

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AEROESPACIAL

VANESSA BATISTA

ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DE UMA ESTRUTURA EM C DE
PONTEADEIRA ESTACIONÁRIA DE CLINCHING

Joinville

2018

VANESSA BATISTA

ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DE UMA ESTRUTURA EM C DE
PONTEADEIRA ESTACIONÁRIA DE CLINCHING

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Aeroespacial do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Marcos Alves Rabelo.

Joinville

2018

VANESSA BATISTA

ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA DE UMA ESTRUTURA EM C DE
PONTEADEIRA ESTACIONÁRIA DE CLINCHING

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Aeroespacial, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 26 de junho de 2018.

Dra. Talita Sauter Possamai
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora:

Dr. Marcos Alves Rabelo
Orientador/Presidente

Dr. Andrea Piga Carboni
Membro

Dr. Modesto Hurtado Ferrer
Membro

AGRADECIMENTOS

À microempresa GPTech, por fornecer os projetos utilizados no estudo para o desenvolvimento deste trabalho e por auxiliar na elaboração da modelagem da estrutura.

Ao meu orientador Marcos Alves Rabelo, pela paciência, dedicação e por ter aceitado embarcar nesta jornada mesmo com o curto prazo para a elaboração do mesmo.

Aos meus amigos e familiares, principalmente aos meus padrinhos Maria dos Anjos e Vitor, por me apoiarem durante o decorrer da graduação inclusive na parte financeira.

A todos os demais contribuintes, diretos e indiretos, na realização deste trabalho.

RESUMO

A padronização de produtos e processos é fundamental para a indústria, onde a velocidade da produção e a qualidade dos produtos são indispensáveis. Em razão disso, o presente trabalho realiza um estudo do desenvolvimento de uma estrutura em C de ponteadeira estacionária de clinching que será fabricada pelo processo de fundição. O ferro fundido nodular FE 70002 é o material selecionado para substituir o aço SAE 1045 utilizado atualmente na confecção dessa peça. Uma nova geometria foi elaborada no programa SolidWorks visando às limitações de fixação do conjunto de acionamento hidropneumático e a deflexão máxima permitida para a centralização das ferramentas que garantam a formação e a qualidade do ponto de clinching. A estrutura foi confeccionada em dois tamanhos projetados para suportar 6 ton de carga e o suporte da ferramenta móvel. Uma análise estrutural estática foi realizada, nas geometrias criadas, por meio do programa Ansys Workbench que se baseia no método dos elementos finitos. Através dos resultados obtidos da simulação fez-se a comparação das configurações completas com estruturas em aço e ferro fundido, onde constata-se que o novo material será capaz de suprir as exigências estabelecidas no projeto. Uma análise da parte móvel do suporte da ferramenta foi efetuada via simulação e cálculo analítico para um estudo mais aprofundado dessa região, as soluções dos dois métodos foram comparadas e indicaram valores muito próximos.

Palavras-chave: Projeto. Ferro fundido nodular FE 70002. Método de elementos finitos. Deflexão máxima.

ABSTRACT

The standardization of products and processes is fundamental for the industry, where the speed of production and the quality of the products are indispensable. Therefore, the present work studies the development of a C-Frame of stationary clinching pointers that will be manufactured by the casting process. The nodular cast iron FE 70002 is the material selected to replace the SAE 1045 steel currently used in the manufacture of this part. A new geometry was elaborated in the SolidWorks program aiming at the limitations of hydropneumatic drive assembly fixation and the maximum allowable deflection for the centralization of tools that ensure the formation and quality of the clinching point. The structure was made in two sizes designed to support 6 ton of load and the support of the mobile tool. A static structural analysis was performed, in the created geometries, through the Ansys Workbench program that is based on the finite element method. Through the results obtained from the simulation, the complete configurations were compared with steel and cast iron structures, where it was verified that the new material will be able to meet the requirements established in the project. An analysis of the mobile part of the tool holder was carried out through simulation and analytical calculation for a more detailed study of this region, the solutions of the two methods were compared and indicated very close values.

Keywords: Project. Cast iron nodular FE 70002. Finite element method. Maximum deflection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ponteadeira estacionária de clinching da microempresa GPTech.....	17
Figura 2 – Classificação dos processos de fabricação.....	18
Figura 3 – Processos de fabricação segundo norma DIN 8580.....	20
Figura 4 – Fluxograma simplificado das operações básicas para a produção de uma peça fundida aplicadas à maioria dos processos de fundição.....	24
Figura 5 – Capacidade de amortecimento do ferro fundido em comparação com a do aço, pelo método de ensaio Foepl-Pertz.....	27
Figura 6 – Solução de problemas de engenharia.....	31
Figura 7 – Geometria, malha de elementos finitos e pontos nodais.....	32
Figura 8 – Tipos de Elementos.....	34
Figura 9 – Fluxograma da metodologia.....	38
Figura 10 – Junção das estruturas selecionadas para estudo.....	39
Figura 11 – Sobreposição das estruturas divididas por tamanho em três grupos.....	40
Figura 12 – Queixos fabricados pela GPTech e queixo modelo ECKOLD.....	41
Figura 13 – Estruturas em C desenvolvidas a partir do estudo das estruturas fabricadas.....	42
Figura 14 – Modelagem dos queixos móveis.....	43
Figura 15 – Discretização das geometrias desenvolvidas.....	45
Figura 16 – Condições de contorno aplicadas nas geometrias desenvolvidas.....	47
Figura 17 – Deflexão máxima admitida entre o conjunto de ferramentas de clinching.....	48
Figura 18 – Representação do cálculo do deslocamento máximo.....	48
Figura 19 – Discretização da parte móvel do queixo analisado separadamente.....	50
Figura 20 – Condições de contorno da parte móvel do queixo analisado separadamente.....	51
Figura 21 – Local da fixação e posição da força.....	51
Figura 22 – Deflexão da geometria média para os dois materiais considerados.....	55
Figura 23 – Deflexão da geometria pequena para os dois materiais considerados.....	56
Figura 24 – Comparação gráfica para a deflexão.....	57
Figura 25 – Deformação da geometria média para os dois materiais considerados.....	58
Figura 26 – Deformação da geometria pequena para os dois materiais considerados.....	59
Figura 27 – Comparação gráfica para a deformação.....	60
Figura 28 – Tensão de von Mises da geometria média para os dois materiais considerados...	61
Figura 29 – Tensão de von Mises da geometria pequena para os dois materiais considerados	62
Figura 30 – Comparação gráfica para a tensão.....	63

Figura 31 – Fator de segurança da geometria média para os dois materiais considerados	64
Figura 32 – Fator de segurança da geometria média para os dois materiais considerados	65
Figura 33 – Comparação gráfica para o fator de segurança	66
Figura 34 – Deflexão do suporte para a ferramenta	67
Figura 35 – Deformação do suporte para a ferramenta	67
Figura 36 – Tensão equivalente de von Mises do suporte para a ferramenta.....	68
Figura 37 – Fator de segurança do suporte para a ferramenta.....	68
Figura 38 – Comparação entre os resultados numéricos e analíticos	69
Figura 39 – Estruturas em C desenvolvidas	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais processos de fundição	22
Tabela 2 – Comparação das principais propriedades mecânicas e composição química dos ferros fundidos.....	26
Tabela 3 – Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT.....	28
Tabela 4 – Comparação entre os aços utilizados atualmente e o ferro fundido nodular selecionado	29
Tabela 5 – Comparação de preço entre o aço e o ferro fundido nodular.....	30
Tabela 6 – Propriedades dos materiais utilizados nas simulações.....	44
Tabela 7 – Dados da malha gerada para as geometrias na forma de montagem	46
Tabela 8 – Deslocamentos máximos permitidos	49
Tabela 9 – Dados da malha gerada para as geometrias na forma de montagem	50
Tabela 10 – Dados retirados do programa SolidWorks.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASMT – American Society for Testing and Materials

SAE – Society of Automotive Engineers

FE – Ferro Fundido Nodular

AISI – American Iron and Steel Institute

DIN – Deutsches Institut für Normung

$LRT_{min.}$ – Limite de Resistência à Tração mínima

$LE_{min.}$ – Limite de Escoamento mínimo (0,2%)

$Along_{min.}$ – Alongamento mínimo (5d)

MEF – Método dos Elementos Finitos

AEF – Análise de Elementos Finitos

NR 12 – Norma Reguladora 12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade
E	Módulo de elasticidade
ν	Coefficiente de Poisson
K	Módulo de compressibilidade
G	Módulo de cisalhamento
LE	Limite de escoamento
LRT	Limite de resistência à tração
θ	Ângulo de deflexão admitida entre o conjunto de ferramentas
CO	Cateto oposto ao ângulo
CA	Cateto adjacente ao ângulo
d	Deslocamento
P	Força aplicada
L	Comprimento total
I	Momento de inércia
σ	Tensão de flexão
M	Momento fletor na seção a ser calculada
y	Distância do centro do eixo ao ponto de análise
ϵ	Deformação
N	Fator de segurança
S_y	Tensão de escoamento do material (LE)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 PONTEADEIRA ESTACIONÁRIA DE CLINCHING	16
2.2 PADRONIZAÇÃO.....	17
2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	18
2.3.1 Usinagem	19
2.3.2 Fundição	20
<u>2.3.2.1 Fundição em Areia Verde.....</u>	<u>22</u>
2.4 FERRO FUNDIDO	24
2.4.1 Ferro Fundido Nodular.....	27
2.4.1.2 FE 70002	29
2.5 ANÁLISES ESTRUTURAIS.....	31
2.5.1 Método dos Elementos Finitos.....	32
2.5.2 Análise estrutural estática.....	34
<u>2.5.2.1 SolidWorks</u>	<u>35</u>
<u>2.5.2.2 Ansys Workbench</u>	<u>36</u>
3 METODOLOGIA.....	37
4 ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA UTILIZANDO O MEF	39
4.1 ESTUDO DAS ESTRUTURAS FABRICADAS	39
4.2 MODELAGEM DAS GEOMETRIAS	41
4.3 DEFINIÇÕES DOS MATERIAIS	44
4.4 DISCRETIZAÇÃO DAS GEOMETRIAS.....	45
4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	46
4.6 CONFIGURAÇÕES DO TIPO DE ANÁLISE	47
4.7 ANÁLISE DA PARTE MÓVEL DO SUPORTE DA FERRAMENTA.....	49
4.7.1 Simulação	49
4.7.2 Cálculo Analítico	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1 DEFLEXÃO	54

5.2 DEFORMAÇÃO	57
5.3 TENSÃO EQUIVALENTE DE VON MISES.....	60
5.4 FATOR DE SEGURANÇA	63
5.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO QUEIXO MÓVEL	66
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Padronização é a uniformização de produtos, serviços e atividades. Englobando os padrões técnicos (especificações) do produto, bem como os procedimentos operacionais para produzi-lo e as atividades relacionadas ao controle da qualidade, meio ambiente e segurança. Souza (2001) afirma que a padronização é responsável por moldar o comportamento humano e que ela é tão presente e comum naquilo que se faz no dia-a-dia que passa completamente despercebida.

