em centro de usinagem utilizando uma ferramenta de furação por escoamento e, posteriormente, foi feita a rosca com um macho laminador.

Figura 16 – Corpo de prova



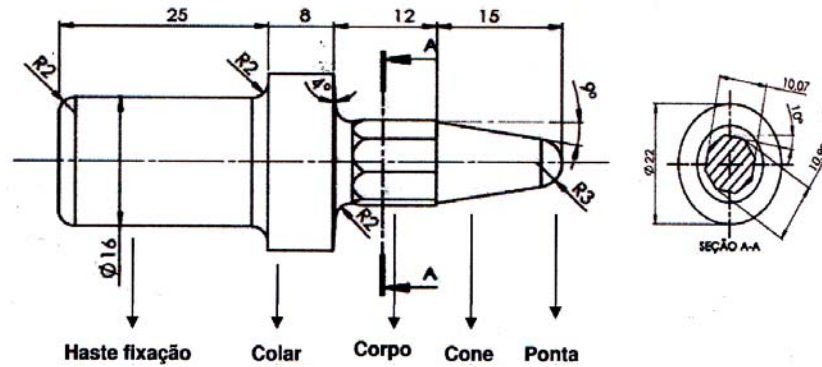
Fonte: Autor (2017).

3.2.1 Definição da ferramenta e dos parâmetros de furação

A ferramenta de furação foi a mesma utilizada por Pasinato (2015). Desse modo, buscou-se utilizar uma ferramenta otimizada quanto ao material e à geometria, sendo direcionada para a conformação de furos no aço LN 700. Fabricada em aço UK-40, possui

dimensão do corpo da ferramenta destinada para obtenção de uma rosca M12, sendo que o diâmetro primitivo é de 10,90mm, conforme a Figura 17.

Figura 17 – Ferramenta de furação



Fonte: PASINATO (2015).

No estudo realizado por Pasinato (2015), buscou-se comparar dois parâmetros de processo para a furação, classificados como grupo 1 e grupo 2 (Tabela 5), avaliando os resultados como microdureza, região afetada pelo calor, rugosidade da bucha e tensão residual.

Tabela 5 – Parâmetros definidos para o processo de furação

Etapas	Grupo 1		Grupo 2	
	Rotação (RPM)	Avanço (mm/min)	Rotação (RPM)	Avanço (mm/min)
1	3000	150	4000	250
2	2500	200	3500	300
3	2000	250	3000	350

Fonte: PASINATO (2015).

Conforme Pasinato (2015), os parâmetros utilizados no grupo 1 apresentam variações nos valores de microdureza a ponto de comprometer a estrutura do material, inviabilizando a utilização de peças furadas por escoamento em aplicações que apresentem vibrações e fadiga.

Diante disso, buscou-se utilizar os parâmetros que resultariam em condições mais críticas na utilização do material, ou seja, os parâmetros utilizados no grupo 1. Seguem descritas as etapas realizadas no processo:

- Aproximação da peça com rotação de 3000 rpm com avanço de deslocamento rápido;
- Contato da ponta iniciando o atrito com a peça, com rotação de 3000 rpm e avanço de 150 mm/min, sendo a penetração de 3mm na peça;

- c) Penetração do cone, com alteração da rotação para 2500 rpm e avanço de 200 mm/min, com penetração de 18mm, dando origem à bucha escoada;
- d) Conformação do furo com penetração do corpo da ferramenta, rotação de 2000 rpm e avanço de 250 mm/min, no qual a ferramenta se desloca 31 mm da face da peça, conformando o furo e caldeando a anilha superior;
- e) Retorno da ferramenta mantendo a rotação e o avanço da etapa D até a saída total do furo.

3.2.2 Definição da ferramenta e dos parâmetros de rosqueamento

Após o processo de furação, é necessária a produção de uma rosca interna no furo. Nesse caso, segundo Lopes (1994), o processo de rosqueamento por conformação de rosca é mais vantajoso, pois não implica na remoção de material da parede da bucha, tornando-a mais resistente quando comparado ao processo no qual são aplicados machos convencionais.

No rosqueamento foi utilizado um macho laminador M12x1,75 mm fabricado em aço rápido e com cobertura de titânio, da marca SANDVIK COROMANT, modelo E-308, sendo que o diâmetro indicado do furo pré-usinado deve ser de 11,2 mm.

Como a proposta do trabalho é avaliar a influência do processo de furação na resistência à tração e fadiga, buscou-se minimizar ao máximo os efeitos causados pelo processo de rosqueamento, sendo que, de acordo com dados de catálogo do fabricante, a melhor condição seria aplicar uma rotação de 250 rpm, o que resulta a uma velocidade de corte de aproximadamente 9,17 m/min em conjunto com fluido lubri-refrigerante com emulsão a 5% de óleo em volume.

3.2.3 Máquinas utilizadas no processo de fabricação dos corpos de prova

Inicialmente os tubos foram seccionados nas dimensões predefinidas com uma serra fita com comando hidráulico de avanço da marca FRANHO, modelo FM-18S. Durante a fixação dos tubos, foi observado o posicionamento a fim de garantir o formato retangular da amostra.

Os processos de furação e laminação da rosca foram realizados utilizando-se um centro de usinagem CNC, marca ROMI, modelo DISCOVERY 800, que possui capacidade de 7500 rpm e avanço de 30 m/min. Após a realização dos procedimentos-padrão de início de funcionamento do equipamento, foram programados os parâmetros de furação e de rosqueamento do furo no centro do CP.

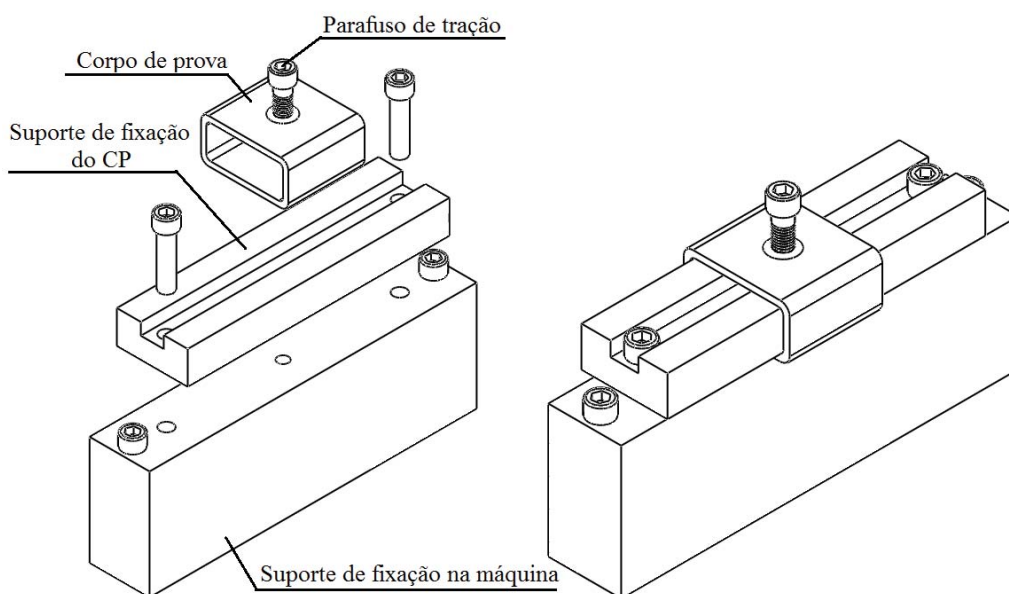
Durante a troca de ferramenta de furação para rosqueamento, foram feitas paradas no processo para a observação da temperatura com o auxílio de um termopar. A temperatura na região do furo foi monitorada até atingir 50 °C, para evitar qualquer influência na nova microestrutura em consequência da alta temperatura resultante da furação, em contato com o fluido lubri-refrigerante utilizado no rosqueamento.

3.3 DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Como os corpos de prova não seguem uma norma específica, foi necessário fazer algumas considerações para que os testes pudessem ser reproduzidos, levando-se em conta a similaridade com a utilização real do tubo.

Foi criado um dispositivo de fixação do corpo de prova que fornecesse a rigidez e precisão necessárias para garantir a repetitividade dos resultados, como ilustra a Figura 18.

Figura 18 – Dispositivo de fixação do corpo de prova



Fonte: Autor (2017).

3.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração tem como principal objetivo avaliar a resistência da união até que ocorra a ruptura do corpo de prova e serve também como parâmetro de carregamento para os ensaios de fadiga que serão realizados posteriormente.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração serão confrontados com os valores obtidos na análise do modelo de elementos finitos, a fim de avaliar se há influência do processo. O ensaio foi reproduzido em cinco corpos de prova e, para garantir que aconteça a ruptura dos filetes de rosca do CP, foram utilizados parafusos Allen da classe DIN 12.9.

Na realização dos ensaios de tração, um carregamento foi aplicado paralelamente ao sentido do eixo do parafuso, sem nenhuma consideração de pré-carga ou cargas cisalhantes. Utilizou-se uma máquina universal de tração SHENCK, modelo UPM-200, na qual o corpo de prova foi fixado utilizando o dispositivo citado no item anterior.

Feita a fixação do corpo de prova, partiu-se para o ensaio, no qual alguns parâmetros importantes, como a velocidade de aplicação do carregamento, foram mantidos conforme norma ASTM E8M, 2004.

3.5 ENSAIO DE FADIGA

Assim, como no ensaio de tração, foram reproduzidos 5 testes em corpos de prova, utilizando-se o mesmo dispositivo de fixação, e a mesma classe de parafusos de fixação. Com este ensaio, buscou-se avaliar a resistência da união através do número de ciclos até sua ruptura.

Determinou-se que a carga flutuante aplicada no sentido paralelo ao eixo seria pulsante, ou seja, a carga é aplicada até atingir seu valor e, posteriormente, relaxada a zero, a uma frequência de 4 Hz..

Buscou-se, com base no gráfico da Figura 15, determinar um valor para a carga aplicada nesse ensaio, que chegasse a 10^7 ciclos, os quais, segundo Shigley (2008), caracteriza vida infinita. Sendo assim, a tensão considerada é 432 MPa no gráfico da curva S-N, valor correspondente a 60 % da tensão de escoamento.

Como há uma relação de proporcionalidade entre a força aplicada e a tensão resultante no corpo de prova, o valor da carga aplicada no ensaio foi de fadiga 19,2 kN , sendo os 60% da média dos resultados encontrados para a carga de limite de escoamento obtido através do ensaio de tração (Anexo B).

Para a execução do ensaio foi utilizada uma máquina Servo Pulser, da marca SHIMADZU, modelo EHF-EV101K1-010-1^a, com capacidade de carga de até 100KN.

3.6 METALOGRAFIA

Para análise metalográfica, realizou-se o seccionamento do corpo de prova no centro do furo em sentido longitudinal ao tubo, visando à caracterização da união rosca-parafuso e avaliação da alteração da microestrutura resultante da furação. Foram realizadas avaliações de macro e micrografias com o auxílio de equipamentos destinados para tal função.

Após todo o procedimento usual de preparação da amostra, a revelação da estrutura foi feita utilizando o reagente químico Nital com 2% de concentração. Posteriormente, a macrografia deu-se em um microscópio marca ZEISS, modelo STEMI 2000-C; já para a micrografia, utilizou-se um stereomicroscópio modelo AxioCam MRc5, também da marca ZEISS.

3.7 ENSAIO DE MICRODUREZA

Para o ensaio da microdureza, realizou-se o seccionamento do corpo de prova no centro do furo em sentido longitudinal ao tubo. A microdureza foi medida na escala Vickers com ponteira de diamante piramidal, com 136° e carga de 0,3 kgf, e o equipamento de ensaio foi um microdurômetro da marca SHIMADZU, modelo HVM-G20ST.

As medições foram repetidas 3 vezes para cada posição, distribuindo-se da parte interna do furo no sentido longitudinal do tubo seguindo em direção à extremidade do CP, variando 0,25 mm nas primeiras 5 medições e 0,5 mm nas últimas 10, totalizando 15 medições e um comprimento de 6,0 mm, no qual foi encontrada a microestrutura do metal-base.

3.8 DEFINIÇÃO DO MODELO DE ANÁLISE NUMÉRICA

Na sequência será determinado o modelo de análise numérica a ser utilizado no estudo. É importante salientar que o principal objeto da análise é o tubo, pois é nele que se espera alteração nas propriedades causadas pelo processo de furação por escoamento.

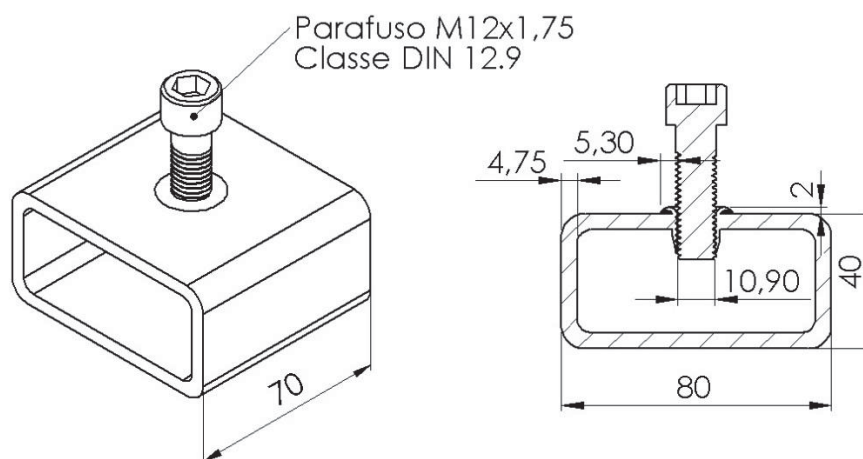
Serão abordados tópicos sobre as alterações da geometria, que representa o corpo de prova, a determinação dos elementos finitos do modelo numérico, as condições de carregamentos e as restrições aplicadas na análise.

Uma análise considerando a geometria original sem modificações está descrita no Anexo A, a qual foi feita para verificar se as modificações realizadas na geometria poderiam gerar alguma influência nos resultados de tensão e fadiga do modelo.