A padronização torna-se fundamental principalmente para a indústria, onde a velocidade da produção e a qualidade dos produtos são essenciais. Este é o caso da microempresa GPTEch que será estudado neste trabalho. A microempresa fabrica ponteadeiras estacionárias de clinching (união de chapas à frio) por meio de encomendas, de maneira que todos os projetos realizados por ela são personalizados de acordo com a necessidade dos clientes.

A estrutura em C (C-Frame) das ponteadeiras, que é o elemento mais caro da manufatura, é fabricada atualmente em aço ASTM A36 e SAE1045 pelo processo de Oxicorte + Usinagem. Este processo tem um custo bastante elevado propiciando um estudo com o objetivo de definir um novo processo de fabricação de menor custo. O processo a ser estudado para fazer esta substituição será a fundição, que é um dos mais simples e econômico no mercado.

Com a definição do novo processo de fabricação, faz-se necessário estabelecer o material a ser utilizado, pois não será mais possível empregar os aços já citados. O material que mais apresenta vantagens econômicas no processo de fundição é o ferro fundido, e por esta razão será analisado o ferro fundido nodular como substituto dos materiais atuais por possuir propriedades mecânicas semelhantes aos mesmos.

Como o processo de fundição é mais restrito quanto ao projeto da estrutura em C da máquina é imprescindível definir uma padronização para esta estrutura que hoje é fabricada de forma similar, mas raramente igual para os clientes. A padronização da estrutura em C para o processo de fundição além de diminuir consideravelmente o custo da fabricação, vai

também diminuir o tempo de entrega do produto para o cliente, pois será possível ter um estoque da mesma, que hoje em dia é impraticável com o custo do processo de Oxicorte.

De acordo com Soares (2000), a fundição se destaca em meio aos processos de fabricação, por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos, desde peças com formatos simples a de extremo encargo como as que se destinam à indústria aeronáutica e aeroespacial. A fabricação das peças pode ser de forma seriada ou unitária, sendo a forma seriada voltada principalmente para as indústrias mecânica e automobilística. Percebe-se que essa variedade de peças não pode ser alcançada por um único processo. Por esta razão é necessário escolher, dentre os disponíveis, o que melhor se adapta às exigências do cliente.

As peças metálicas fabricadas por fundição ou forjamento, na maioria dos casos, necessitam de algum procedimento de usinagem posterior, pois essas peças geralmente apresentam superfícies grosseiras que precisam de melhor acabamento. Além disso, elas também deixam de apresentar furos com rosca, saliências, reentrâncias e outras características que só podem ser obtidas por meio da usinagem, ou seja, da produção de cavacos. O processo de usinagem inclui ainda a produção de peças que, por questões de produtividade e custos, não podem ser produzidas por processos de fabricação convencionais. (SECCO; AMARAL FILHO; OLIVEIRA, 2018).

Determinados produtos fabricados pelos processos de usinagem, requerem precisão dimensional (certos tipos de engrenagens e parafusos) e de acabamento com relação às peças semiacabadas, como por exemplo ajuste das geometrias, dimensões e acabamento superficial. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Com o intuito de possibilitar a padronização da estrutura em C das ponteadeiras estacionárias de clinching da microempresa GPTech, serão analisados os projetos já efetuados desenvolvidos com o programa SolidWorks em busca de um dimensionamento que seja conveniente para a aplicação mais comum do equipamento. Após a definição do dimensionamento da estrutura em C, será realizada a análise estrutural da mesma pelo método numérico avançado, chamado método de elementos finitos, utilizando os programas SolidWorks e Ansys Workbench.

O método de elementos finitos permite a discretização de um sistema contínuo por meio da aproximação das soluções por funções selecionadas, onde apenas os pesos da contribuição de cada função para a resposta final são desconhecidos. Neste método, os pesos citados estão diretamente associados aos deslocamentos de determinados pontos da estrutura, designados por nós. O método de elementos finitos demanda a solução de um elevado número

de equações algébricas, tanto para respostas estáticas quanto para problemas de valores próprios. (MEIROVITCH, 2001).

1.1 OBJETIVOS

Para resolver a problemática da padronização da estrutura em C das ponteadeiras estacionárias de clinching da microempresa GPTech, propõe-se neste trabalho os seguintes objetivos.

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar um novo padrão de estrutura em C para o processo de fundição utilizando ferro fundido nodular.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os projetos de estrutura em C existentes;
- Propor um modelo padrão de estrutura em C;
- Estudar possíveis melhorias na fixação dos cilindros hidropneumáticos e das ferramentas de clinching;
- Verificar a possibilidade de construção da estrutura em C com ferro fundido nodular FE 70002;
- Analisar o comportamento estrutural do novo projeto utilizando o método numérico de elementos finitos;
- Comparar os dados obtidos pelas simulações com os resultados do cálculo analítico para o suporte da ferramenta de clinching.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão dos principais conceitos teóricos relacionados aos temas aqui desenvolvidos tais como ponteadeira estacionária de clinching; padronização; processos de fabricação: fundição e usinagem; tipos e propriedades dos ferros fundidos; propriedades dos aços ASTM A36 e SAE 1045; e análise estrutural por elementos finitos.

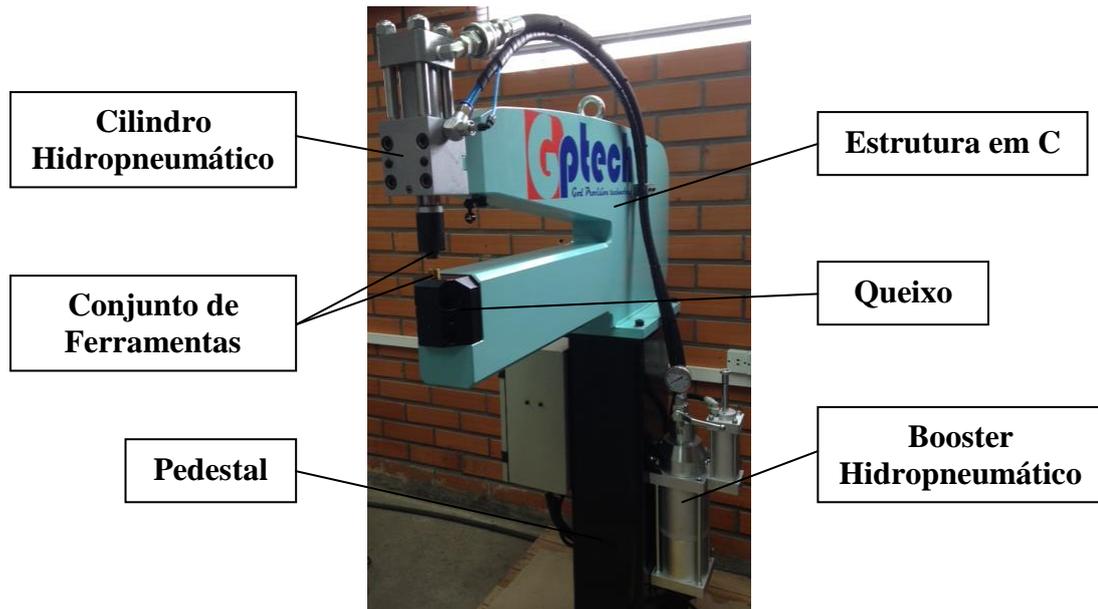
2.1 PONTEADEIRA ESTACIONÁRIA DE CLINCHING

A ponteadeira estacionária de clinching é utilizada no processo de conformação mecânica a frio, conhecido internacionalmente como Clinch ou Clinching. Este processo substitui o processo de solda ponto convencional e permite a união de dois a três tipos de chapas de igual ou diferentes materiais e espessuras, mesmo com adesivos ou outras camadas intermediárias. (GPETCH, 2018).

Este sistema não produz queima ou aquecimento e não possui variáveis como água de refrigeração, corrente, tensão, amperagem e desgaste do eletrodo uma vez que são utilizadas ferramentas e processo mecânico. A união das chapas é realizada criando resistência de cisalhamento e destacamento por meio de intertravamento mecânico. É um processo mais limpo, eficiente e com menor custo de produção, pois atua diretamente na chapa sem danificar ou empenar o material.

A ponteadeira estacionária de clinching é composta basicamente de um corpo (estrutura em C), um pedestal (que pode ser integrado ao corpo), um sistema de acionamento hidropneumático (cilindro e booster), um conjunto de ferramentas clinching e um suporte para a ferramenta (queixo), como pode ser visto na Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Ponteadeira estacionária de clinching da microempresa GPTEch



Fonte: Adaptado (GPTECH, 2018).

A seguir apresenta-se o conceito de padronização que será utilizado para o desenvolvimento deste trabalho

2.2 PADRONIZAÇÃO

“De maneira ampla, classificar e padronizar são atos diários que realizamos a todo o momento. Há, em nós, uma assimilação de padrões diversificados que nos ajudam a avaliar, a classificar, a julgar e a direcionar nossas opções.” (SOUZA, 2001, p. 23).

Classificar é determinar o atributo de uma conduta ou um produto a partir de padrões, ou tendo em vista a elaboração dos mesmos. Com isso em mente, um padrão pode ser entendido como um conjunto de regras presentes no ato de classificar. Padrão é, essencialmente, um parâmetro, um modelo a partir do qual comparamos objetos, produtos ou grandezas para criar classes. Logo, padronizar é criar algo para servir de modelo na formação de outras coisas. (SOUZA, 2001).

De forma mais sucinta, Ferreira (1995) considera como padrão tudo aquilo que é tomado como unidade de referência, ou seja, um modelo, um critério estabelecido pela opinião pública ou aceitação geral. Podendo ser um tipo, formato, exemplo ou combinação de requisitos aceitos como certos e admitidos como uma base de comparação. Sendo assim, será intitulado de padronização o processo de estabelecimento de um padrão conforme já descrito.

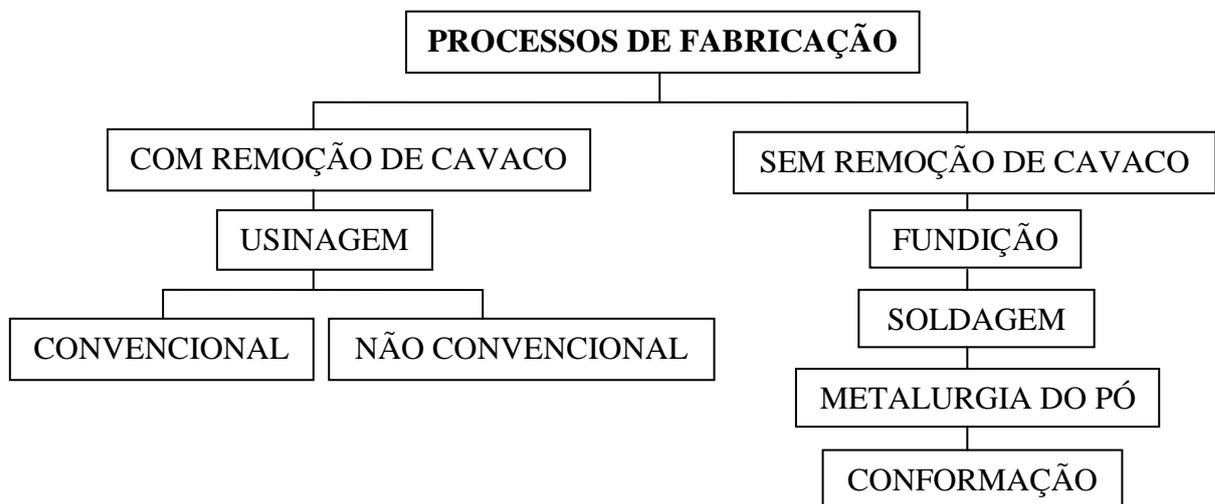
A fim de determinar esse padrão, a seguir serão introduzidos os processos de fabricação que já são utilizados pela microempresa GPTech e os que irão substituí-los.

2.3 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Em fabricações de produtos metálicos são usados processos que visam dar forma, ou seja, definem a geometria, as dimensões e o acabamento superficial de um metal puro ou liga metálica com as especificações estabelecidas para um determinado produto. Proporcionando ao mesmo o conjunto de propriedades exigido para o seu bom desempenho, como por exemplo, resistência mecânica, dureza, resistência ao desgaste, resistência à corrosão, condutividade elétrica, densidade dentre outros. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

O consenso geral entre a maioria das literaturas sobre processos de fabricação, é que é possível fabricar peças de duas formas: com a produção de cavacos, que caracteriza todos os processos de usinagem, e sem a produção de cavacos, como nos processos metalúrgicos (fundição, laminação, trefilação, etc.). (SECCO; AMARAL FILHO; OLIVEIRA, 2018). Essa classificação é representada de forma esquemática na Figura 2.

Figura 2 – Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Autora (2018).

O atual processo de fabricação utilizado pela microempresa GPTech é a usinagem não convencional, que será apresentada a seguir.

2.3.1 Usinagem

Usinagem é um conjunto de processos de manufatura nos quais uma ferramenta de corte é usada para remover excesso de material (cavaco) de um sólido, de tal maneira que o material remanescente tenha a forma da peça desejada. A ação predominante na usinagem envolve deformação por cisalhamento do material para formar um cavaco; à medida que o cavaco é removido, uma nova superfície é formada (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013, p. 105).

De acordo com Chiaverini (1986), o processo de usinagem realiza o acabamento superficial de peças fundidas ou conformadas mecanicamente, de modo a obter dimensões mais precisas e melhor aspecto visual, conforme as especificações de fabricação e utilização do produto. Esse processo também pode ser empregado na obtenção de características impossíveis de se conseguir pelos processos convencionais.

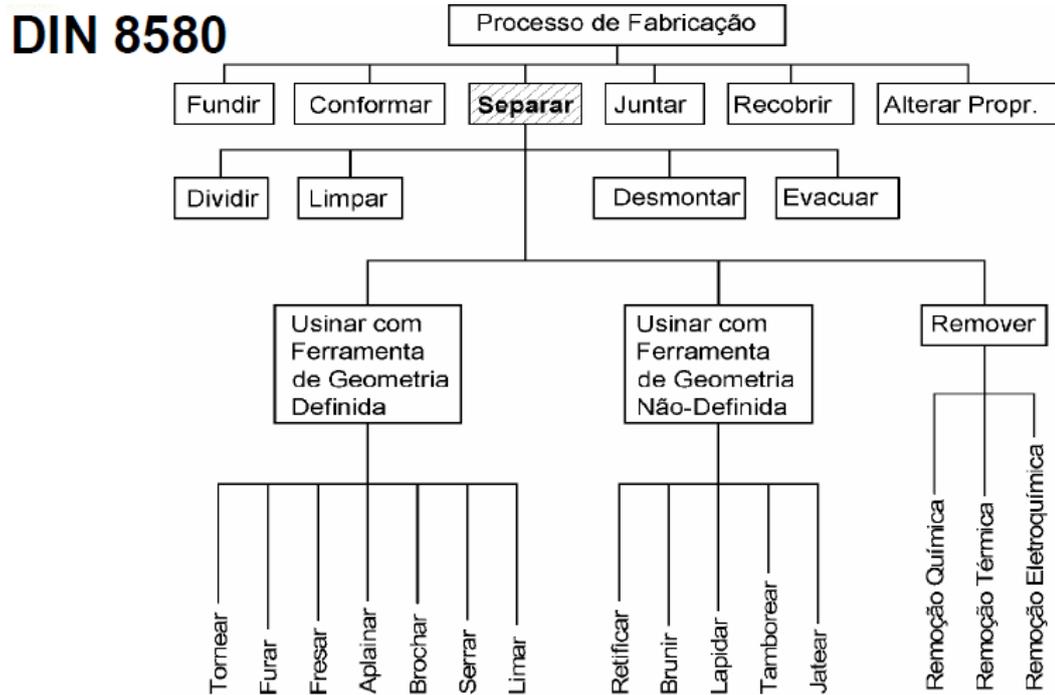
A usinagem apesar de frequentemente usada como processo complementar, ou de acabamento para outros processos (fundição, conformação plástica ou metalurgia do pó), pode ser utilizada como o processo principal de fabricação. Isso se deve pela combinação de diversas operações sequenciais de usinagem, que resultam na obtenção de formas de alta complexidade e variedade. Por essa razão, este é um dos mais importantes processos de manufatura, gerando qualquer geometria regular (superfície plana, orifícios redondos e cilindros) e podendo ser aplicada a uma grande variedade de materiais. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

Segundo Kiminami, Castro e Oliveira (2013), a usinagem pode ser dividida em processos de corte que geralmente envolve ferramentas mono e multicortantes, processos abrasivos e processos avançados de usinagem (que usam fontes de energia elétrica, química, térmica, hidrodinâmica e combinações dessas para remover o material da peça).

Como dito anteriormente, o processo de manufatura das estruturas em C utilizados atualmente na microempresa GPTech é o processo avançado de usinagem denominado oxicorte, que se fundamenta na erosão do material por meio da ação do calor (erosão térmica). Esse processo será substituído pelo processo de fundição essencialmente pela necessidade da redução do custo de fabricação.

Na Figura 3 é apresentado um diagrama dos processos de fabricação definido pela norma DIN 8580 onde o termo "Separar" compreende os processos de fabricação com remoção de cavaco, ou seja, a usinagem.

Figura 3 – Processos de fabricação segundo norma DIN 8580



Fonte: IFSP (2018, p. 4).

Em seguida será apresentado o processo de fundição que substituirá o atual processo de Oxicorte.

2.3.2 Fundição

Fundição é um processo de fabricação no qual o metal fundido, ou seja, metal no estado líquido é levado a fluir por gravidade ou por outra força dentro de um molde onde solidifica-se na forma da cavidade desse molde. O molde tem a forma total ou parcial da peça a ser produzida. Entre as vantagens e capacidades do processo de fundição, podem ser destacadas as seguintes: a fundição pode ser usada para fabricar peças de geometrias complexas, tanto nos seus formatos externos quanto nos internos. Alguns dos processos são capazes de produzir peças com a forma final diretamente (*net shape*), não necessitando de etapas adicionais para alcançar a geometria e as dimensões exigidas. A fundição pode ser usada para produzir tanto peças de grandes dimensões (mais do que 100 toneladas), como peças de pequenas dimensões (poucos gramas), podendo ser utilizada para a produção de peças de vastíssimas composições de liga e alguns processos são muito adequados para a produção em larga escala. A fundição faz uso de grande quantidade de sucata metálica, sendo este um aspecto bastante positivo desta rota de fabricação sob o ponto de vista de otimização do uso de recursos naturais por meio da reciclagem. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013, p. 29).

De acordo com Soares (2000), o processo de fundição pode ser empregado com os mais variados tipos de ligas metálicas, não se restringindo apenas ao ferro, desde que essas ligas apresentem as propriedades adequadas a esse processo (temperatura de fusão e fluidez).

Os materiais mais utilizados são: aços, ferros fundidos, alumínio, cobre, zinco, magnésio e respectivas ligas.

Outras vantagens da fundição são apontadas por Secco, Amaral Filho e Oliveira (2018) como sendo: a produção rápida e em série de grandes quantidades de peças, pois a fundição permite um alto grau de automatização; peças fundidas produzidas dentro de padrões variados de acabamento, ou seja mais liso ou mais áspero; e tolerância dimensional em função do processo de fundição utilizado. Em razão disso, há uma grande economia em operações de usinagem. A peça fundida possibilita também grande economia em relação ao peso, porque permite a obtenção de paredes com espessuras quase ilimitadas.

Apesar das vantagens, existem também limitações e desvantagens relacionadas à fundição, como porosidade, limitada precisão dimensional e acabamento superficial para alguns processos, propriedades mecânicas inferiores em alguns casos, periculosidade por lidar com metal fundido e problemas ambientais quanto ao descarte de certos produtos. (KIMINAMI; CASTRO; OLIVEIRA, 2013).

De acordo com Chiaverini (1986, p. 9), “A fundição abrange uma série de processos, cada um dos quais apresentando características próprias, a saber:”

- Fundição por gravidade;
- Fundição sob pressão;
- Fundição por centrifugação;
- Fundição de precisão;
- Fundição por outros métodos.

Segundo Moro e Auras (2007), dentre as variantes do processo de fundição destaca-se a influência do tipo de molde nas propriedades físicas do material resultante. O tipo de molde é o que determina a qualidade da peça e, por isso, muitas vezes os processos de fundição são classificados de acordo com o tipo usado.

Os moldes mais comuns são os abaixo descritos, embora existam outros:

- Areia sintética, também chamada areia verde ou areia preta (molde descartável e modelo não descartável);
- Em casca, também conhecido como “shell molding” (molde descartável e modelo não descartável);
- Permanente (molde bipartido permanente);
- Cera perdida, também conhecido como microfusão (molde e modelo são descartáveis);
- Injeção (molde permanente).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os principais processos de moldagem para a fundição.

Tabela 1 – Principais processos de fundição

Processo	Areia Verde	Shell	Permanente	Microfusão	Injeção
Modelo	Madeira, epóxi ou metálico	Metálico	Dispensável	Cera ou plástico	Dispensável
Molde	Areia + aglomerantes + aditivos + água (opcional)		Metálico (coquilha)	Pasta cerâmica	Metálico (matriz)
Tolerância dimensional	± 1,27 mm ± 3,8 mm	± 0,25 mm ± 5,0 mm	± 2,5 mm ± 7,6 mm	± 0,02 mm ± 3,8 mm	± 2,5 mm ± 12,7 mm
Custo (grande quantidade)	Baixo	Médio alto	Baixo	Mais alto	Mais baixo
Custo (pequena quantidade)	Mais baixo	Médio alto	Alto	Médio	Mais alto
Peso fundido	Ilimitado	113,4 kg	45,4 kg	45,4 kg	34 kg
Espessura mínima	2,5 mm	2,5 mm	3,2 mm	1,6 mm	0,8 mm
Acabamento superficial	Razoável - Bom	Bom	Bom	Bom	Melhor
Facilidade de fundição de peça complexa	Razoável - Bom	Bom	Razoável	Melhor	Bom
Facilidade de alteração de projeto	Melhor	Razoável	Ruim	Razoável	Pior
Ligas que podem ser fundidas	Quaisquer	Quaisquer	Quaisquer, menos aço	Quaisquer	Zn, Al e Mg

Fonte: Adaptado (SOARES, 2000, p. 37); (MORO e AURAS, 2007, p.19).