3.8.1 Modelagem da geometria

Para a criação de um modelo de elementos finitos que realmente apresente resultados confiáveis, é necessário o desenvolvimento de uma geometria que represente de forma precisa o componente em estudo. Para tal atividade, utilizou-se o *software* de modelamento SolidWorks, observando-se as dimensões encontradas nas amostras físicas, chegando-se a um modelo 3D muito próximo ao real, conforme mostra a Figura 19.

Figura 19 – Geometria gerada a partir dos corpos de prova

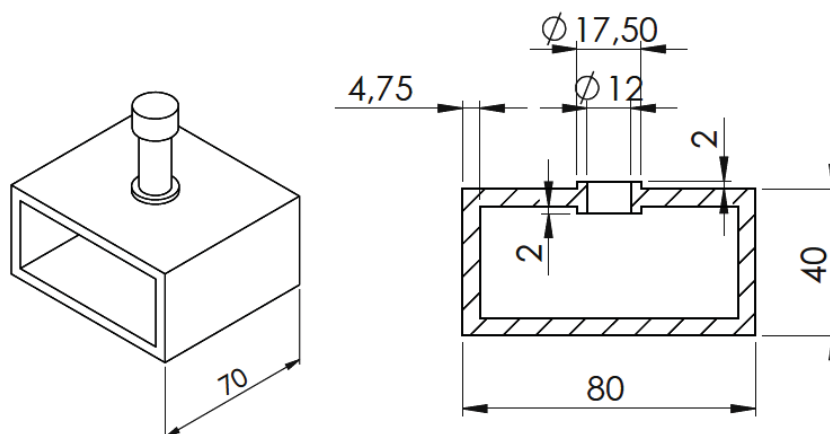


Fonte: Autor (2017).

Após a modelagem em 3D, a geometria foi importada para o software de modelamento Spaceclaim. Nesta etapa o modelo sofreu algumas simplificações, como a retirada dos raios de dobras do tubo, arredondamentos provenientes da conformação da bucha e os filetes de rosca, como representa a Figura 20.

Essas simplificações são necessárias para facilitar a geração da malha, diminuindo o número e a distorção dos elementos que representam a geometria e reduzindo o tempo de processamento do modelo.

Figura 20 – Geometria de análise



Fonte: Autor (2017).

Também foram feitas algumas mudanças na região da bucha escoada. Como pode ser visto na Figura 19, a bucha possui um formato assimétrico visto em um plano horizontal à espessura da chapa, tornando a geometria restrita a um modelo que utilize elementos finitos do tipo sólido.

Sendo assim, o modelo proposto pelo estudo representa a bucha escoada na furação como uma continuação do seguimento da chapa, porém com espessuras de 8,75 mm. Esse valor teve como referências as dimensões encontradas nas anilhas superior e inferior da bucha. Essas alterações feitas na geometria inicial tornam possível a utilização do elemento finito do tipo casca para o modelo em questão.

3.8.2 Definição do tipo de elemento

Por tratar-se de um corpo de prova fabricado a partir de um tubo constituído de chapa fina, que possui uma dimensão (espessura) bem menor que as outras (largura e comprimento), ou seja, 4,75x80x70 mm, pode-se dizer que essas estruturas apresentam um comportamento de cascas.

Esse comportamento é caracterizado pelo fato das tensões atuantes resumirem-se em duas tensões normais σ_x e σ_y e uma tensão cisalhante τ_{xy} , todas atuando no plano xy . Em decorrência de tais fatos, esse estado de tensões é chamado de estado plano de tensões. Sendo assim, a representação de uma chapa fina pode ser feita em função de seu plano médio, associando suas propriedades geométricas como espessura, comprimento e largura (ALVES FILHO, 2014).

A geometria de análise do corpo de prova permite a criação de um plano médio quando se fala do tubo, viabilizando a utilização da teoria de casca. Porém, o parafuso possui características nas quais não existe um plano médio, sendo necessária a utilização de elementos do tipo sólido.

Essa classe de aplicações é utilizada quando as três dimensões do corpo são comparáveis, não apresentando grandes variações entre si. O que implica o chamado de estado triaxial de tensões, no qual se tem três componentes de tensão normal, que são σ_x , σ_y , σ_z , e três tensões cisalhantes τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{zx} .

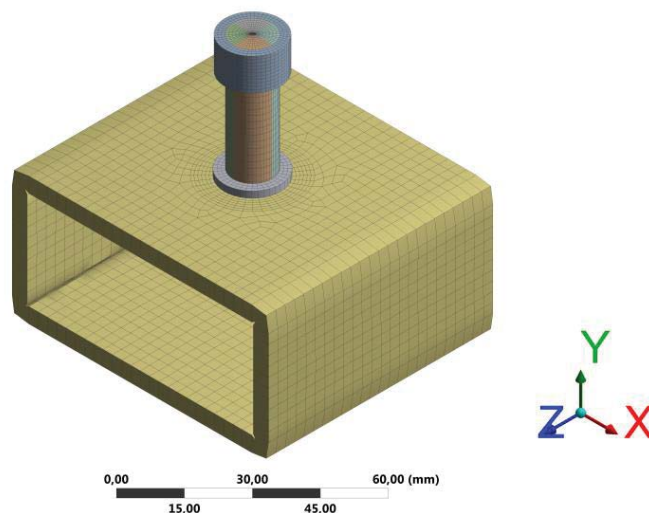
Com base nessas constatações, utilizou-se, para discretizar o modelo, elementos casca para representar o tubo, variando a espessura em relação ao plano médio, seguindo as dimensões da geometria apresentada na Figura 20, e utilizando elementos sólidos para a representação do parafuso.

3.8.3 Definição do tipo da análise e malha

Os aços apresentam características de deformação linear quando submetidos a um carregamento, dentro de seu limite de tensão de escoamento. É plausível, portanto, considerar que o estudo consiste em uma análise estática linear.

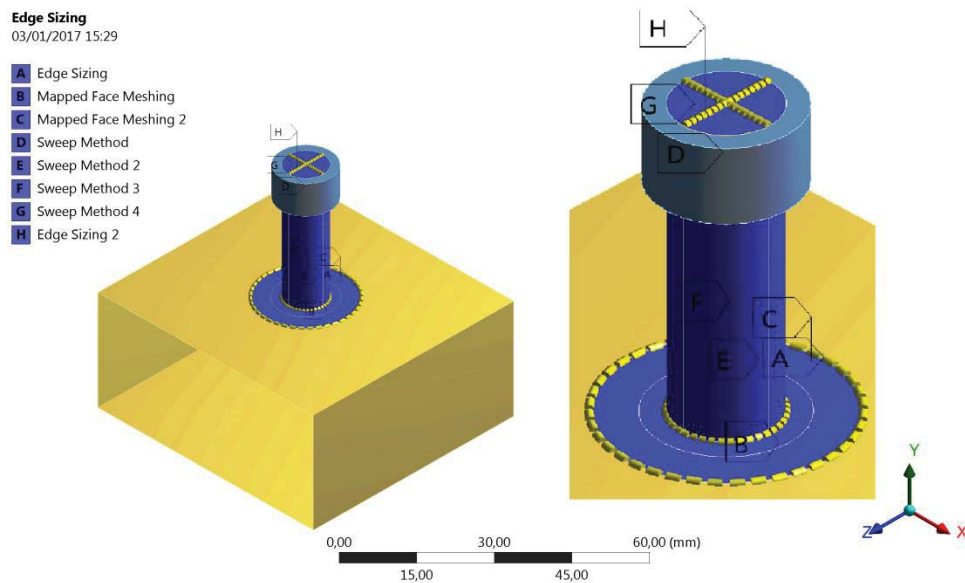
Depois de feitas as considerações iniciais do modelo de análise, partiu-se para a discretização efetiva do modelo, com o auxílio de programa de elementos finitos ANSYS, criando-se a malha de elemento finitos, conforme demonstra a Figura 21.

Figura 21 – Malha de elementos finitos



A malha gerada foi obtida utilizando-se alguns recursos de refinamento dos elementos Edge Sizing, Mapped Face, Sweep Method, principalmente na região do furo onde existem as aplicações de contatos (Figura 22). Também foram utilizados elementos finitos de segunda ordem, os quais possuem uma formulação que apresenta resultados mais precisos. A Tabela 6 resume os tipos e as quantidades dos elementos utilizados.

Figura 22 – Regiões de refino da malha



Fonte: Autor (2017).

Tabela 6 – Descrição dos elementos utilizados na análise

Nomenclatura ANSYS	Tipo de elemento	Número de nós	Números de graus de liberdade por nó	Ordem
HEX20	Sólido	20	3	2°
WED15	Sólido	8	6	2°
QUAD4	Casca	4	6	2°
Total da Malha		67474	18014	

Fonte: Autor (2017).

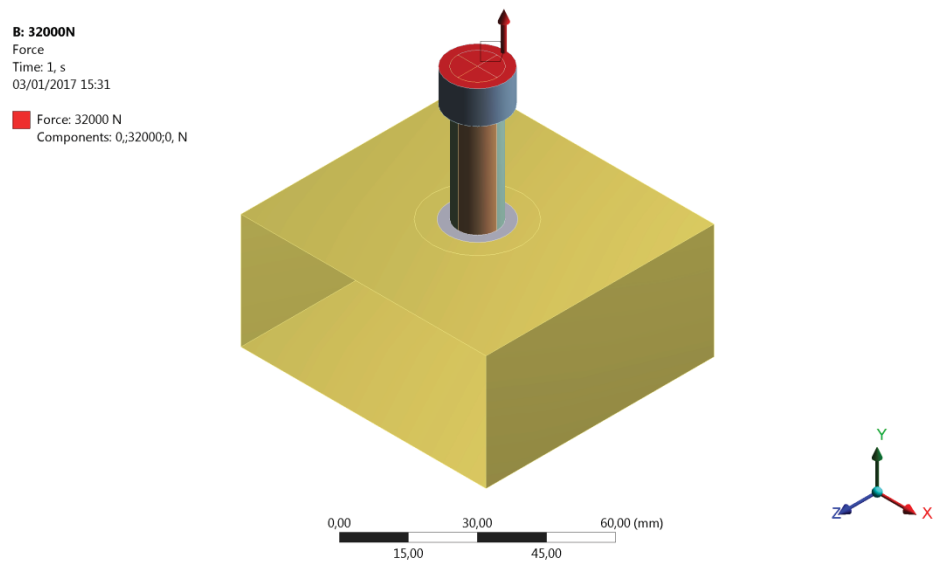
3.8.4 Carregamentos e restrições

Seguindo o mesmo conceito dos testes práticos, os modelos estudados foram submetidos a carregamentos longitudinais ao eixo do parafuso, conforme mostram as figuras 23 e 24.

No primeiro modelo foi aplicada uma força de 32 kN, valor que representa a média dos valores encontrados para a carga de limite de escoamento nos ensaios de tração descritos na Tabela 8. O objetivo foi verificar o comportamento das tensões distribuídas na estrutura, no limite em que a força aplicada inicia o escoamento do material na região do furo.

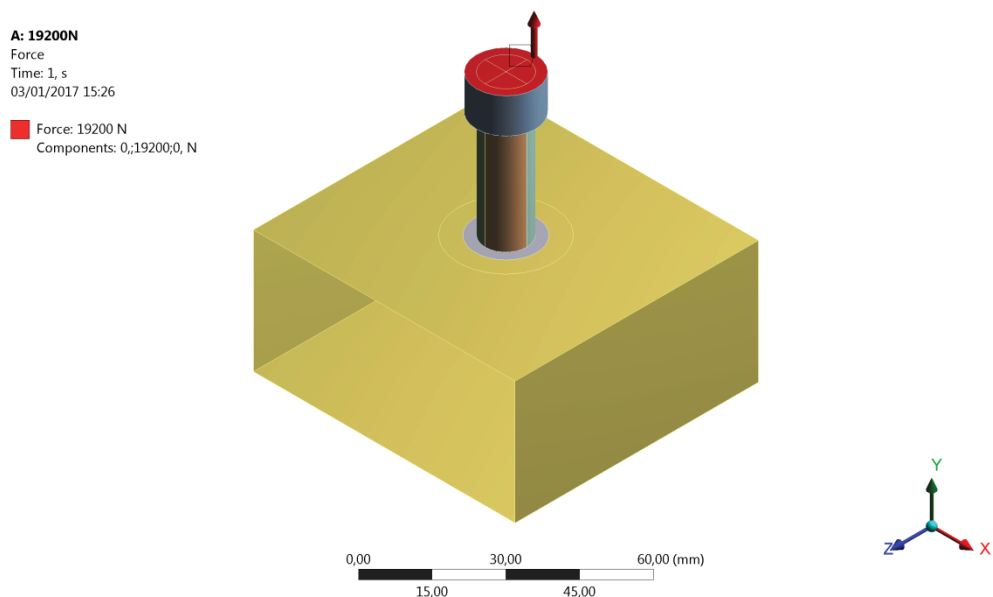
Para a análise de fadiga, a carga aplicada seguiu a regra inicialmente estabelecida de 60% da carga-limite de escoamento, ou seja, 19,2 kN, de forma que os valores de resistência à fadiga possam ser comparados com os valores encontrados nos ensaios.

Figura 23 – Carregamento de tração aplicado no modelo



Fonte: Autor (2017).

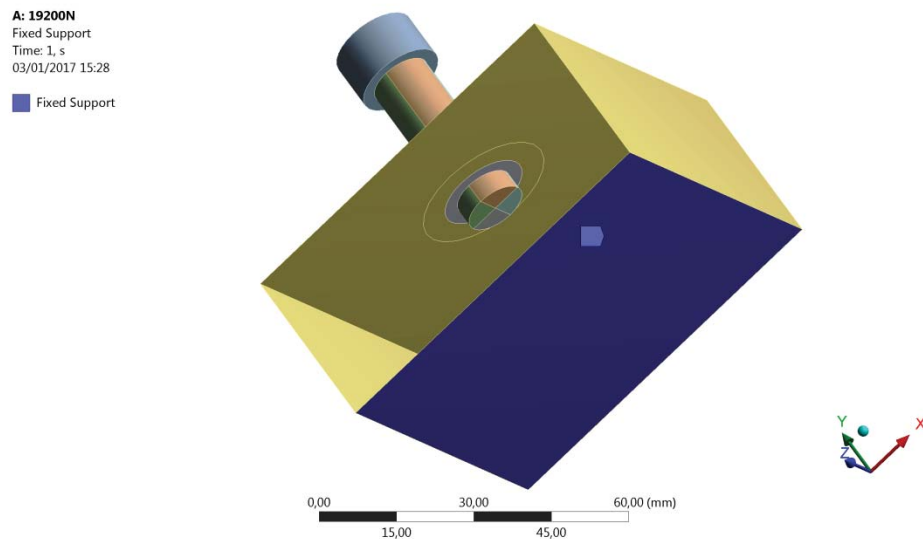
Figura 24 – Carregamento de fadiga aplicado no modelo



Fonte: Autor (2017).

Aplicou-se uma restrição do tipo “Fixed Support” nos dois modelos de análise, sendo que esse recurso restringe o movimento do corpo nas direções X, Y, Z, evitando qualquer movimento de corpo rígido. A condição de contorno foi empregada na superfície inferior do tubo, sendo reproduzida a condição imposta nos testes quando utilizado o dispositivo de fixação como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Restrição aplicada nos modelos de tração e fadiga

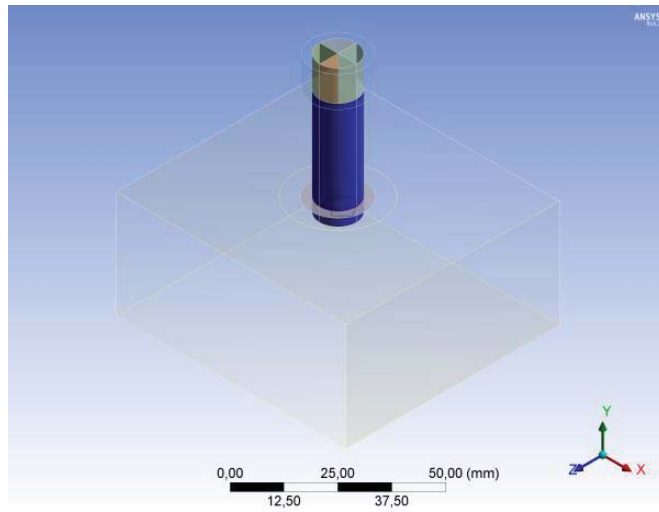


Fonte: Autor (2017).

Como se trata de uma análise linear, ou seja, o que se avalia é a tensão do limite de escoamento do material, despreza-se qualquer valor excedente do modelo. Portanto, é plausível aceitar que não haja movimento algum na região da rosca, pois, caso contrário, implicaria uma deformação plástica na região.

Para simular a região de contato entre o parafuso e o tubo nos dois modelos analisados, foi utilizado um recurso “Bonded”, o qual considera que as superfícies em contato estão coladas entre si, conforme Figura 26.

Figura 26 – Contato aplicado nos modelos de tração e fadiga



Fonte: Autor (2017).

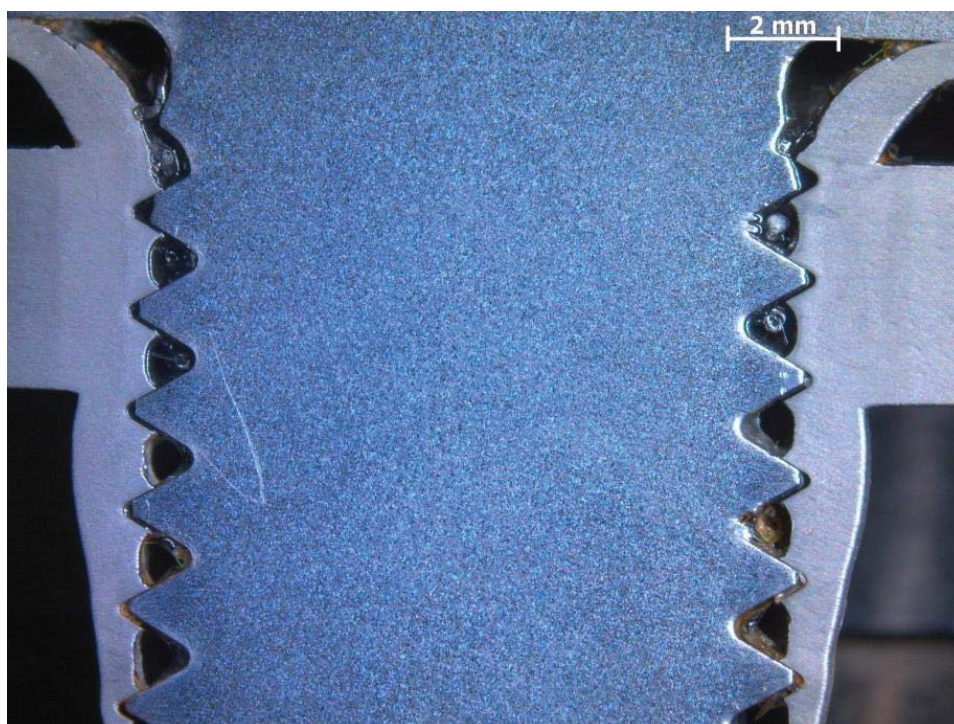
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais e nas análises realizadas durante o estudo, sendo que algumas questões importantes serão apontadas para a conclusão do trabalho.

4.1 ANÁLISE MACROESTRUTURAL

A macrografia representada pela Figura 27 mostra a secção transversal da região do furo, na qual se pode identificar a união do peça-parafuso. É possível verificar também uma característica da rosca conformada, que é a formação na crista do filete de uma pequena cavidade denominada de “garra”, proveniente do encontro do material deslocado de dois flancos adjacentes (LOPES, 1994).

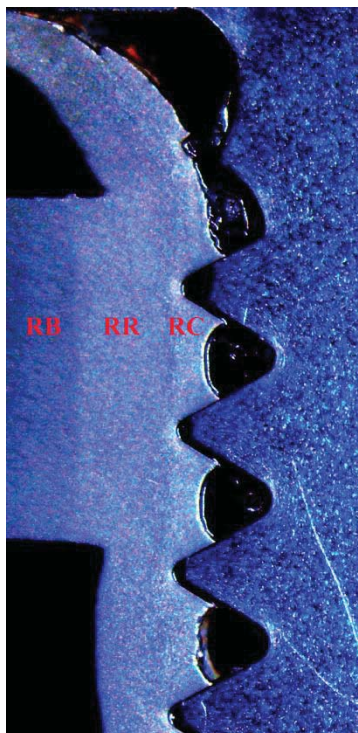
Figura 27 – Macrografia da união peça-parafuso



Fonte: Autor (2017).

Já na Figura 28, identificam-se regiões que sofreram alterações na sua microestrutura devido ao calor gerado no processo de furação, as quais foram denominadas de RC, RR, RB

Figura 28 – Caracterização das regiões afetadas pelo calor, secção transversal

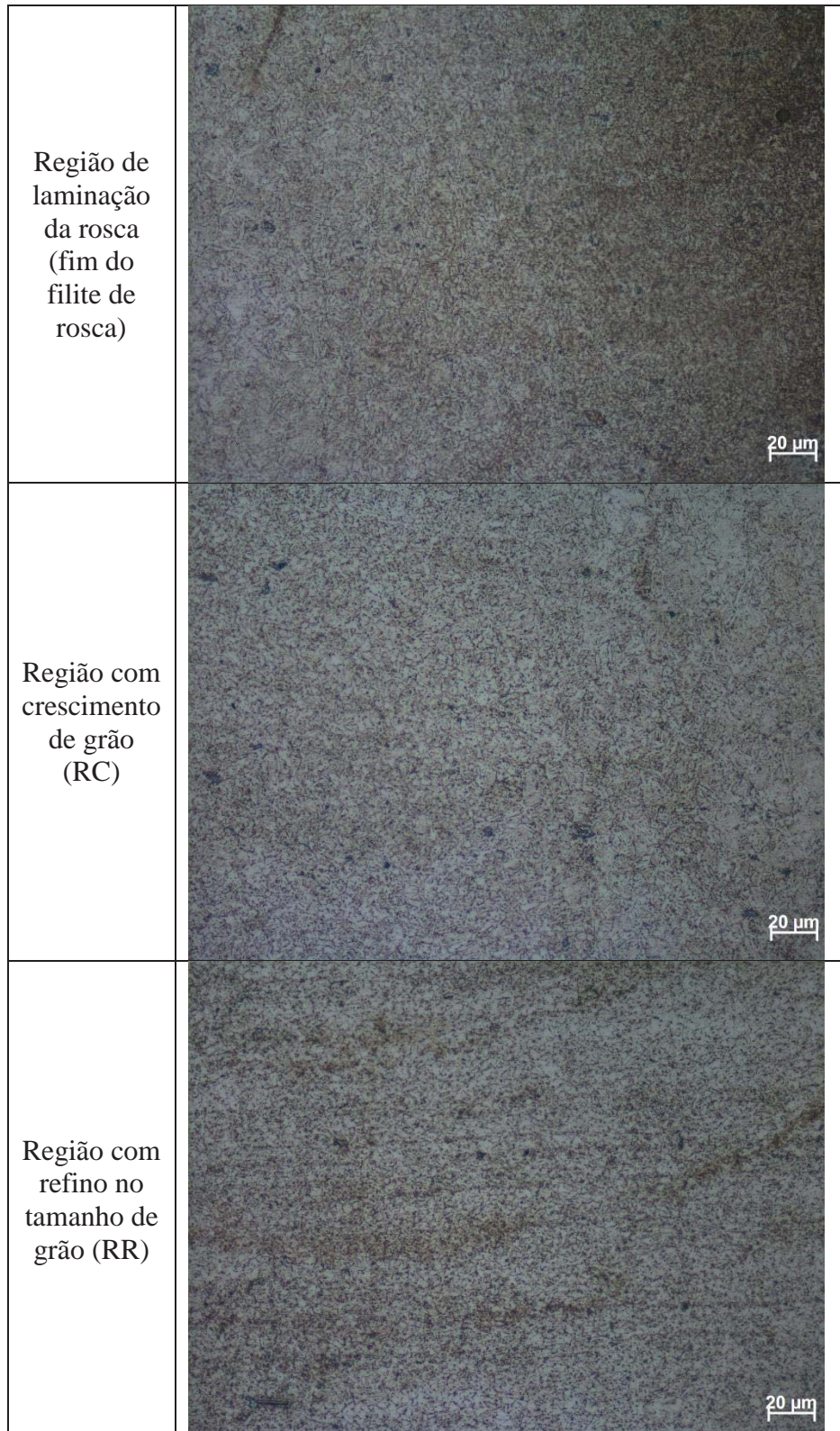


Fonte: Autor (2017).

4.2 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

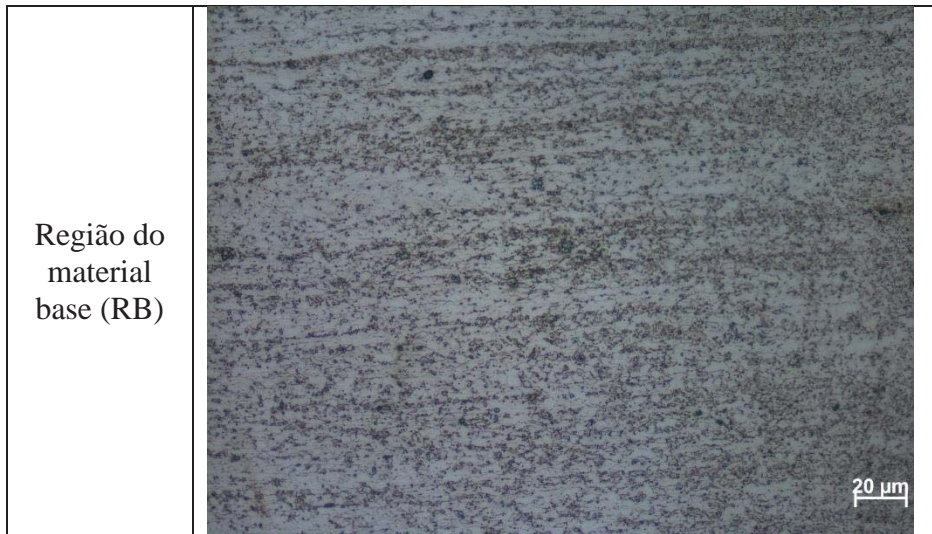
As regiões descritas na Figura 28 foram estudadas a fim de verificar possíveis alterações microestruturais devido à influência do calor e da conformação plástica durante a fabricação. É possível verificar-se mudanças consideráveis, principalmente quando se observa a recristalização do material na zona termicamente afetada. Identificou-se também uma quarta estrutura, proveniente de um rearranjo dos grãos devido à conformação da rosca.

Figura 29 – Regiões microestruturais do material da peça



Fonte: Autor (2017).

Continuação da Figura 29



Fonte: Autor (2017).

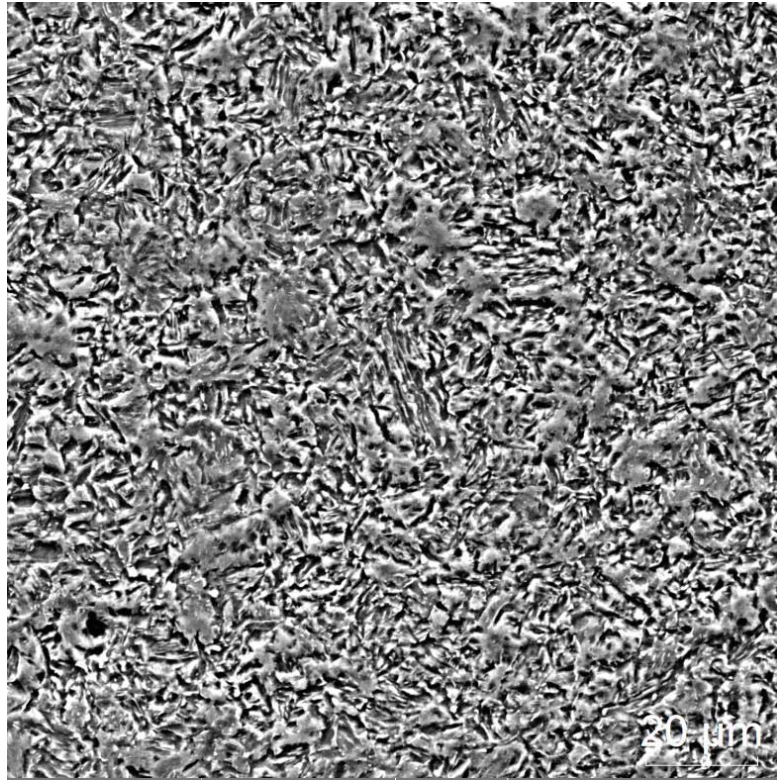
A sequência de imagens da Figura 29 apresenta as diferenças nas regiões microestruturais. A região RC apresentou um crescimento no tamanho de grão proveniente da recristalização, pois essa região se manteve exposta a um aporte térmico mais intenso e por mais tempo.