Considerando a simplicidade e a relação custo-benefício, foi escolhido o processo de fabricação por gravidade moldado em areia verde, que será descrito a seguir, para substituir o processo atual de fabricação das estruturas em C da empresa GPTEch.

2.3.2.1 Fundição em Areia Verde

Apesar do processo de fundição com molde em areia verde ser o mais conhecido e empregado, existem muitos outros que utilizam molde de areia, tais como, areia aglomerada

com cimento, areia com resinas de cura a frio, areia com resinas de cura a quente, areia com silicato de sódio, entre outros. (MORO; AURAS, 2007, p. 9).

As vantagens deste processo descritas por Moro e Auras (2007) são: menor custo dentre todos os métodos; facilidade de reparo dos moldes; e equipamentos mais simples.

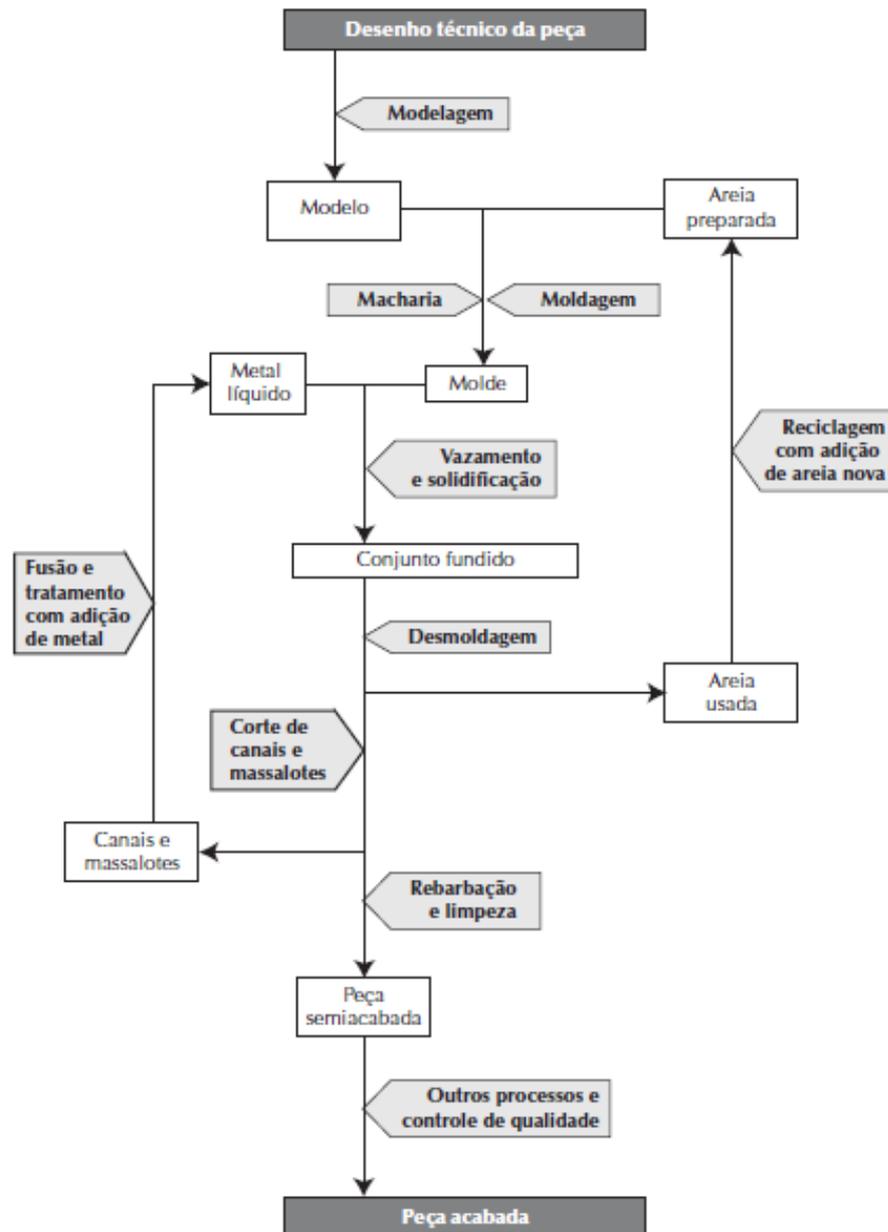
Moro e Auras (2007) descrevem também as desvantagens como: a areia natural é normalmente heterogênea, ou seja, sua composição varia para cada parte, influenciando na qualidade das peças; acabamento superficial inferior; e maior deformação do molde (erosão) conforme o aumento das peças.

De acordo com Secco, Amaral Filho e Oliveira (2018), alguns defeitos comuns das peças fundidas são:

- Inserção da areia do molde nas paredes internas ou externas da peça causam problemas de usinagem, pois os grãos de areia são abrasivos e, por isso, estragam a ferramenta acarretando defeitos na superfície da peça usinada;
- Composição da liga metálica com defeitos estimula o aparecimento de partículas duras indesejáveis no material, propiciando também desgaste da ferramenta de usinagem;
- Falta de material devido ao processo de solidificação, ou seja, rechupe, gerado por projeto de massalote malfeito;
- Porosidade dentro de peça, originada pelos os gases existentes dentro do metal líquido que não são eliminados durante o processo de vazamento e solidificação, provocando fragilidade e defeitos superficiais na peça usinada.

Soares (2000) descreve a sequência de etapas básicas para a produção de uma peça fundida por gravidade em areia da seguinte forma: Primeiramente confecciona-se o modelo (adaptação do desenho da peça) e os machos (caso existam furos ou partes ocas), suas dimensões devem prever a contração do metal quando ele se solidificar e um eventual sobremetal para posterior usinagem da peça. A partir do modelo pode-se construir n moldes em areia, com cada molde dando origem a uma peça fundida. Paralelamente à fabricação do molde, o metal é convenientemente fundido e em seguida o metal líquido é vazado no molde fabricado, cuja cavidade corresponde ao negativo da peça que se deseja obter. Após o vazamento e a solidificação do metal, a peça é retirada do molde, com forma próxima à final precisando por fim passar pelas etapas de corte de canais, rebarbação, limpeza, acabamento (usinagem, tratamento térmico ou soldagem quando necessário), controle de qualidade final e expedição. Segue abaixo na Figura 4 a ilustração das etapas do processo descrito.

Figura 4 – Fluxograma simplificado das operações básicas para a produção de uma peça fundida aplicadas à maioria dos processos de fundição



Fonte: Kiminami, Castro e Oliveira (2013, p. 30).

A seguir será apresentado o ferro fundido, o material que substituirá os aços atualmente usados pela microempresa GPTEch no novo processo de fabricação.

2.4 FERRO FUNDIDO

Os ferros fundidos são considerados excelentes ligas para fundição, pois se fundem facilmente, são muito fluidas no estado líquido e não formam filmes superficiais de oxidação

quando vazados. O baixo custo dessas ligas comparado com outros materiais e a versatilidade das suas propriedades mecânicas são os principais responsáveis por sua extensa utilização na área industrial. (FRANCO, 2010).

Dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas ferro-carbono-silício (com teores de carbono geralmente acima de 2,0%) de importância fundamental para a indústria, não só devido às características intrínsecas ao próprio material, como também pelo fato de hoje poder ser aplicado em situações que, de certo modo, eram exclusivas dos aços. Esse avanço foi possível mediante a introdução de elementos de liga, aplicação de tratamentos térmicos adequados e pelo desenvolvimento do ferro fundido nodular. (CHIAVERINI, 2008).

De acordo com Chiaverini (2008), o ferro-fundido pode ser decomposto nos seguintes tipos de liga:

- Ferro fundido cinzento: Dentre os ferros fundidos, esta é a liga mais usada devido as suas características, tais como, fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, excelente usinabilidade, boa resistência ao desgaste, e boa capacidade de amortecimento. É caracterizado por apresentar como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício, sua fratura mostra uma coloração escura (donde a sua denominação);
- Ferro fundido branco: Esta liga apresenta uma fratura de superfície de cor clara e suas propriedades fundamentais são elevadas dureza e resistência ao desgaste. Porém, esses materiais são muito difíceis de usinar, mesmo com os melhores materiais de corte. Para a produção dessa liga, além da velocidade de resfriamento, é preciso ter uma composição química adequadamente ajustada (teores de carbono e silício);
- Ferro fundido mesclado: É caracterizado por ser uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento, conseqüentemente mostra uma fratura de coloração mista entre branca e cinzenta;
- Ferro fundido maleável: É obtido a partir do ferro fundido branco, mediante um tratamento térmico especial, chamado maleabilização. Com isso, adquire ductilidade e torna-se mais tenaz, característica que, aliada a boas propriedades de resistência à tração, resistência à fadiga, resistência ao desgaste, dureza e usinabilidade, permite abranger importantes aplicações industriais;

- Ferro fundido nodular: Essa liga é conhecida também como ferro fundido dúctil e caracteriza-se pela sua boa ductilidade (devido a um tratamento realizado ainda no estado líquido), tenacidade e resistência mecânica. Entretanto, sua característica mais importante, relacionada com a resistência mecânica, é o limite de escoamento que é mais elevado no ferro fundido nodular do que no ferro fundido cinzento, ferro fundido maleável e até mesmo nos aços-carbono comuns (sem elementos de liga).
- Ferro fundido de grafita compactada: É uma liga que, como o ferro fundido nodular, exige adição de elementos especiais como terras raras com um elemento adicional como o titânio. Pode ser considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular, desse modo, possui alguma ductilidade, apresenta maior resistência mecânica e melhor acabamento por usinagem que o cinzento, condutividade térmica mais elevada e maior capacidade de amortecimento que a do nodular.

Segue na Tabela 2 a comparação das principais propriedades mecânicas e composição química dos ferros fundidos descritos anteriormente.