Na região de interface RR, onde o calor aportado foi de menor intensidade, ainda é possível observar uma recristalização da microestrutura, porém em RR tem-se um refino no tamanho do grão.

Já na região mais afastada do centro do furo, RB, pode-se perceber que o calor não exerceu influência sobre a microestrutura, pois os grãos se mantiveram no formato lamelar, característico do encruamento gerado durante a fabricação da matéria-prima.

Para a melhor observação das regiões da estrutura formada, foram realizadas análises utilizando-se um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A região RC obteve aumento no tamanho do grão, como mostra mais claramente a Figura 30.

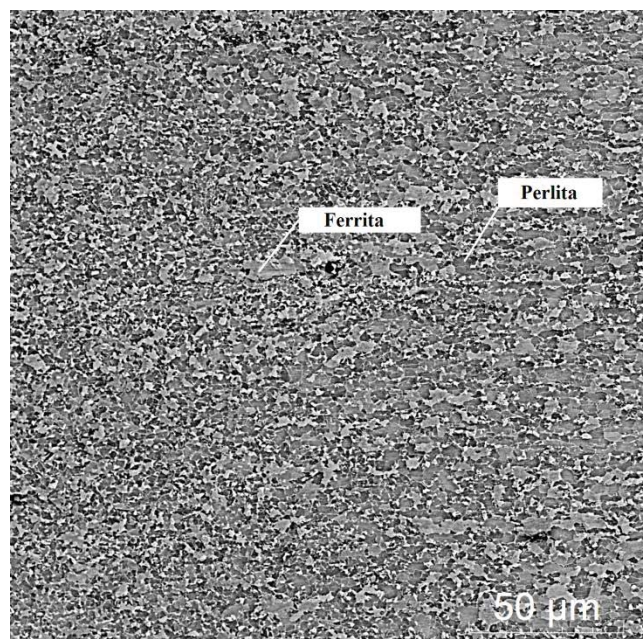
Figura 30 – Micrografia no MEV da região com crescimento de grão RC



Fonte: Autor (2017).

Já na micrografia da região RR, Figura 31, nota-se uma recristalização resultando em uma estrutura de grãos equiaxiais refinados.

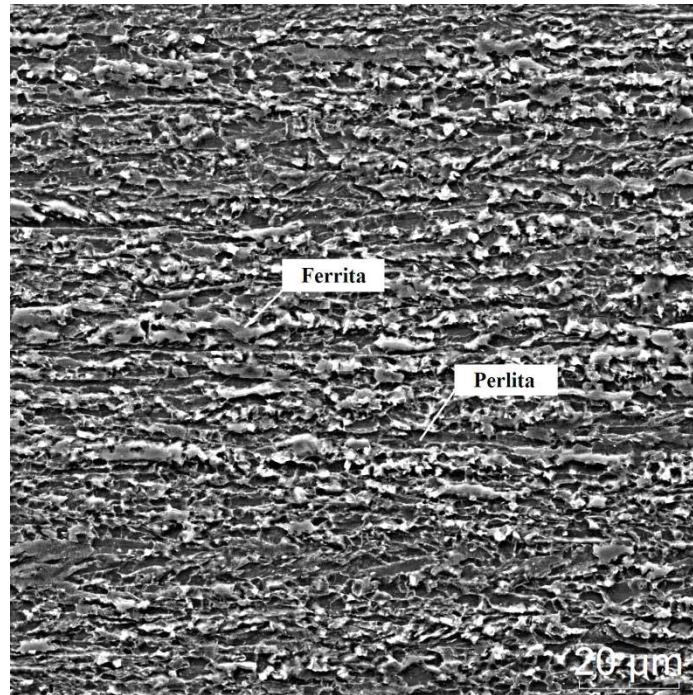
Figura 31 – Micrografia no MEV da região com refino de grão RR



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 32, pode ser observada a micrografia do material-base, sendo indicada a direção da laminação através da microestrutura que apresentou basicamente pequenos grãos de ferrita dispostos em lamelas na direção da laminação. Nota-se também a presença de perlita nas regiões mais escuras.

Figura 32 – Micrografia no MEV do material base RB

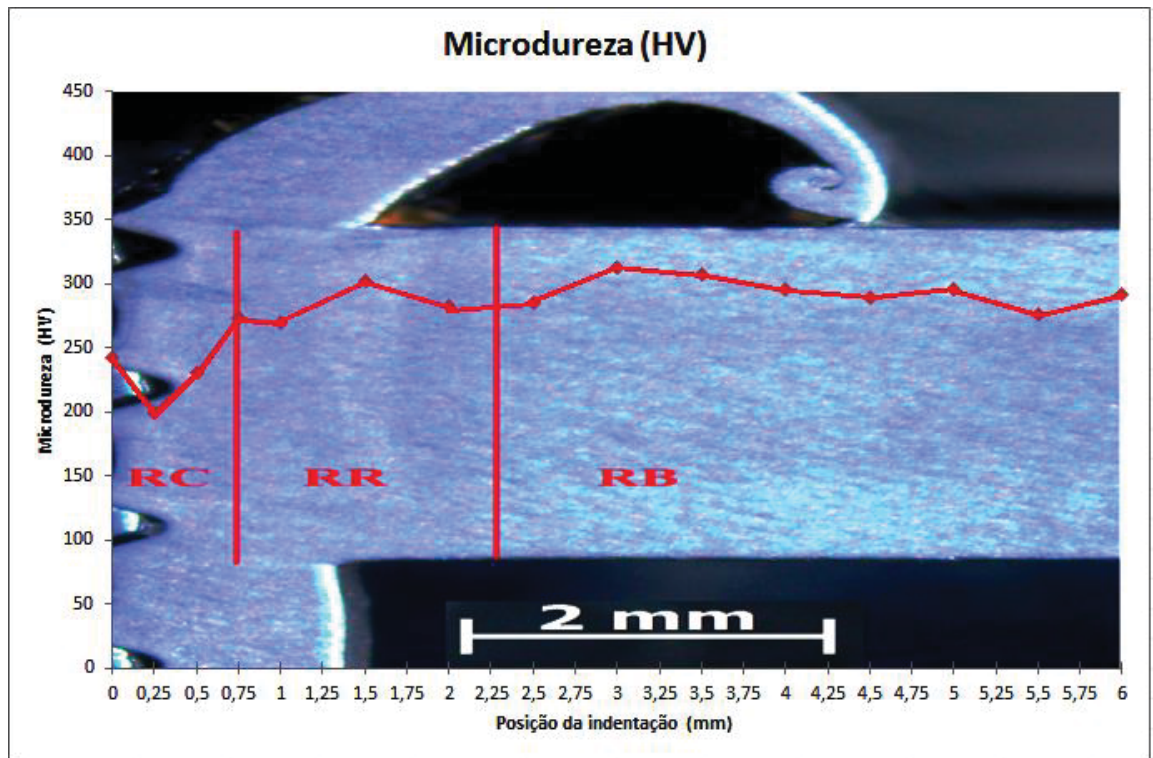


Fonte: Autor (2017).

4.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA

Alterações na microestrutura podem influenciar nas propriedades mecânicas do material. Para identificar possíveis modificações, avaliou-se a amostra através de ensaio de microdureza, partindo-se da borda do furo em direção ao material-base, as indentações foram feitas e, com os resultados coletados, foi possível traçar um gráfico (Figura 33) ilustrando o perfil formado.

Figura 33 – Perfil de microdureza partindo da extremidade do furo até material base



Fonte: Autor (2017).

Observa-se, na Figura 33, que a região mais próxima ao furo, a RC, sofreu uma redução na dureza, devido à alteração na microestrutura do material, que, segundo Alves (2009), tem a ver com a recristalização à qual o material é submetido em função do calor gerado no processo de furação por escoamento.

Ainda para Alves (2009), a recristalização da microestrutura, que implica o amolecimento do material, acontece a partir de 550°C. E a temperatura atingida durante o processo de furação chega a 800°C dependendo das condições de trabalho (LOPES, 1994).

À medida que as medições se distanciam da zona termicamente afetada (ZTA), a dureza vai aumentando, chegando a um pico na região RB.

Tabela 7 – Valores das microdurezas e suas regiões

Dureza/Região	RC (HV)	RR (HV)	RB (HV)
Média	230	283	296
Desvio padrão	17,7	15,2	11,0

Fonte: Autor (2017).

A Tabela 7 mostra valores médios das microdurezas encontradas, podendo observar-se que existe uma grande diferença na variação desses valores, o que induz a uma mudança nas propriedades mecânicas do material-base em relação ao material recristalizado na ZTA.

4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Os resultados dos ensaios de tração de arranque do parafuso estão representados na Tabela 8. A segunda coluna da tabela representa os valores das cargas em que começa o escoamento do material, sendo possível observar que os valores se mantiveram dentro de um erro de 1,88%, resultando em uma média de 32,1 kN.

Já na segunda coluna têm-se valores da carga máxima, em que ocorreu a ruptura dos filetes de rosca, e a média resultante dos ensaios foi de aproximadamente 48,9 kN. Nesse caso, a variação dos resultados foi maior, apresentando um erro de aproximadamente 4 %.

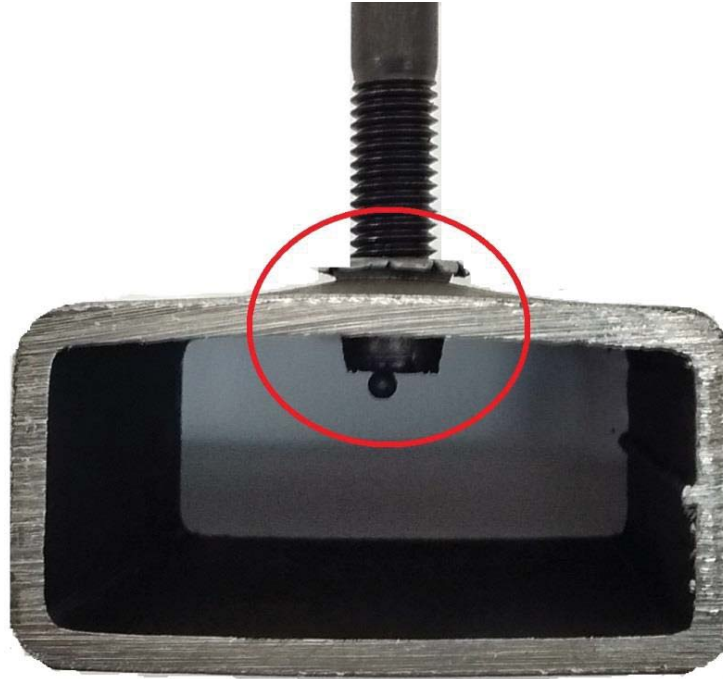
Tabela 8 – Resultados dos ensaios de tração

Ensaio de tração (Arranque do Parafuso)		
Amostra	Carga de escoamento (kN)	Carga máxima
1	33,1	50,3
2	31,2	47,1
3	32,5	46,4
4	32	50
5	31,9	50,7
Média	32,1	48,9
Desvio Padrão	0,63	1,78

Fonte: Autor (2017).

Todas as amostras romperam na rosca do furo, como era de se esperar, uma vez que ela transmite toda a carga aplicada e é agravada pela redução da resistência devido à recristalização oriunda do processo de furação. A Figura 34 mostra a falha na região da bucha escoada.

Figura 34 – Corpo de prova após fratura por tração



Fonte: Autor (2017).

Observou-se uma grande deformação plástica nas proximidades do furo, mantendo um raio de aproximadamente 18 mm do centro. Essa deformação se conteve à medida que se aproxima das laterais e das extremidades longitudinais do CP, como pode ser visto no detalhe da Figura 38.

4.5 ENSAIO DE FADIGA

No ensaio de fadiga foi aplicada carga de 19,2 kN a uma frequência de 4 Hz e obtiveram-se os números de ciclos de acordo com a Tabela 9. Os testes resultaram em uma média de 12500 ciclos até a falha do corpo de prova. Pode-se perceber uma variação nos valores resultantes para as amostras ensaiadas, sendo que o erro foi de 16,6 % de acordo com o desvio padrão.

Isso é resultado de uma série de fatores que influenciam na resistência à fadiga do corpo de prova, entre os quais podem estar tensões residuais na região do furo, rugosidade superficial da rosca, aparições de microtrincas provenientes dos processos, entre outros (PIZZIO, 2005).

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de fadiga

Ensaio de Fadiga	
Amostra	Número de ciclos
1	14753
2	10996
3	10419
4	12500
5	14890
Média	12500
Desvio Padrão	2071,0

Fonte: Autor (2017).

A Figura 35 ilustra, de maneira geral, a fratura ocorrida nos corpos de prova submetidos à fadiga. Verifica-se que a fratura se dá pela propagação de trincas nas extremidades do furo, característica muito típica da fratura por fadiga, ao invés da ruptura dos filetes de rosca como acontece no ensaio de tração.

Figura 35 – Corpo de prova após fratura por fadiga



Fonte: Autor (2017).

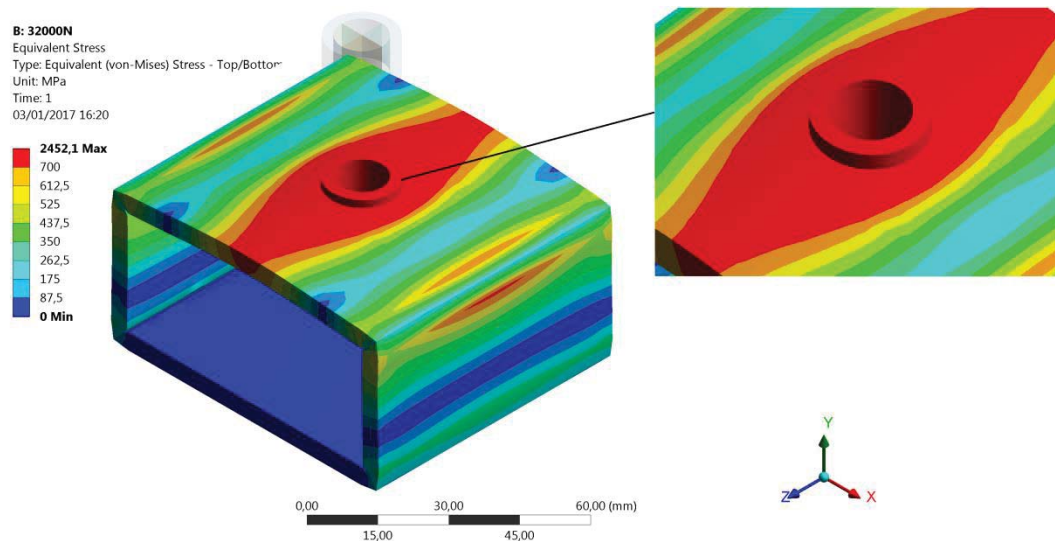
4.6 ANÁLISE NUMÉRICA

A Figura 36 mostra uma visão ampla da distribuição da tensão de Von Mises no tubo, sendo que a região representada pela cor vermelha está acima dos 700 MPa, o que implica a deformação plástica do material. Nesse caso, valores de tensões acima do limite de escoamento não são verdadeiras, pois, como já comentado, trata-se de uma análise linear. Porém, é cabível

aceitar que essas regiões falharam, pois atingiram o valor máximo de tensão suportado pelo material dentro do regime elástico.

Para essa análise foi considerada a média das cargas de escoamentos obtidos nos ensaios de tração (Tabela 8). A distribuição de tensões encontrada no modelo representa uma resistência muito menor que a encontrado nos testes ensaiados. Acredita-se que tal diferença ocorreu devido a possíveis deformações plásticas nos filetes de rosca antes dos 32 kN, indicados nos testes.

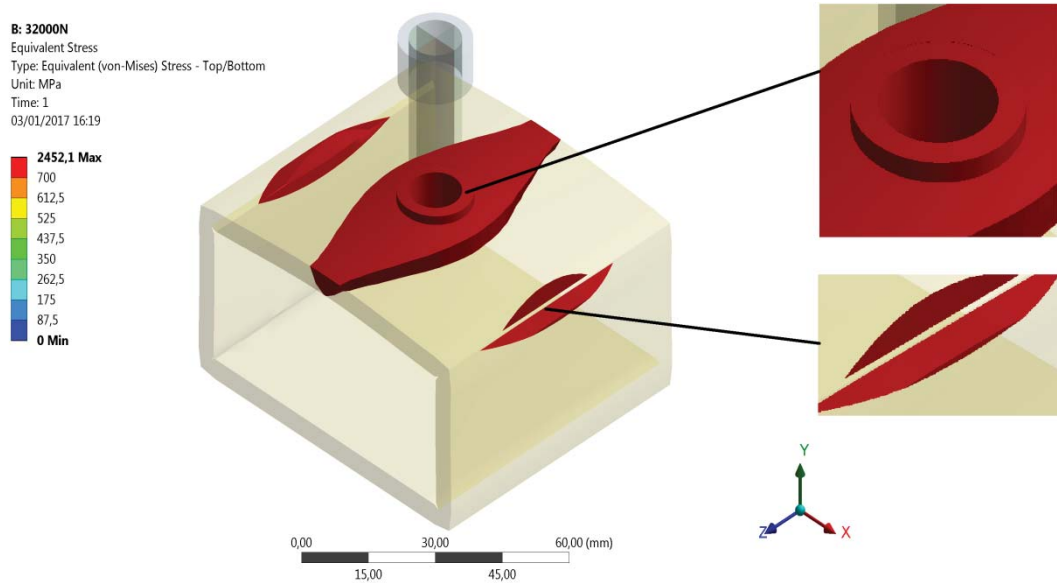
Figura 36 – Distribuições das tensões de Von Mises no tubo



Fonte: Autor (2017).

A Figura 37 representa, de forma mais clara, as regiões submetidas a tensões superiores ao limite de escoamento 700MPa. É possível verificar que não só o centro do furo sofreu deformações plásticas, mas também as laterais, nos raios de dobras de conformação do tubo.

Figura 37 – Regiões com tensão acima de 700MPa

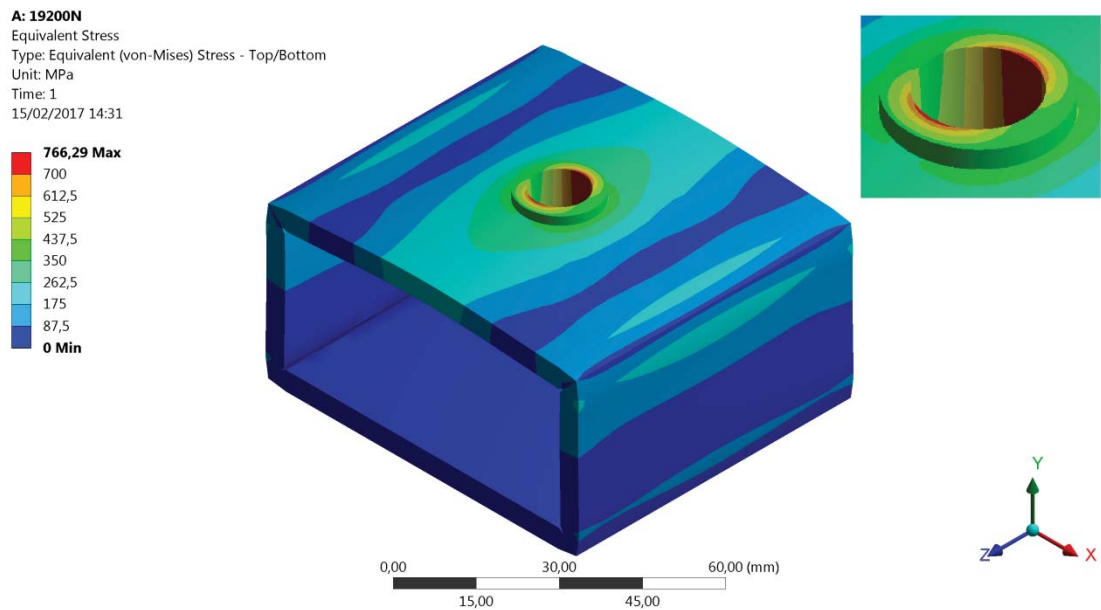


Fonte: Autor (2017).

Essa diferença dos resultados entre o modelo e os ensaios pode ser explicada pelo fato de que a carga aplicada na análise foi obtida através do ensaio de tração como sendo o limite de escoamento, como pode ser visto nos gráficos do Anexo B. Essa leitura, entretanto, não implica que outras regiões do CP não tenham sofrido deformações plásticas antes dos filetes de rosca.

Uma nova análise considerando todas as condições já utilizadas foi realizada, e a única alteração ocorreu no carregamento aplicado, que foi reduzido para 10 kN. A Figura 38 mostra como seria o comportamento ideal esperado do modelo, apresentando uma tensão acima dos 700 MPa apenas em uma pequena região do furo.

Figura 38 – Distribuição das tensões de Von Mises com carga de 10kN



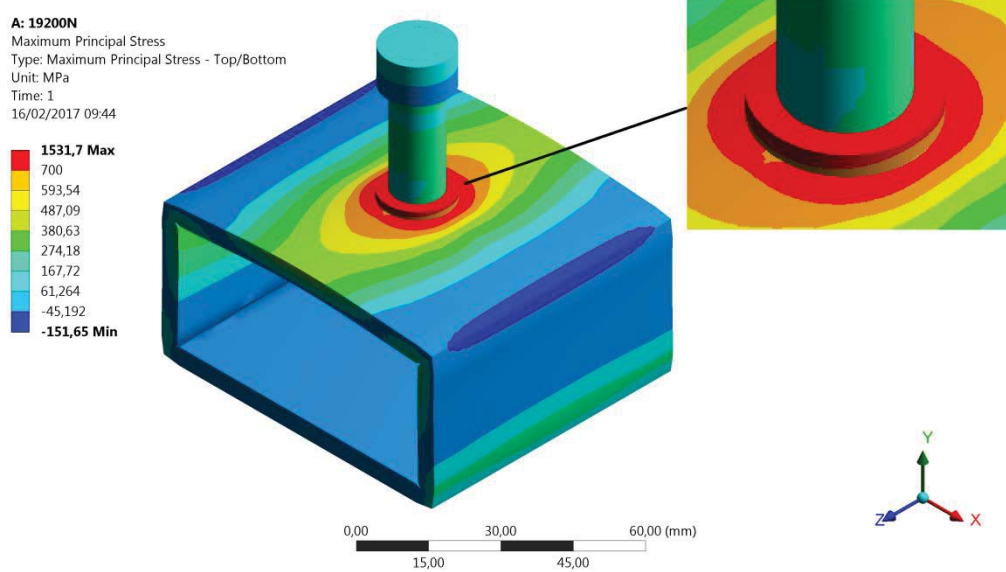
Fonte: Autor (2017).

Como mostra o modelo, a partir do carregamento de 10 kN, a região que representa os filetes de rosca deixam o regime elástico e passam a deformar-se plasticamente, o que leva a acreditar que os valores determinados para o limite de escoamento nos ensaios possivelmente não condizem com a realidade.

4.7 ANÁLISE DE FADIGA

Os resultados de tensão e deformação provenientes da análise numérica são utilizados pelo programa Ansys, juntamente com a curva S-N fornecida por Esmelindro (2015), para prever a distribuição da vida em fadiga à tensão máxima principal, utilizando o critério de Goodman. A Figura 39 ilustra a tensão distribuída que o programa utiliza junto com o módulo de análise da fadiga ANSYS FE-Fatigue.

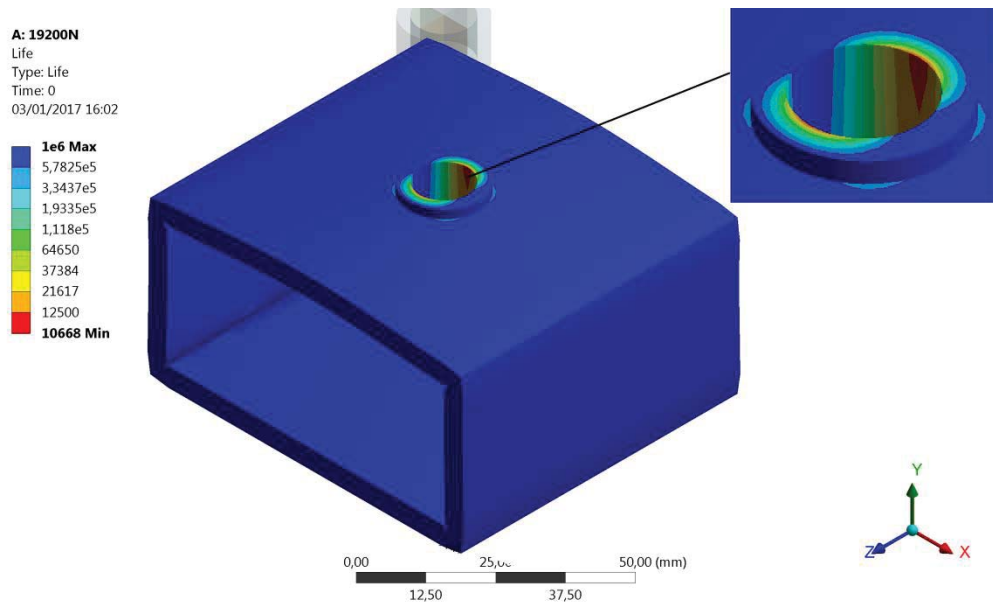
Figura 39 – Distribuição da tensão máxima principal



Fonte: Autor (2017).

Os resultados da análise de fadiga estão representados na figuras 40 e 41, nas quais se observa o número de ciclos de vida em fadiga resultantes para o modelo proposto. Na análise de fadiga o valor da carga flutuante aplicada foi de 60 % da carga de escoamento obtido no ensaio de tração, cujo valor é 19,2 kN.

Figura 40 – Distribuição da vida em fadiga do modelo

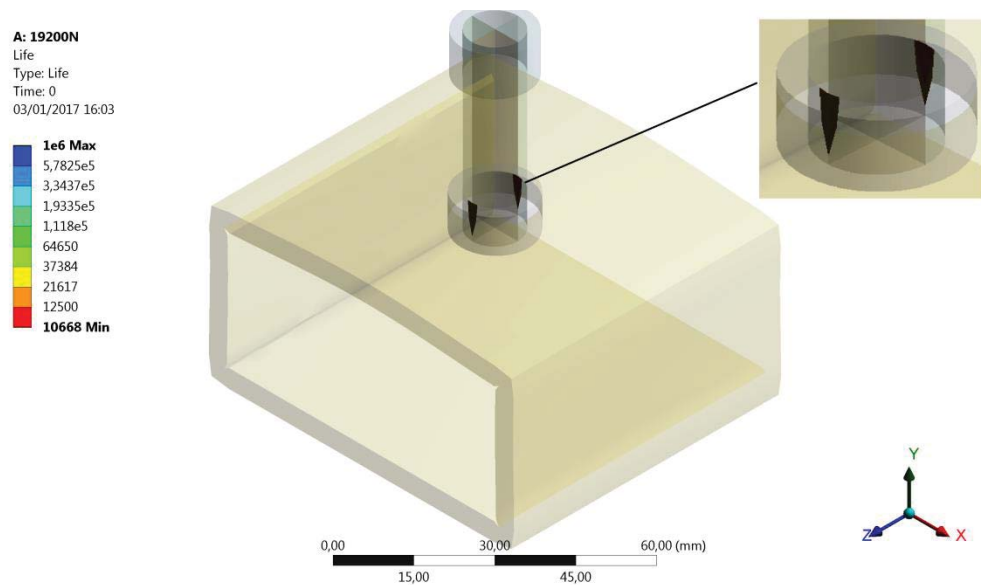


Fonte: Autor (2017).