Tabela 2 – Comparação das principais propriedades mecânicas e composição química dos ferros fundidos

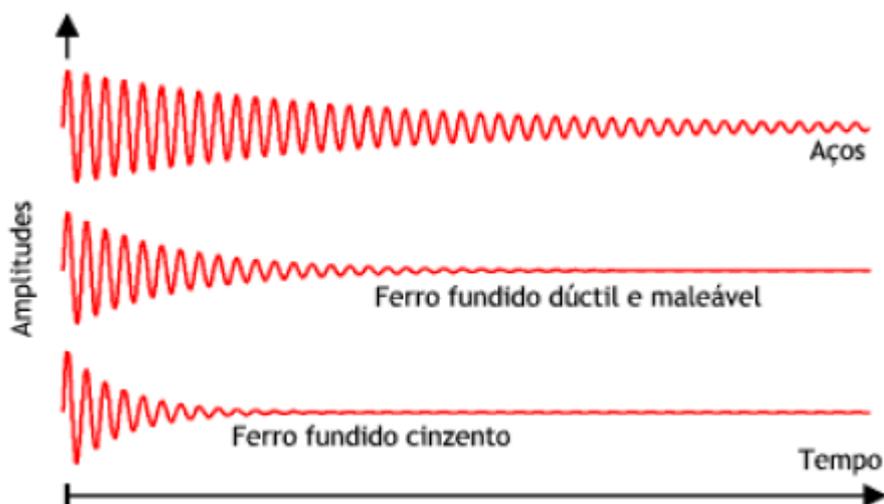
Material	Cinzento	Branco	Maleável	Nodular	Vermicular
Composição Química Básica					
C (%)	2,5 a 4,0	1,8 a 3,6	2,2 a 2,9	3,0 a 4,0	2,5 a 4,0
Mn (%)	0,20 a 1,0	0,25 a 0,80	0,15 a 1,2	0,10 a 1,0	0,20 a 1,0
P (%)	0,02 a 1,0	0,06 a 0,20	0,02 a 0,20	0,01 a 0,10	0,01 a 0,10
S (%)	0,02 a 0,25	0,06 a 0,20	0,02 a 0,20	0,01 a 0,03	0,01 a 0,03
Si (%)	1,0 a 3,0	0,50 a 1,9	0,90 a 1,9	1,8 a 2,8	1,0 a 3,0
Propriedades Mecânicas					
Limite de escoamento (MPa)	-	189 a 495	190 a 490	240 a 500	224 a 430
Limite de resistência à tração (MPa)	100 a 390	210 a 550	290 a 690	370 a 800	298 a 550
Dureza (HB)	130 a 269	400 a 600	200 a 270	140 a 310	128 a 217
Alongamento (%)	-	-	2 a 12	2 a 17	2 a 8

Fonte: Autora (2018).

O ferro fundido pode atingir excelentes resistências ao desgaste, à abrasão, às altas temperaturas e à corrosão só com a adição de elementos de liga. Entretanto, apesar de ter uma extensa gama de resistências mecânicas e de durezas, os ferros fundidos têm resistência ao impacto e ductilidade relativamente baixas. (FRANCO, 2010).

Os veios de grafita presentes no ferro fundido, uma vez que não apresentam resistência mecânica, formam umas espécies de vazios na estrutura do mesmo, o que permite a deformação plástica do material localizado ao redor desses veios sob tensões nominais menores que em outros casos. A isto, é atribuída a maior capacidade de amortecimento do ferro fundido em relação ao aço. (CHIAVERINI, 2008). Essa capacidade de amortecimento pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 – Capacidade de amortecimento do ferro fundido em comparação com a do aço, pelo método de ensaio Foepl-Pertz



Fonte: BRM (2018, p. 35).

Dentre os ferros fundidos estudados, pode-se constatar que o ferro fundido nodular, descrito no próximo tópico, é o que melhor se encaixa nas necessidades do projeto das estruturas em C por apresentar propriedades comparáveis ao aço de médio carbono (material utilizado atualmente).

2.4.1 Ferro Fundido Nodular

Os ferros fundidos nodulares combinam as vantagens de fabricação dos ferros fundidos cinzentos com suas propriedades semelhantes a dos aços, permitindo que ocorra uma

deformação significativa sem fratura. Além da ductilidade, esse material apresenta outras características tal como boa fluidez, resistência ao desgaste, tenacidade, ductilidade, temperabilidade e boas características de fundição associada à elevada resistência mecânica. (FRANCO, 2010).

As peças produzidas em ferro fundido nodular são empregadas muitas vezes no estado fundido, entretanto, outras podem precisar ser tratadas termicamente. Os tratamentos térmicos a que usualmente podem ser submetidos os ferros fundidos nodulares são: alívio de tensões, recozimento, normalização, têmpera e revenido, austêmpera, e têmpera superficial. Elementos de liga como níquel, molibdênio ou cromo podem ser usados para aumentar dureza e outras propriedades (CHIAVERINI, 2008).

Segundo Chiaverini (2008), podem ser feitas as seguintes considerações em relação às propriedades dos ferros fundidos nodulares: as propriedades de tração são muito bem relacionadas com a dureza Brinell, sendo que essa relação depende da microestrutura do material; apresentam um módulo de elasticidade constante até o seu limite elasticidade; a relação entre o limite de fadiga e a resistência à tração situa-se entre 0,33 e 0,52; e sua resistência à fadiga torna-os altamente recomendáveis para peças críticas utilizadas em condições de alta velocidade.

A Tabela 3 mostra a comparação das principais propriedades mecânicas entre os ferros fundidos nodulares.

Tabela 3 – Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT

Classe	LRT _{min.} (MPa)	LE _{min.} (MPa)	Along _{min.} (%)	A título informativo	
				Dureza Brinell (HB)	Estruturas predominantes
FE 38017 FE 38017 RI*	370	240	17	140 – 180	Ferrítica
FE 42012	410	270	12	150 – 200	Ferrítica- perlítica
FE 50007	490	340	7	170 – 240	Perlítica- ferrítica
FE 60002	590	390	2	210 – 280	Perlítica
FE 70002	690	440	2	230 – 300	Perlítica
FE 80002	800	500	2	240 – 310	Perlítica

* Classe com requisito de resistência ao choque.

Fonte: Adaptado (CHIAVERINI, 2008, p. 566).

Com base na tabela comparativa entre os ferros fundidos nodulares, o ferro fundido FE 70002 que será retratado a seguir, é o material que possui propriedades mecânicas mais similares aos aços de médio carbono, e assim, o material que melhor se encaixa nas necessidades do projeto das estruturas em C.

2.4.1.2 FE 70002

O ferro fundido nodular FE 70002 dispõe de elevadas propriedades mecânicas, bom acabamento superficial e boa temperabilidade, permitindo sua utilização em peças que requeiram alta resistência à tração e/ou desgaste, e tratamentos térmicos superficiais. Este material possui limite de resistência à tração e limite de escoamento similar aos aços SAE 1045 (médio carbono) laminados a quente, quando na condição bruta-de-fusão. (TUPY, 2014).

Na tabela 4 é realizada uma comparação das propriedades mecânicas e composição química entre os aços de médio carbono utilizados pela microempresa GPTEch e o ferro fundido nodular selecionado para fazer a substituição dos mesmos.

Tabela 4 – Comparação entre os aços utilizados atualmente e o ferro fundido nodular selecionado

Material	ASTM A 36	SAE 1045	FE 70002	FN 7003
Composição Química				
C (%)	0,25 a 0,30	0,45	3,30 a 4,0	3,40 a 3,80
Mn (%)	0,75	0,75	0,65 (máx.)	0,45 a 0,65
P (%)	≤ 0,04	≤ 0,03	0,10 (máx.)	0,10 (máx.)
S (%)	≤ 0,05	≤ 0,05	0,02 (máx.)	0,02 (máx.)
Si (%)	≤ 0,40	≤ 0,20	2,20 a 3,10	2,40 a 2,70
Mg (%)	-	-	0,03 a 0,06	0,038 a 0,055
Cu (%)	-	-	0,70 a 1,40	0,40 a 0,60
Cr (%)	-	-	-	0,30 (máx.)
Propriedades Mecânicas				
Limite de elasticidade (MPa)	200	250 (Laminado a quente)	-	-
Limite de escoamento (MPa)	250	310 (Laminado a quente)	480	483
Limite de resistência à tração (MPa)	400 a 500	560 (Laminado a quente)	700	700
Dureza (HB)	130 a 150	165 a 250	230 a 300	241 a 300
Alongamento (%)	20	17	2	3

Fonte: Autora (2018).

O material FN 7003 mostrado na Tabela 4 refere-se ao ferro fundido nodular fabricado pela fundição Valentini, empresa cotada para manufatura da nova estrutura em C. Os dados informados são valores reais cedidos pela própria empresa.

Como este trabalho é uma continuação do processo de padronização iniciado pela microempresa GPTEch, as decisões em relação ao processo de fabricação substituto e o novo material a ser utilizado foram tomadas com base em pesquisas anteriormente efetuadas pela mesma. Na Tabela 5 será apresentado um orçamento realizado em maio de 2017 pela microempresa GPTEch, onde é comparado os valores do aço ASTM A36 e do ferro fundido nodular FN 7003.

Tabela 5 – Comparação de preço entre o aço e o ferro fundido nodular

Material	ASTM A 36	FN 7003
Largura x Altura (mm)	345 x 399	345 x 399
Processo de Fabricação	Oxicorte	Fundição em areia verde
Acabamento	Usinagem Fina	Usinagem Superficial
Quantidade de peças fabricadas por lote	1	5
Preço da fabricação por unidade	R\$461,53	R\$266,00
Preço do acabamento por unidade	R\$2250,00*	R\$346,00
Preço do modelo em madeira	-	R\$2100,00
Custo total por peça	R\$2711,53	R\$612,00**
Custo total para 10 peças	R\$27,115,30	R\$8220,00***

* R\$ 90,00/hora – foi estimado 25 horas para esta peça;
 ** Sem contabilizar o valor do molde;
 *** Contabilizando o valor do molde.

Fonte: Adaptado (GPTECH, 2017).

Através da tabela comparativa percebe-se que o maior custo relacionado ao processo de fabricação atual é o acabamento (usinagem fina) que chega a ser mais caro do que o custo do modelo em madeira para o processo de fundição. Se comparado o custo total de dez peças produzidas nota-se que o processo de fundição chega a ser três vezes mais barato, mesmo com a contabilização do preço do molde.

Apesar de a fundição exigir uma quantidade mínima de fabricação de cinco peças por lote, ainda é mais vantajoso fabricar por esse processo e optar por ter estoque da peça do que fabricar pelo processo de oxicorte + usinagem. Uma vantagem de ter estoque dessa peça seria diminuir o tempo de entrega do equipamento para o cliente que atualmente é de 60 dias úteis, após a aprovação do projeto, para 20 dias úteis.

Vale lembrar que a troca do processo só ocorrerá para a situação estudada neste trabalho, equipamentos que exijam adaptações e componentes especiais continuarão a serem fabricados pelo processo atual.

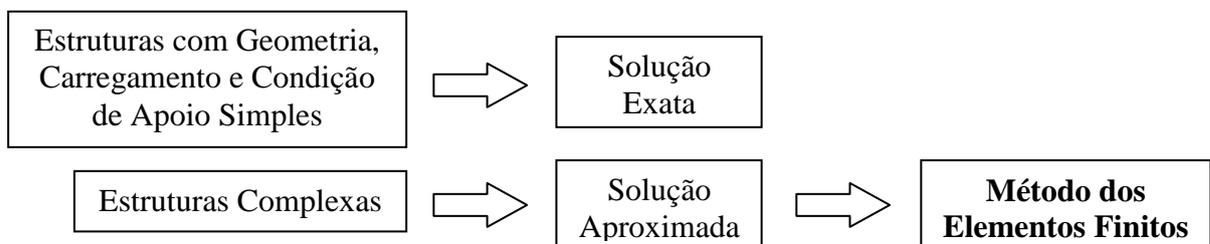
A definição do material a ser utilizado faz-se necessária para a realização das análises estruturais da geometria desenvolvida. Essas análises serão introduzidas no próximo tópico.