Observou-se que o modelo apresentou resultados de resistência à fadiga muito próximos aos encontrados nos ensaios práticos. E, pela Figura 41, é possível identificar uma pequena região na cor vermelha na qual o número de ciclos é menor que os 12500 registrados na tabela 8.

Através da análise foi possível identificar o ponto onde possivelmente ocorre o início da propagação da trinca, sendo que é passível de aceitar que o ponto de maior tensão está destinado a uma menor vida.

Figura 41 – Regiões com números de ciclos menores que o experimental

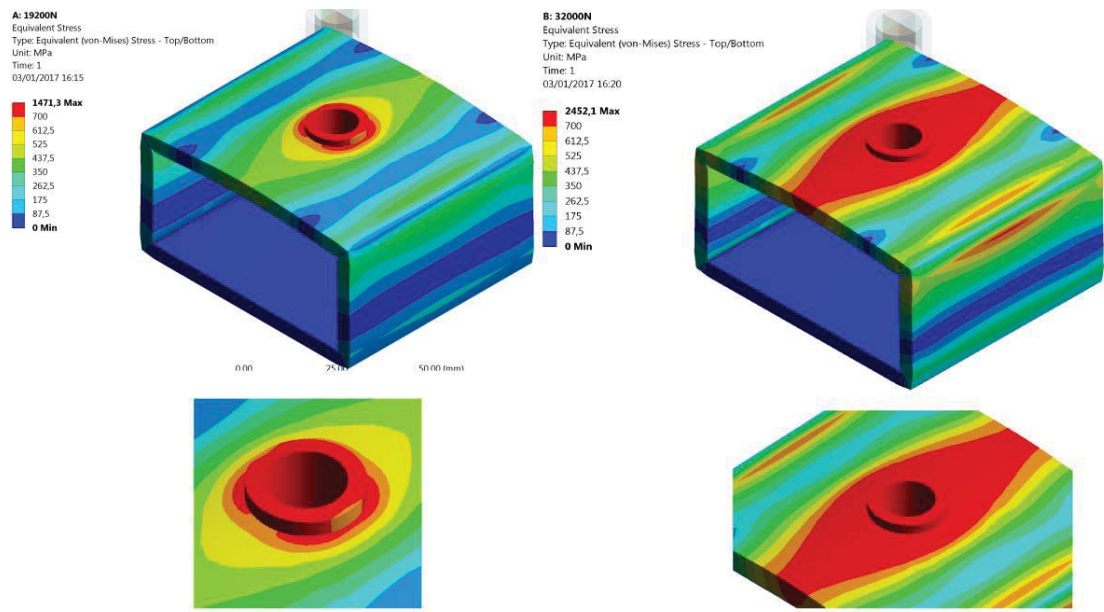


Fonte: Autor (2017).

Com a análise de fadiga, foi possível deixar mais clara a hipótese mencionada no item anterior em que as leituras das cargas de escoamento dos ensaios de tração não são verdadeiras, pois, quando reduzida a carga em 40% na análise de fadiga, o modelo apresentou um resultado muito próximo com a realidade. Possivelmente exista uma deformação plástica em regiões do CP antes da identificação do patamar de escoamento descrito nos ensaios de tração, que deixa de ter influência quando reduzida a carga.

A Figura 42 apresenta uma comparação entre as tensões Von Mises nos carregamentos de 19,2 e 32 kN, em que se identificou uma grande redução nas tensões distribuídas acima de 700MPa (regiões em vermelho).

Figura 42 – Distribuição de tensões com carregamentos de 19,2kN e 32 kN



Fonte: Autor (2017).

5 CONCLUSÕES

Com o estudo realizado foi possível avaliar, de forma teórica experimental, um modelo proposto de análise numérica, utilizando-se o método dos elementos finitos para a simulação do comportamento mecânico, de uma união parafusada, furadas pelo processo não convencional de furação por escoamento. E, da mesma forma, avaliar quais as possíveis influências do processo sobre os resultados. Assim, concluiu-se que:

- a) Nos ensaios de micrografia, foi possível verificar significativa alteração microestrutural na região próxima do furo na ZTA, em relação ao material-base. Essa alteração ocorre devido à recristalização dos grãos provenientes do aporte térmico gerado durante a furação. Em consequência dessa recristalização, a dureza sofreu uma redução nas regiões internas do furo, o que implica uma queda na resistência mecânica do material.
- b) Quando comparados os resultados dos ensaios de tração em relação aos valores de tensões obtidos através da análise numérica, verificou-se que não há condições para validar o modelo proposto. Isso porque os parâmetros de comparação levaram em consideração as tensões de limite de escoamento do material, uma vez que não se pode afirmar que a identificação das cargas de escoamentos obtidos nos ensaios de tração é verdadeira.
- c) Na análise de fadiga, os resultados foram mais satisfatórios, e a redução do carregamento indica que as possíveis deformações plásticas ocorridas no ensaio tração deixam de ter influência, sendo que a distribuição da resistência à fadiga do modelo proposto foi muito semelhante quando comparada com os valores encontrados nos testes práticos. Apenas uma pequena região apresentou um número menor que 12500 ciclos encontrados nos ensaios, região essa que indica a possibilidade de início da propagação da trinca.
- d) A alteração da microestrutura do material não apresenta influência significativa esperada sobre os resultados do modelo proposto no trabalho na análise de fadiga. Apesar de não se chegar a uma conclusão palpável quanto à utilização do modelo para a análise das tensões, os resultados foram satisfatórios e conclusivos na análise de fadiga.

O modelo proposto é, portanto, de viável aplicação para cálculo de estruturas submetidas à vida sob fadiga para as condições impostas no modelo, uma vez que o confronto dos resultados realizados na pesquisa torna sua aplicação confiável na indústria.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A utilização de um modelo de análise estrutural utilizando o MEF, que represente a realidade com resultados confiáveis do ponto de vista prático, depende de vários fatores a serem estudados. A seguir, alguns aspectos que devem ser considerados em trabalhos futuros:

- a) Utilização da extensometria para identificar as deformações nos pontos críticos do corpo de prova, possibilitando uma comparação real de tensões;
- b) Aplicação de um modelo considerando o regime de deformação plástica do material, com mudança do conceito do problema e utilização de uma análise não linear;
- c) Modificação da geometria na região da bucha, considerando o formato original formado no processo de fabricação e utilizando elementos sólidos;
- d) Variação nos parâmetros de conformação do furo para tornar as condições mais severas, influenciando ainda mais nas propriedades do material.

REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, A. **Elementos Finitos a base da Tecnologia CAE**. 6. ed. São Paulo: Érica, 2014.
- ALVES, G. G. **Recristalização do Aço ARBL Microligado ao nióbio CSN2336**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade de São Paulo. LORENA. 2009.
- AZEVEDO, Á. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. Porto: Universidade do Porto, 2003.
- BOOPATHI, M. et al. Experimental Investigation of Friction Drilling on Brass, Aluminium and Stainless Steel. **Procedia Engineering**, v. 64 2013. 1219-1226.
- BORESI, A. P.; SCHMIDT, R. J. **Advanced Mechanics of Materials**. 6. ed. New York: JOHN WILEY & SONS, INC., 2003.
- CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CASTRO, C. A. C. **Estudo do Comportamento à Fadiga de Metais Dentro e Fora da Água na Presença da Pressão Hidrostática**. Tese de Doutorado em Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2007.
- ECKHARDT, M. **Relação entre processo, microestrutura e propriedades mecânicas na furação por escoamento de aços de baixo carbono**. Tese de Doutorado em Engenharia da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2003.
- ESMELINDRO, O. M. D. O. **Comportamento da vida em fadiga de junta soldada do aço LN-700**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. 2015.
- FILHO, O. C. D. **Estudo Microestrutural e de Capacidade de Carga na Furação por Escoamento com Condições de Trabalho Variáveis Durante o Processo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal de Santa Catarina. FLORIANÓPOLIS. 1998.
- GORNI, A. A.; SILVEIRA, J. H. D. D.; REIS, J. S. S. Estudo avalia o desenvolvimento de chapas de aço com grão ultra-fino. **Corte e Conformação de metais**, v. 3, n. 27, 2007. 78-105.
- HOSFORD, W. F. **Mechanical Behavior of Materials**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- JÚNIOR, E. H. **Investigação Experimental do Comportamento Dúctil de Aços API-X70 e Aplicação das Curvas de Resistência para Previsão de Colapso em Dutos**. Tese de Doutorado em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.
- KOU, S. **Welding Metallurgy**. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.

LOPES, J. C. O. **Furação por escoamento e rosqueamento por laminação**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1994.

MILLER, S. F.; BLAU, P. J.; SHIH, A. J. Microstructural Alterations Associated With Friction Drilling of Steel, Aluminum, and Titanium. **ASM International**, v. 14 2005. 647-653.

NATHAN, S. R. et al. Effect of welding processes on mechanical and microstructural. **Defence Technology**, V.38, N.3, 2015. 308-317.

PASINATO, R. **Caracterização do processo de furação por fricção do aço ln 700**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo. 2015.

PIZZIO, É. **Avaliação da Vida em Fadiga de Uniãoes Parafusadas**. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. PORTO ALEGRE. 2005.

ROOS, L. A.; TUNERMANN, H. **Análise comparativa em aço LN 700 de rosca em dois processos distintos: furação com broca e por escoamento a seco**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2015.

SAKATA, K.; MATSUOKA, S.; SATO, K. Highly Formable Sheet Steels for Automobile. **Kawasaki Steel Technical Report**, n. 48, p. 3-8, March 2003.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7. ed. São Paulo: ARTMED, 2008.

SHOW, B. K. et al. Effect of vanadium and titanium modification on the microstructure and. **Materials Science and Engineering A**, v. 527, n. 6 2010. 1595-1604.

SILVA, M. D. C. **Determinação Experimental da Tenacidade a Fratura da Zona Termicamente Afetada de Junta Soldada de Aço API 5L X80**. Tese de Doutorado em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

SSAB TUNNPLANT. DOMEX 700MC - Hot rolled, extra high strength, cold forming steel. **Domex High Strength Steel**, 2003.

TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Teoria da Elasticidade**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

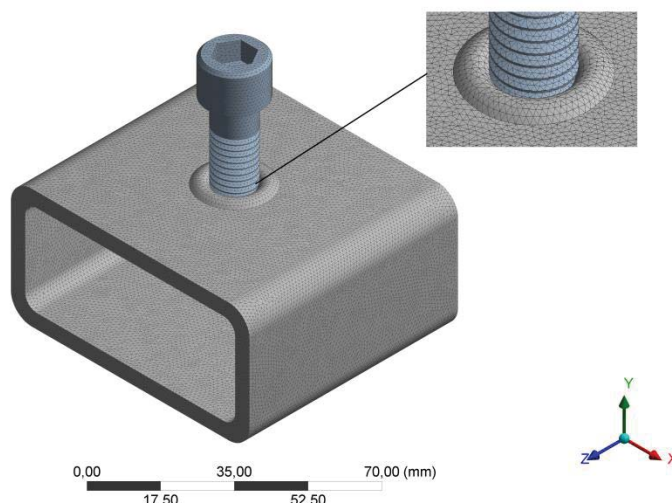
WEINGAERTNER, W. L.; OLIVEIRA, C. A. S. D.; ECKHARDT, M. EVOLUÇÃO DA CINEMÁTICA DA FURAÇÃO POR ESCOAMENTO. **Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica**, 1999.

APÊNDICE A – Análise numérica com geometria original do CP

A partir da geometria original do corpo de prova, foi possível realizar uma análise considerando como um sólido, para a discretização do modelo de elemento finitos através da geração da malha que está representada na Figura 43. Utilizou-se o elemento “HEX20”, totalizando 1024078 de nós e 703534 elementos.

As condições de carregamentos e restrições são as mesmas descritas no item 3.8, sendo aplicado uma carga de 19,2 kN para a análise de fadiga e 32 kN para a análise das tensões. Sendo assim, a restrição utilizada foi “Fixed Support”, visto que este recurso restringe o movimento do corpo nas direções X, Y, Z evitando qualquer movimento de corpo rígido.

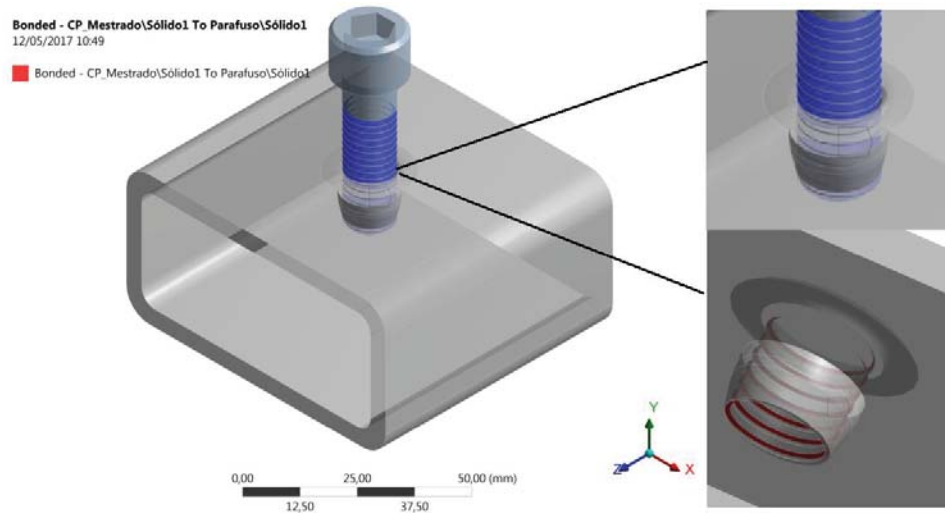
Figura 43 – Malha de elementos finitos para a geometria original



Fonte: Autor (2017).

A Figura 44 representa os contatos aplicados entre peça-parafuso. Esse contato é do tipo “Bonded”, representando que as superfícies selecionadas estão coladas entre si, restringindo o movimento em todas as direções.

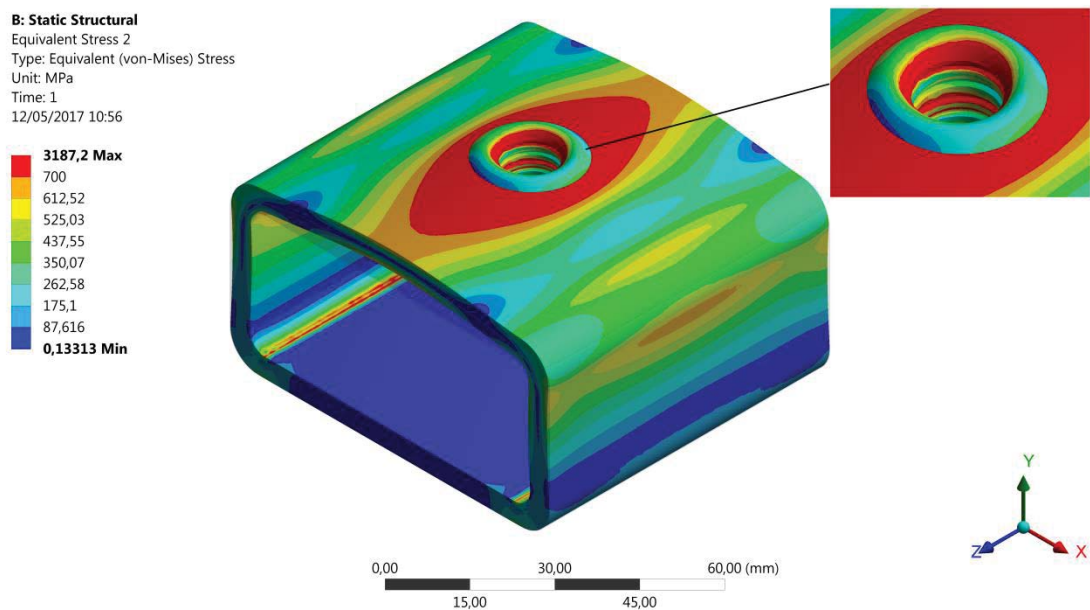
Figura 44 – Contatos aplicados entre peça-parafuso



Fonte: Autor (2017).

Na Figura 45, é possível ver a distribuição das tensões de Von Mises ao longo do tubo para o carregamento de 32 kN. A cor vermelha representa regiões com tensões acima de 700 Mpa. Quando comparadas às tensões apresentadas na Figura 36, pode-se perceber uma conformidade nos resultados, sendo os filetes de rosca as áreas mais solicitadas pelo carregamento, distribuindo para as áreas periféricas do furo.

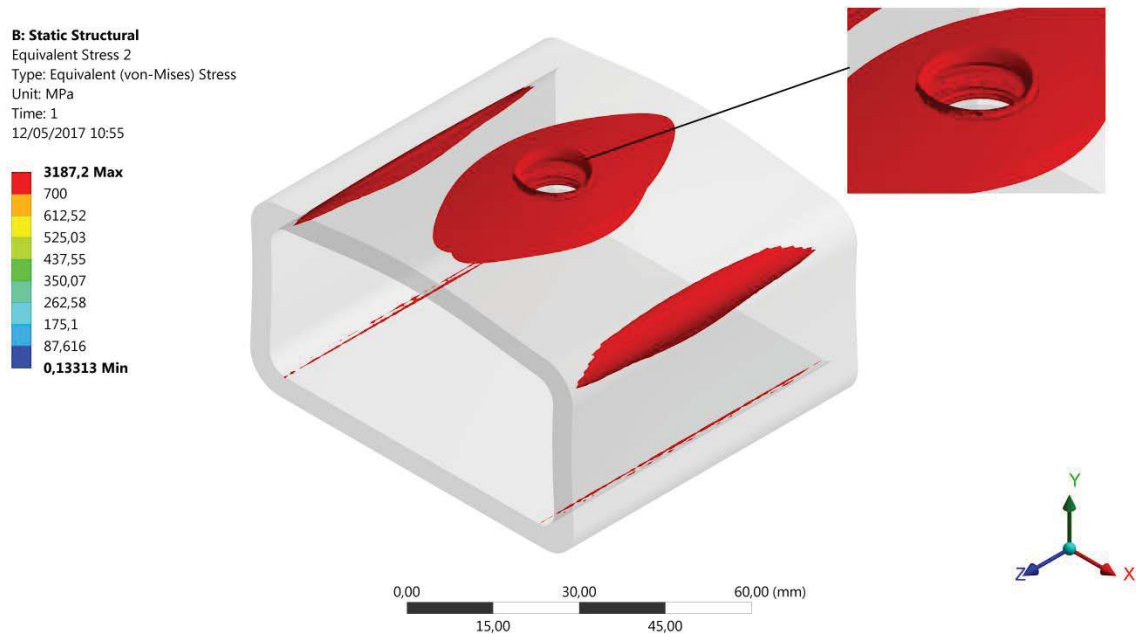
Figura 45 – Distribuições das tensões de Von Mises no tubo com geometria original



Fonte: Autor (2017).

A Figura 46 apresenta de forma mais clara as regiões com tensões acima de 700 Mpa, que estão representadas na cor vermelha. Como se pode perceber, essas regiões são similares às encontradas na análise feita com a geometria simplificada conforme a figura 37.

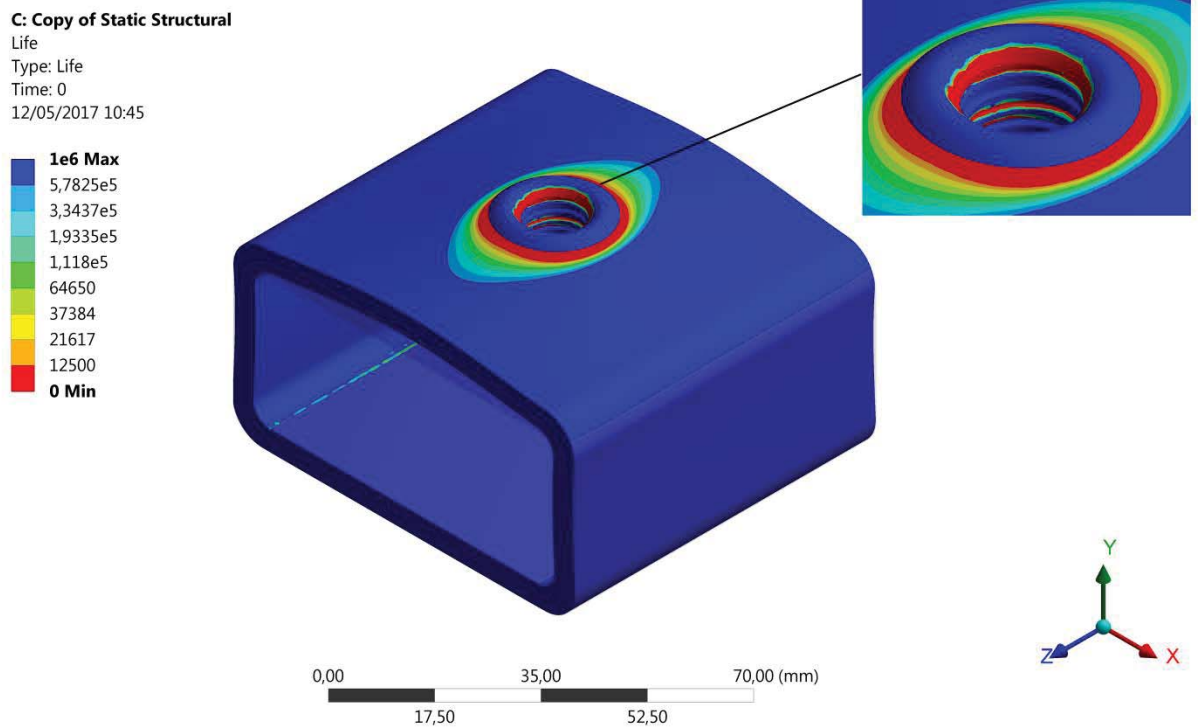
Figura 46 – Regiões com tensão acima de 700MPa



Fonte: Autor (2017).

A Figura 47 apresenta a distribuição de resistência à fadiga do tubo, na qual é possível identificar que, como na Figura 40, a região próxima ao furo está submetida a um número inferior a 12500 ciclos.

Figura 47 – Distribuição da vida em fadiga do modelo original

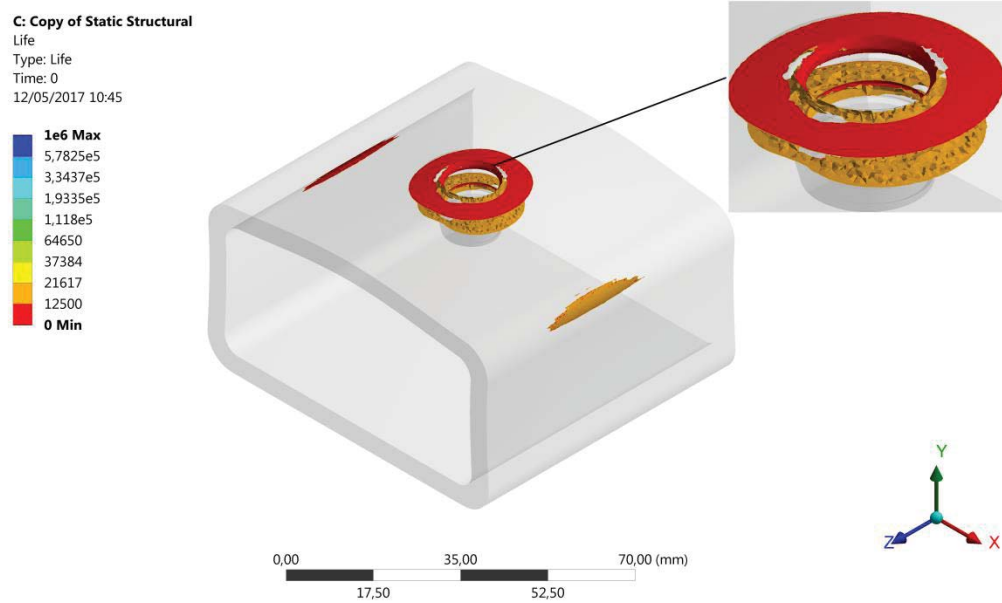


Fonte: Autor (2017).

Como estamos trabalhando com elemento sólido, a distribuição de tensão se dá em cada elemento do modelo ao longo da espessura do tubo, diferentemente do elemento de casca utilizado na análise do item 3.8. A tensão utilizada pelo elemento de casca, para plotar a distribuição dos ciclos, leva em consideração as tensões máximas principais do elemento. Sendo assim, é possível que haja alguma diferença nos resultados dos números de ciclos.

Essa diferença pode ser vista na Figura 48, onde apenas uma pequena região dos filetes de rosca e algumas áreas superficiais estão submetidas a ciclos inferiores a 12500.