2.5 ANÁLISES ESTRUTURAIS

De acordo com Alves Filho (2007), os Métodos Analíticos Clássicos permitem o cálculo da resposta exata dos deslocamentos, deformações e tensões na estrutura em todos os seus pontos (infinitos pontos), porém essas soluções são somente conhecidas para alguns casos, que fogem da maioria das aplicações práticas encontradas no dia a dia. A maioria das estruturas de importância prática apresenta forma arbitrária e são consideradas muito complexas para serem analisadas pelas técnicas clássicas. À vista disso, a solução analítica frequentemente torna-se impossível, e o problema requer grandes e excessivas simplificações, resultando em cálculos pouco acurados.

Para solucionar esse impasse, desenvolveram-se procedimentos aproximados, que podem ser aplicados em caráter geral, independente da forma da estrutura e da condição de carregamento, dentro da precisão aceitável do problema de engenharia. Essa alternativa aos procedimentos analíticos clássicos deu origem ao Método dos Elementos Finitos. (ALVES FILHO, 2007). A Figura 6 apresenta os dois grandes caminhos possíveis na solução dos problemas descritos anteriormente.

Figura 6 – Solução de problemas de engenharia



Fonte: Adaptado (ALVES FILHO, 2007, p. 3).

O método dos elementos finitos, descrito a seguir, será utilizado para fazer a análise estrutural da nova geometria modelada por meio de programas comerciais.

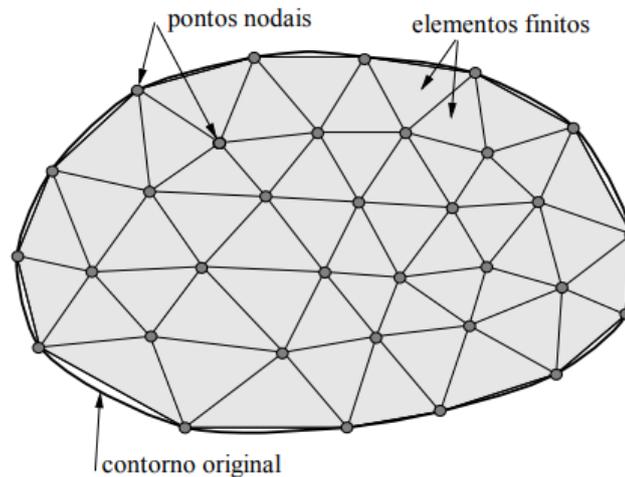
2.5.1 Método dos Elementos Finitos

“A análise estrutural é provavelmente a mais comum das aplicações do método de elementos finitos. Existem vários tipos de análises estruturais, entre estes os mais comuns são: análise estática, modal, harmônica, dinâmica transiente, etc.” (AZEVEDO, 2016, p.22).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) baseia-se na discretização dos meios contínuos (estrutura sólida, o fluido, os gases, etc.). E sua utilização se deve ao fato de poder ser aplicado em problemas clássicos da mecânica estrutural elástico-linear tais como mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, transmissão de calor, acústica, e outros. (SMITH, 2005).

Segundo Assan (2003), o MEF é baseado no método de Rayleigh-Ritz e prevê a conversão do meio contínuo em discreto, através, da divisão do domínio de integração (contínuo) em um número finito de pequenas regiões denominadas elementos finitos, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Geometria, malha de elementos finitos e pontos nodais



Fonte: Souza (2003, p. 2).

“A essa divisão do domínio dá-se o nome de rede de elementos finitos. A malha desse reticulado pode ser aumentada ou diminuída variando o tamanho dos elementos finitos. Os pontos de intersecção das linhas dessa rede são chamados nós.” (ASSAN, 2003, p. 57).

“Ao invés de buscar uma função admissível que satisfaça as condições de contorno para todo o domínio, no método dos elementos finitos as funções admissíveis são definidas no domínio de cada elemento finito.” (ASSAN, 2003, p. 58).

Uma das principais características do MEF é a sua versatilidade, podendo ser aplicado a problemas de diversas naturezas. A região analisada pode ter forma arbitrária e quaisquer cargas e condições de contorno. A malha pode ser constituída de elementos de diferentes tipos, formas e propriedades físicas. Esta grande versatilidade pode muitas vezes ser colocada em um programa computacional simples, desde que se controle a seleção do tipo de problema a abordar, especificando a geometria, condições de contorno, seleção de elementos, e outros. Outra característica muito positiva do método é a semelhança entre o modelo físico e o modelo real fazendo com que a abstração matemática seja fácil de visualizar (SMITH, 2005).

O intuito da Análise de Elementos Finitos (AEF) é determinar a resposta de uma determinada estrutura mecânica bem definida (geometria e propriedades do material), para um determinado conjunto de cargas e condições de contorno. (KIM; SANKAR, 2008).

Kim e Sankar (2008), dividem o MEF em cinco passos:

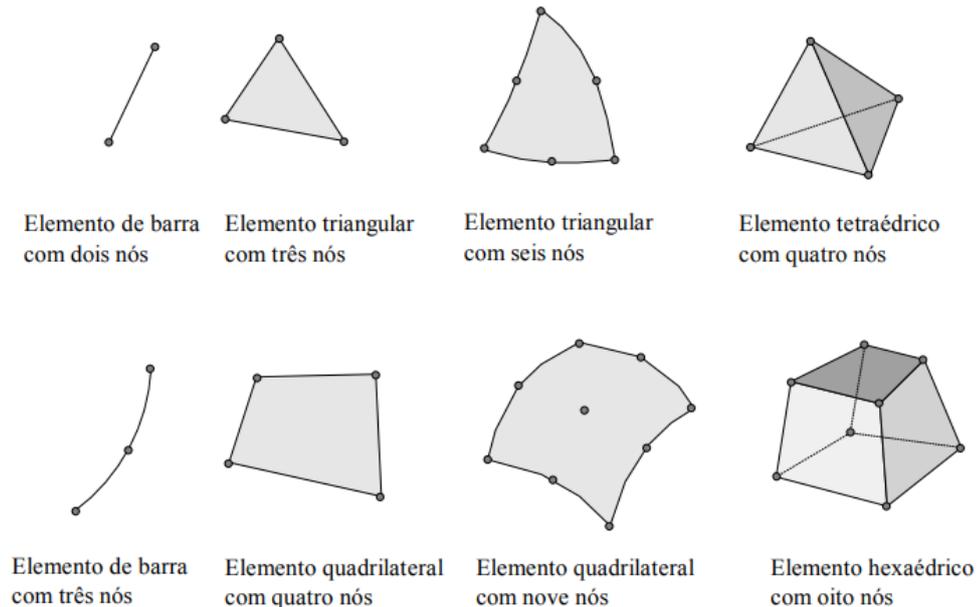
- Pré-processamento: onde é realizada a geração de malha dos elementos;
- Formulação do elemento: em que as equações que descrevam o comportamento de um elemento;
- Montagem (assembly): no qual obtém-se um sistema de equações para o domínio global a partir dos elementos que compõem;
- Resolução do sistema de equações;
- Pós-processamento: onde determinam-se as grandezas de interesse (tensões, deformações) e visualiza-se a resposta.

É por meio das equações diferenciais parciais (forma forte) e da sua respectiva forma fraca que geralmente é feita a descrição do comportamento de um determinado problema. A obtenção do sistema de equações do sistema global é efetuada através da combinação das equações que governam os elementos individuais, sendo que tais equações são exibidas na forma matricial. Para solucionar esse equacionamento utilizam-se aproximações por uma série de funções polinomiais simples em cada elemento para todo o domínio do problema. Desse modo, quanto mais elementos forem utilizados mais a solução aproximada convergirá para a solução exata. (KIM; SANKAR, 2008).

A precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Embora trata-se de um método aproximado, pode-se demonstrar que em uma malha consistente, a medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema. Ou seja, quanto menor for o tamanho e maior for o número de elementos em uma determinada malha, mais precisos serão os resultados da análise (SOUZA, 2003, p. 3).

Como pode ser visto na Figura 8, diversos tipos de elementos finitos já foram desenvolvidos e podem apresentar diversas formas geométricas em função do tipo e da dimensão do problema (uni, bi, ou tridimensional).

Figura 8 – Tipos de Elementos



Fonte: Souza (2003, p. 2).

Neste trabalho será abordada a aplicação do MEF em análise estrutural estática, retratada na sequência.

2.5.2 Análise estrutural estática

A análise estrutural estática ignora os efeitos de inércia e amortecimento (causadas por cargas que variam em função do tempo) e calcula os efeitos de condições de carregamento estático de uma geometria, contudo, cargas de inércia estática podem também ser incluídas nesta análise. Pode ser usada para determinar deslocamentos, tensões, deformações específicas e forças nas peças causadas por cargas que não induzem significantes efeitos de inércia ou amortecimento. Aqui as respostas e carregamentos estáticos são aplicados em relação ao tempo. (AZEVEDO, 2016).

Azevedo (2016) define os tipos de carregamentos que podem ser aplicados em análise estática como sendo: forças e pressões aplicadas externamente, forças inerciais estáticas (como gravidade ou velocidade rotacional) e imposição de deslocamentos diferentes

de zero. “A análise estática pode ser linear ou não linear. Todos os tipos de não linearidades são permitidos, por exemplo, grandes deformações, plasticidade, tensão de rigidez, elementos hiper-elásticos e assim por diante.” (AZEVEDO, 2016, p. 22).

Além dos carregamentos estáticos, ou seja, que não variam com o tempo, pode-se aplicar cargas estáticas que são repetitivamente retiradas totalmente ou parcialmente e criam ciclos de tensões ao longo do tempo de maneira pulsante, variada ou alternada. Sabe-se que tais variações cíclicas de tensões causam fadiga nos materiais e falhas catastróficas, mesmo quando as tensões são bem menores que os limites para condições puramente estáticas. (AZEVEDO, 2016, p. 22).

Os programas que serão utilizados para fazer a análise estrutural da peça desenvolvida são o SolidWorks e o Ansys Workbench, pois utilizam o método de elementos finitos descrito anteriormente. Os mesmos serão apresentados a seguir.

2.5.2.1 SolidWorks

O SolidWorks é uma ferramenta de projeto CAD em 3-D, que utiliza modelagem paramétrica de sólidos baseada nas características e propriedades de cada elemento e ação, possibilitando sua alteração em qualquer altura do processo de simulação. (DASSAULT SYSTÈMES, 2018).

Este programa utiliza o MEF através do SolidWorks Simulation que é um módulo de simulações para a análise de projetos de engenharia, oferecendo estudos estáticos, dinâmicos, térmicos, projetos, não lineares, flambagem, frequência, queda e fadiga. É possível neste programa determinar o tipo de elemento para realização da simulação e refinar a malha gerada, que pode ser executado facilmente selecionando a opção de malha fina ou grossa. (DASSAULT SYSTÈMES, 2018).