Figura 48 – Regiões com números de ciclos menores que o experimental

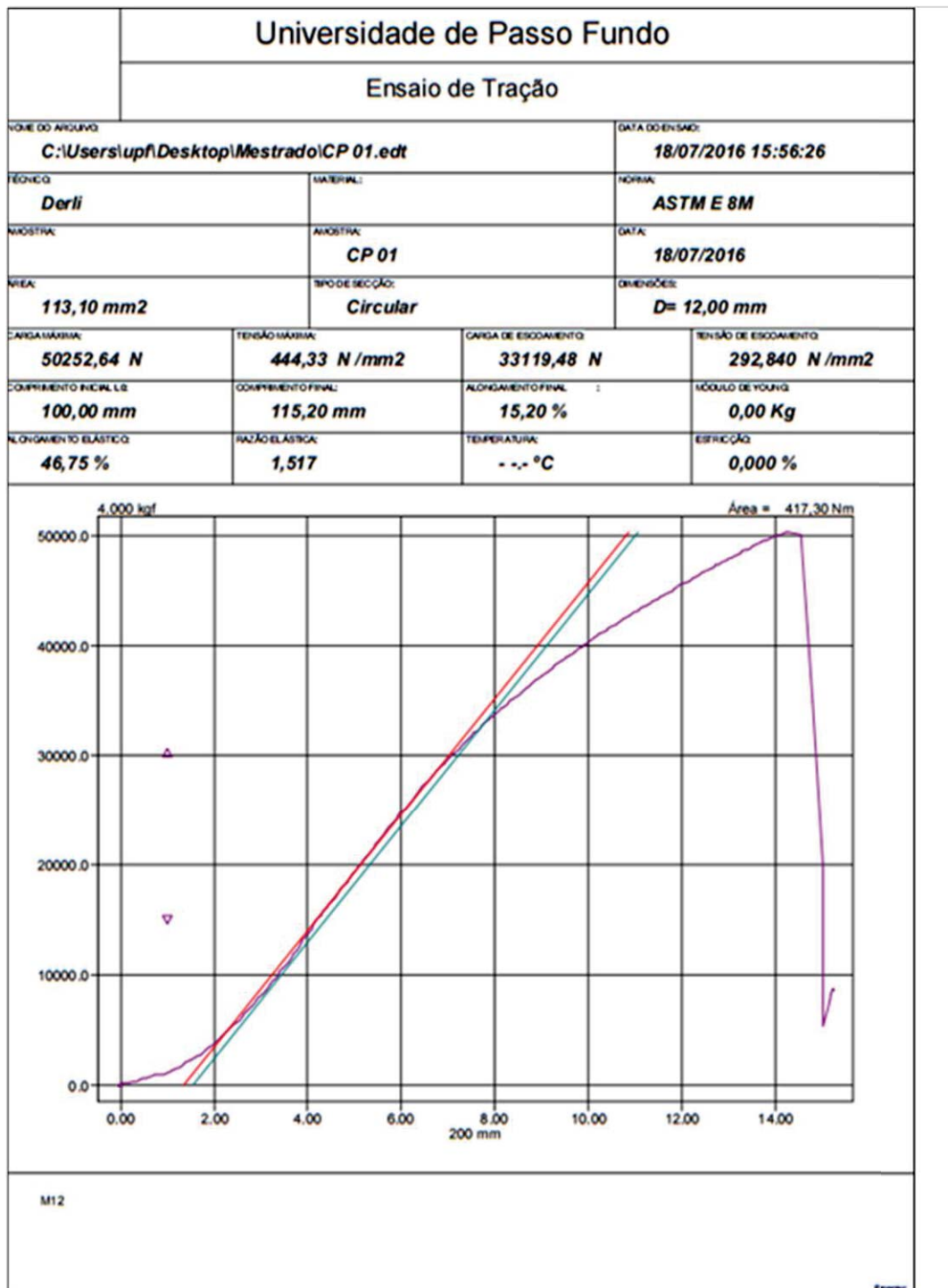


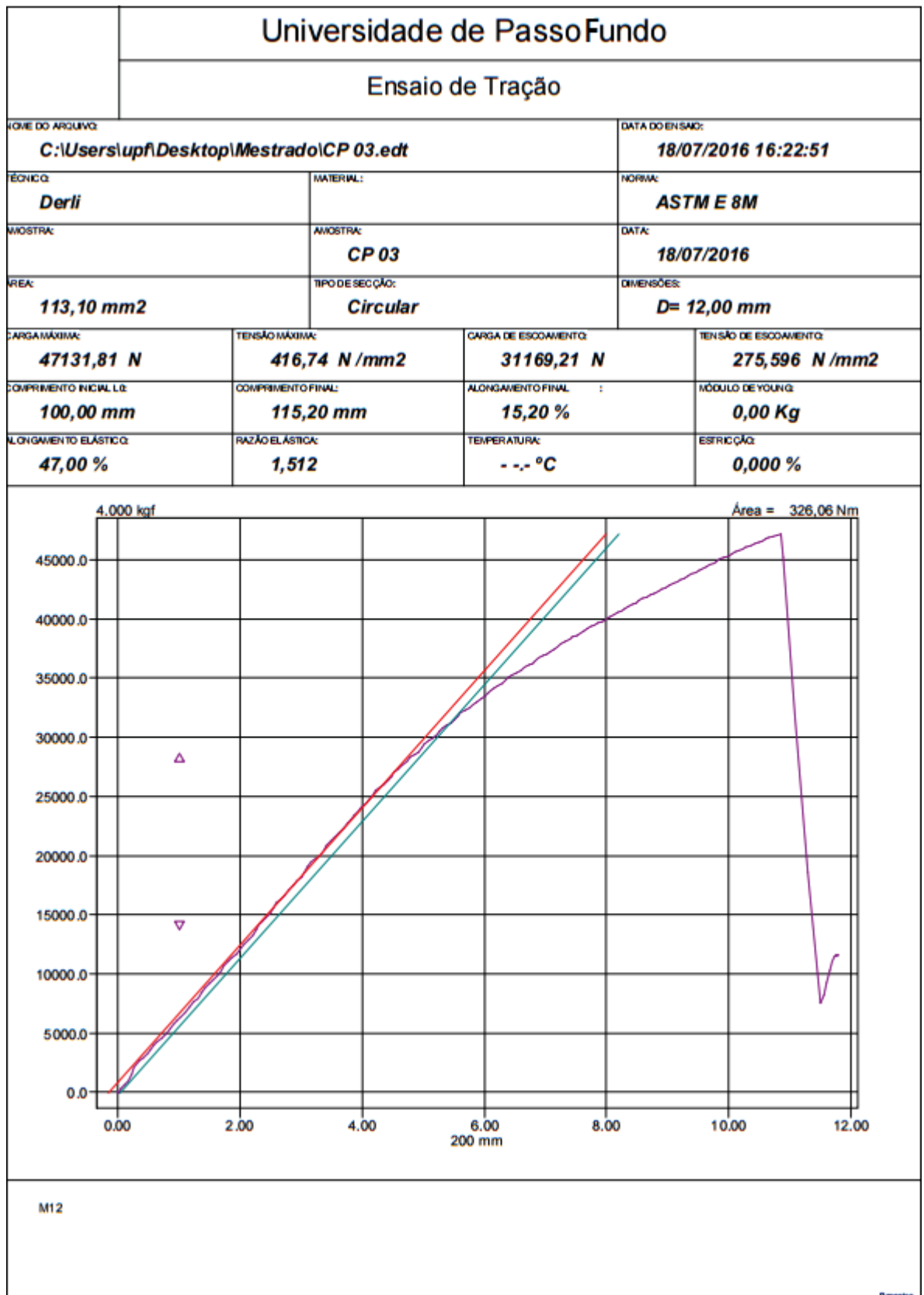
Fonte: Autor (2017).

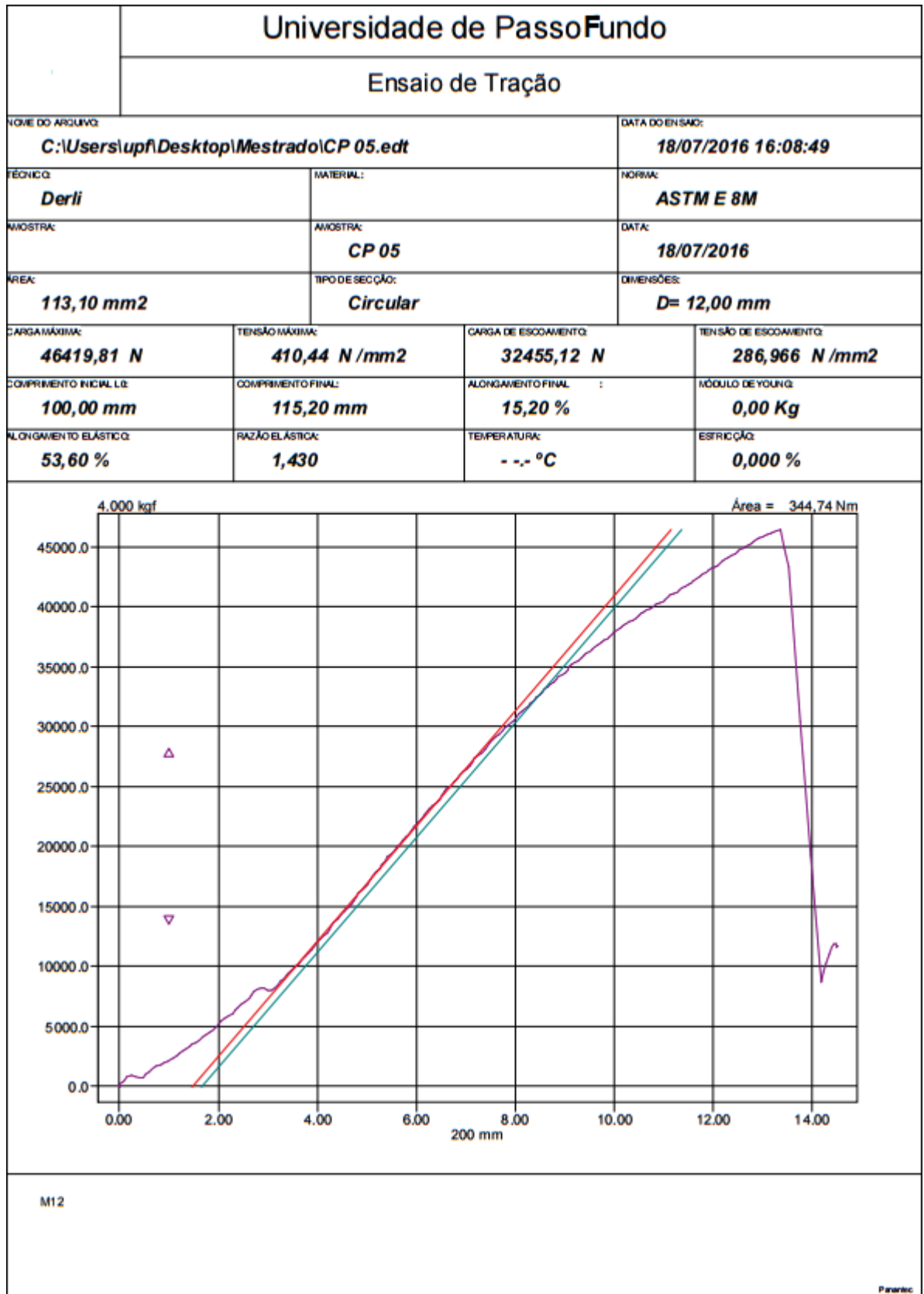
É possível identificar uma diferença na distribuição de tensões e números de ciclos na região da bucha, principalmente no sentido longitudinal. A espessura do tubo, para os modelos estudados, é dada principalmente pela simplificação feita na geometria proposta no estudo e, em consequência desta, o elemento utilizado para a representação numérica.

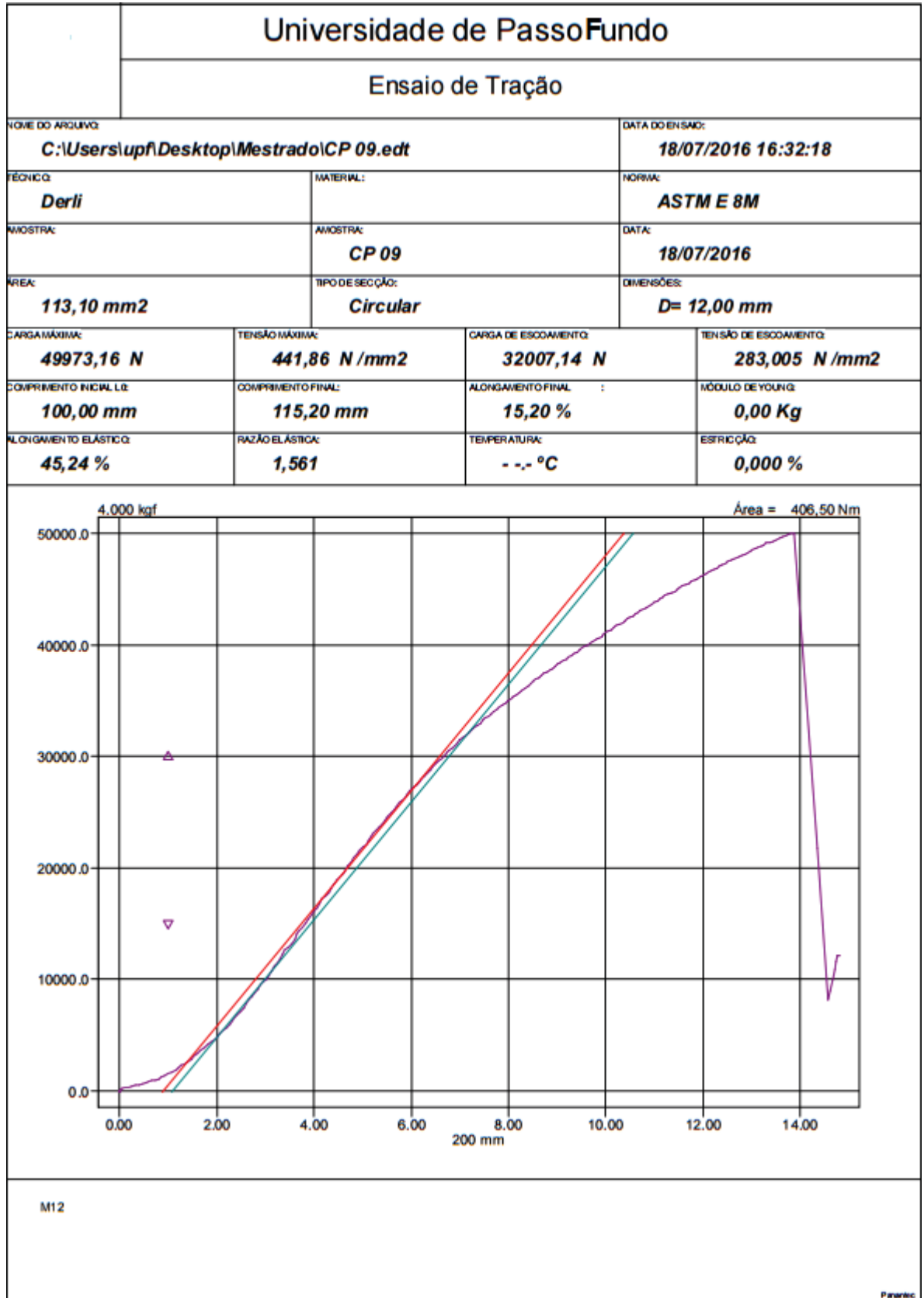
Essa diferença, porém, é irrelevante quando avaliado que, para a análise de tensões, os dois modelos apresentam falhas por escoamento antes dos 32 kN, e na análise de fadiga, quando comparados, os resultados foram satisfatórios e coerentes com os ensaios.

APÊNDICE B – Gráficos dos ensaios de tração (arranque do parafuso)









Universidade de Passo Fundo			
Ensaio de Tração			
NOME DO ARQUIVO: C:\Users\upf\Desktop\Mestrado\CP 10.edt		DATA DO ENSAIO: 18/07/2016 16:39:35	
TÉCNICO: Derli	MATERIAL:	NORMA: ASTM E 8M	
AMOSTRA:	AMOSTRA: CP 10	DATA: 18/07/2016	
ÁREA: 113,10 mm²	TIPO DE SECÇÃO: Circular	DIMENSÕES: D= 12,00 mm	
CARGA MÁXIMA: 50698,47 N	TENSÃO MÁXIMA: 448,27 N/mm²	CARGA DE ESCOAMENTO: 31880,63 N	TENSÃO DE ESCOAMENTO: 281,887 N/mm²
COMPRIMENTO INICIAL L ₀ : 100,00 mm	COMPRIMENTO FINAL: 115,20 mm	ALONGAMENTO FINAL : 15,20 %	MÓDULO DE YOUNG: 0,00 Kg
ALONGAMENTO ELÁSTICO: 44,08 %	RAZÃO ELÁSTICA: 1,590	TEMPERATURA: - - - °C	ESTRIBIÇÃO: 0,000 %
M12			
Parafuso			