De acordo com Dassault Systèmes (2018), a resposta em um ponto qualquer de um elemento é interpolada a partir da resposta dos nós do elemento. Cada nó é completamente descrito por vários parâmetros, dependendo do tipo de análise e do elemento usado. De uma forma geral, em análises estruturais, a resposta de um nó é descrita por três translações e três rotações que são chamadas de graus de liberdade. O programa formula as equações que controlam o comportamento de cada elemento levando em consideração a conectividade com outros elementos. Essas equações relacionam a resposta a restrições, cargas e propriedades de materiais que são conhecidas. Em seguida organiza as equações em um grande conjunto de equações algébricas simultâneas e calcula as incógnitas. Por exemplo, para a análise de

tensões o Solver encontra os deslocamentos em cada nó e o programa calcula as deformações e tensões.

2.5.2.2 Ansys Workbench

O software de análise estrutural Ansys Workbench permite resolver problemas complexos de engenharia estrutural e a tomar melhores decisões de projeto de forma mais rápida. Através das ferramentas de análise de elemento finito (EAF) presentes no programa, é possível personalizar e automatizar soluções de problemas de mecânica estrutural e parametrizá-los para analisar vários cenários do projeto. Ele possui tecnologia de malha inteligente, permitindo a obtenção rápida de uma malha ideal em todos os modelos. Possui também algoritmos inteligentes e automáticos garantindo que malhas de alta qualidade sejam geradas e facilita adição de controles para ajuste fino, conforme necessário. Realiza análises de casos de carga única, vibração ou análise transitória; simulações de queda, impacto e explosão; assim como também permite examinar o comportamento linear e não linear de materiais, juntas e geometria (ANSYS, 2018).

Para analisar uma estrutura, o ANSYS divide o procedimento em três etapas:

- Pré-processador: onde é feita a modelagem da estrutura, a definição do tipo de elemento estrutural (viga, barras, placas, etc.), das constantes características do elemento e do tipo de material relacionado ao mesmo. São também numerados os nós e as barras.
- Solução: na qual é feita a definição dos tipos de forças atuantes na estrutura e suas condições de apoio e do tipo de análise escolhido;
- Pós-processador: em que é feita a apresentação dos resultados da análise da etapa anterior. Só após as análises estáticas e/ou dinâmicas é que se pode utilizar o módulo de otimização e seus métodos e ferramentas.

A seguir será apresentada a análise estrutural realizada na peça (estrutura em C) após a sua fabricação.

3 METODOLOGIA

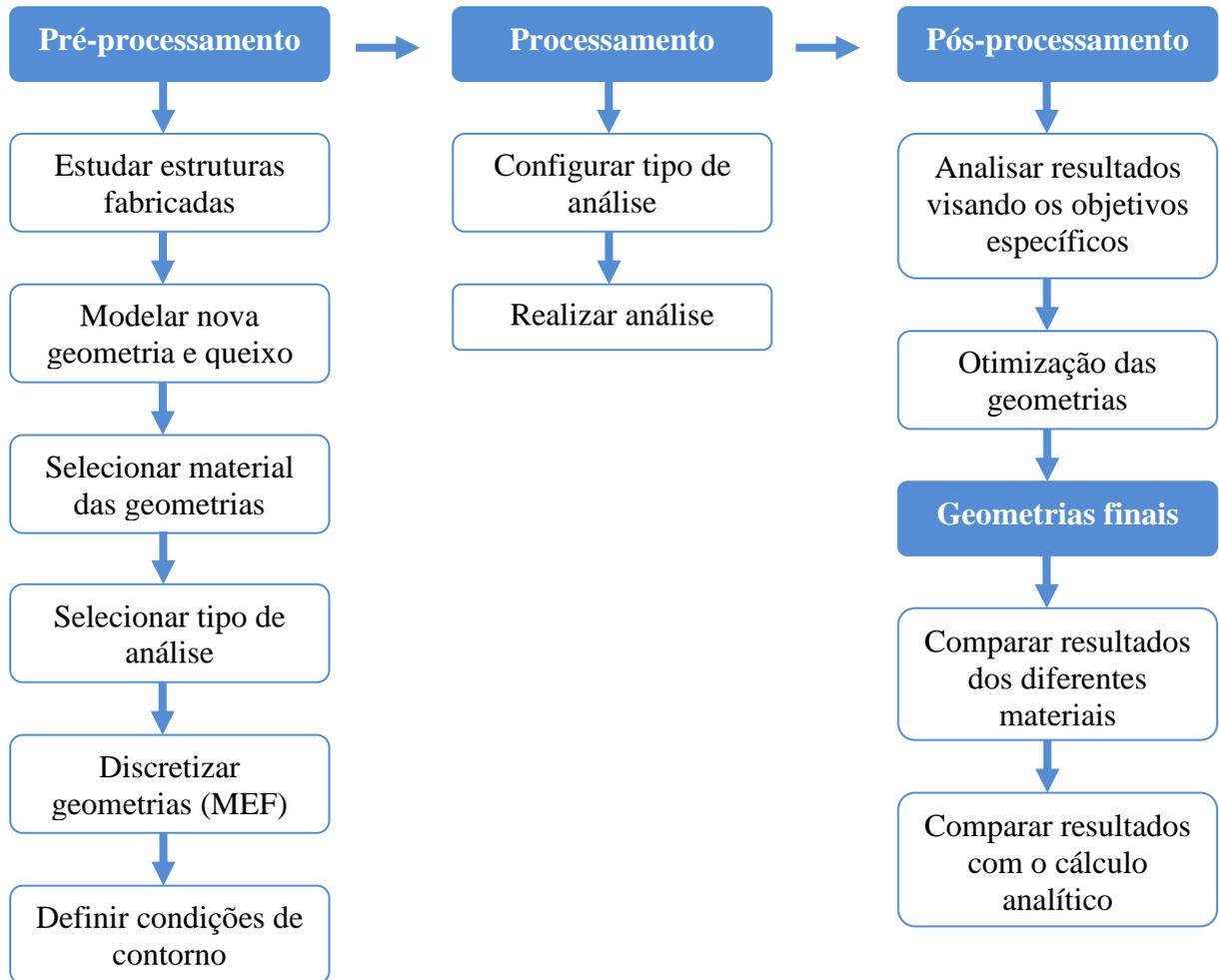
Como dito anteriormente, o objetivo principal do presente trabalho é desenvolver um padrão para as estruturas em C das ponteadeiras estacionárias de clinching da microempresa GPTEch, que serão produzidas por intermédio do processo de fundição a fim de baratear seu custo de fabricação. Para alcançar esse objetivo será realizado um estudo das estruturas já fabricadas à procura de similaridades nas mesmas possibilitando o desenvolvimento de uma geometria que poderá ser empregada na maioria dos projetos, salvo em casos especiais que exigem sistemas de segurança, articulações, dentre outros. Nesta fase será necessário estudar também a fixação da ferramenta de clinching, a área de fixação dessa ferramenta é chamada de queixo.

Para o desenvolvimento da geometria será utilizado o programa comercial SolidWorks, onde a estrutura será modelada e passará pela análise estrutural estática inicial (MEF) que será focada na deflexão, visando a adequação do alinhamento linear exigido para as ferramentas de clinching da empresa BTM. Após o ensaio inicial, a nova geometria será estudada de forma mais precisa através do programa Ansys Workbench, que também realizará a análise estrutural estática.

Os dois programas empregados no desenvolvimento e otimização da nova estrutura em C utilizam o MEF para executar as análises estruturais. A título de comparação, as análises estruturais serão realizadas utilizando o material em que as estruturas em C são fabricadas atualmente e o material escolhido para o novo processo de fabricação. Os queixos serão analisados em conjunto com a estrutura (comparação entre os materiais) e em separado. Somente os resultados obtidos através da simulação do queixo sozinho serão confrontados com as resoluções dos cálculos analíticos executados para a mesma situação.

A Figura 9 exibe o fluxograma das etapas desenvolvidas na metodologia.

Figura 9 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Autora (2018).

No capítulo a seguir serão detalhadas as etapas referentes ao pré-processamento descritas na Figura 9 e a seleção dos parâmetros necessários.

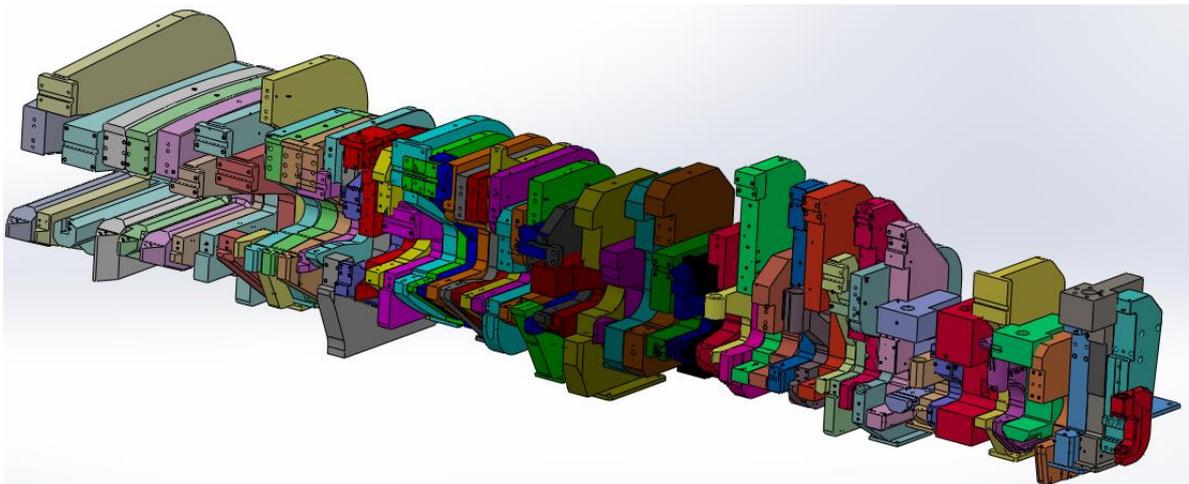
4 ANÁLISE ESTRUTURAL ESTÁTICA UTILIZANDO O MEF

Como visto no capítulo anterior, o pré-processamento foi definido como todas as etapas estabelecidas antes da simulação determinando o que será analisado e em que condição será feita essa análise. Na análise estrutural com MEF, o pré-processamento inclui a definição da geometria das peças, os materiais, a discretização da geometria e as condições de contorno.

4.1 ESTUDO DAS ESTRUTURAS FABRICADAS

O estudo das estruturas iniciou-se pela seleção das geometrias a serem analisadas fornecidas pela microempresa GPTech, sendo que as estruturas fabricadas para casos especiais foram excluídas deixando apenas as consideradas de uso comum. Em seguida foi realizada uma montagem no SolidWorks onde todas as estruturas selecionadas foram postas lado a lado para melhor observação das mesmas, como pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Junção das estruturas selecionadas para estudo

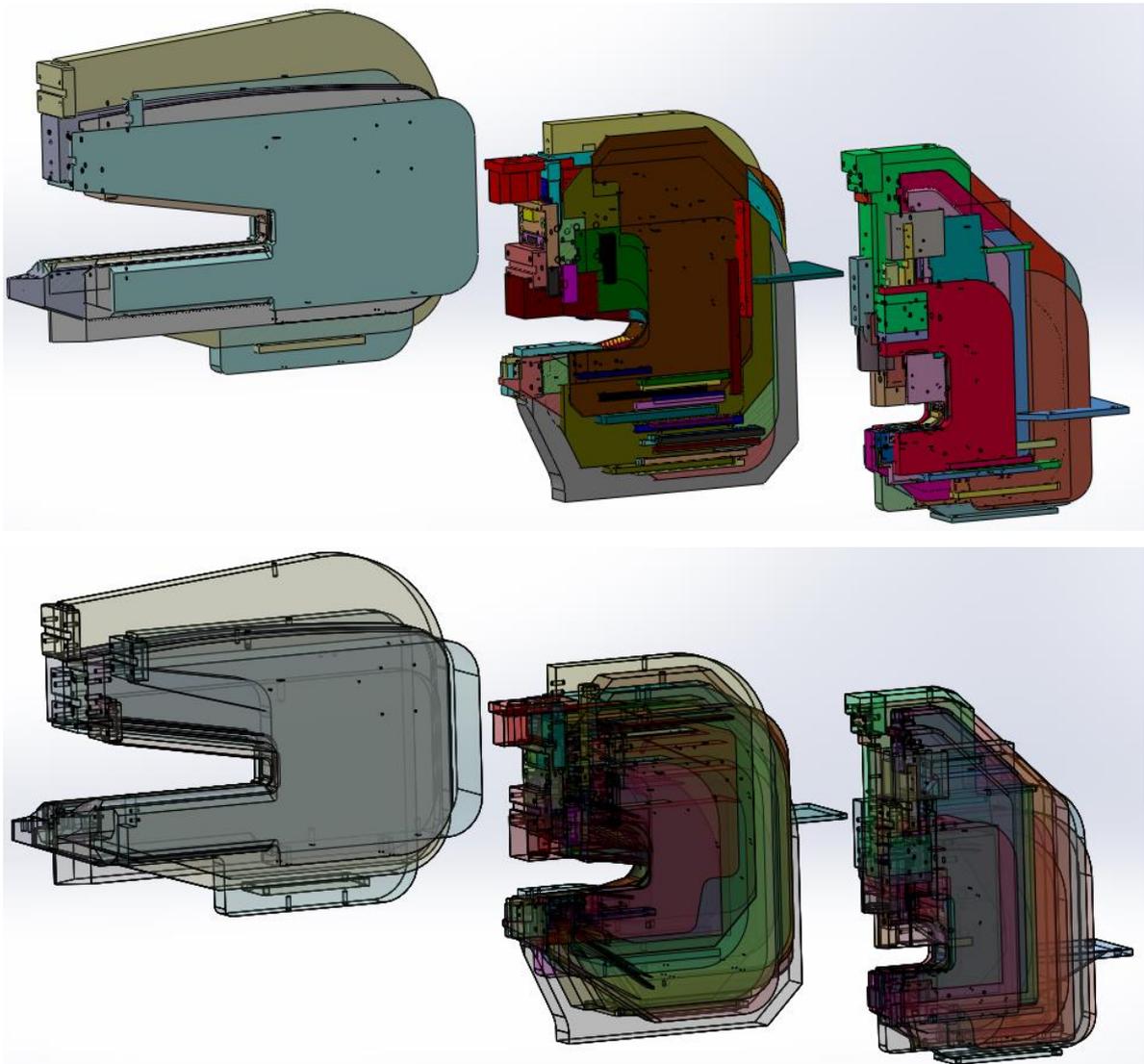


Fonte: Autora (2018).

Posteriormente, as estruturas foram divididas por tamanho em três grupos e sobrepostas para fazer a verificação de suas similaridades como mostra a Figura 11. Muitas das desigualdades entre essas geometrias se devem às diferentes solicitações de carga exigidas

em seus projetos. Atualmente em casos comuns elas são fabricadas para suportar 4, 6 ou 8 ton. A estrutura desenvolvida será produzida por meio de fundição o que permitirá diminuir consideravelmente o custo da mesma, porém com a penalidade de que esse processo limitará a quantidade de modelos a serem produzidos. Por esta razão, foi determinado que a mesma deva ser projetada para suportar 6 ton, já que o uso da carga de 8 ton dentre os projetos analisados foi pouco utilizado.

Figura 11 – Sobreposição das estruturas divididas por tamanho em três grupos

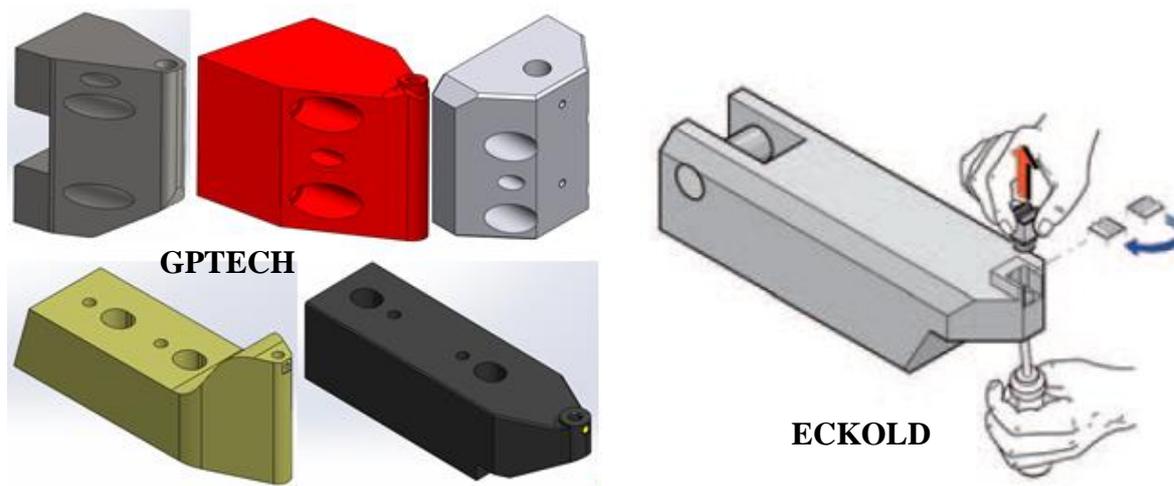


Fonte: Autora (2018).

Percebe-se pelas imagens anteriores que, na maioria dos casos, os queixos (suporte das ferramentas) não são embutidos nas estruturas em C, sendo fabricados separadamente. Com base na verificação dos modelos existentes, decidiu-se por implementar um novo tipo de

queixo que será móvel, baseado no modelo da ponteadeira estacionária Hit-Clinch HCM 1000 da marca ECKOLD. A Figura 12 mostra alguns modelos de queixos produzidos pela microempresa GPTEch e o que servirá de modelo para o desenvolvimento da nova geometria.

Figura 12 – Queixos fabricados pela GPTEch e queixo modelo ECKOLD



Fonte: Autora (2018).

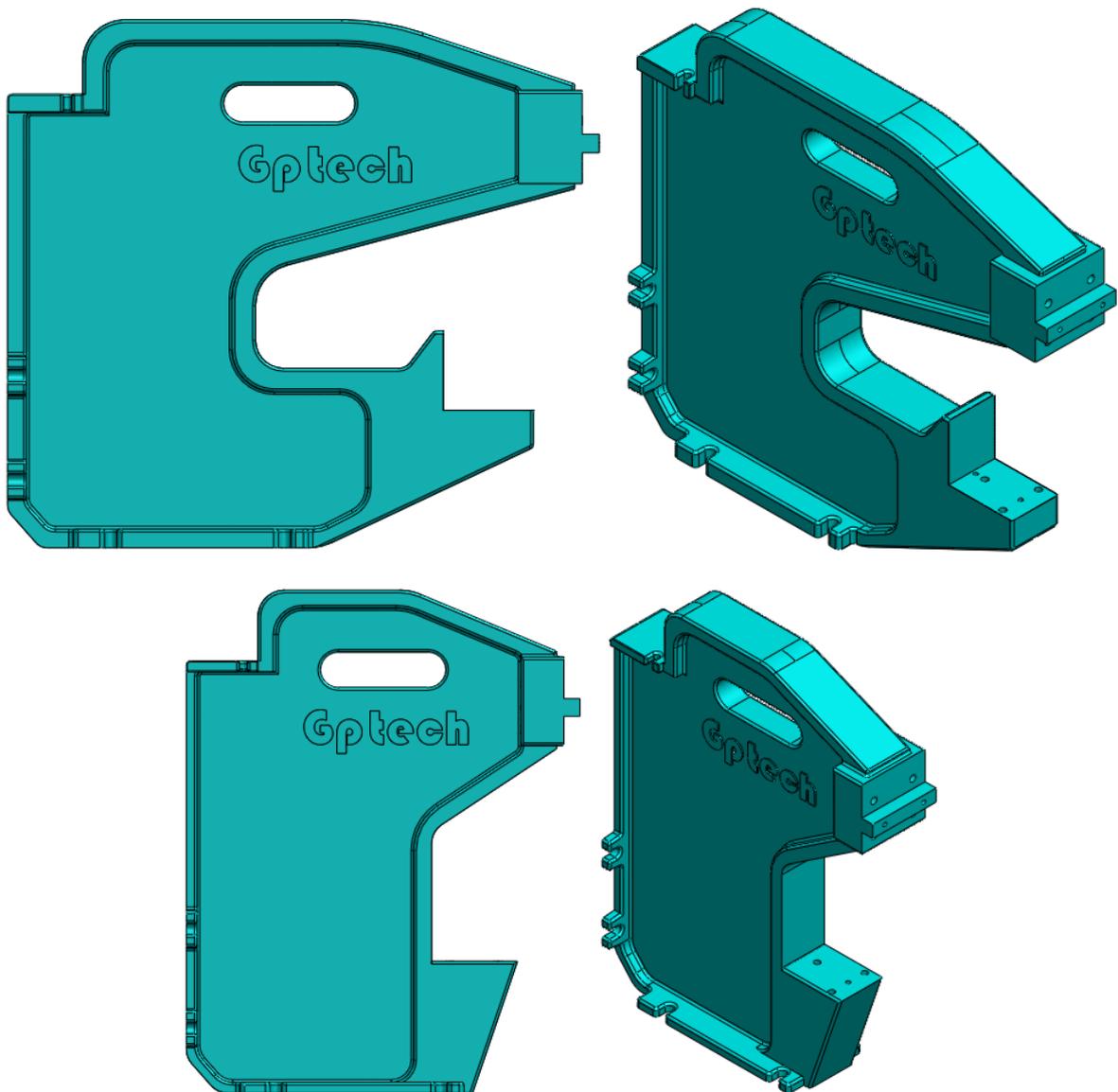
Por intermédio das semelhanças observadas neste estudo foram desenvolvidas duas geometrias que serão apresentadas a seguir.

4.2 MODELAGEM DAS GEOMETRIAS

Conforme pôde ser observado no tópico anterior, poucas estruturas de tamanho grande (700 mm de garganta) foram fabricadas e por esta razão decidiu-se modelar apenas as estruturas de tamanho médio (400 mm de garganta) e pequeno (200 mm de garganta), ilustradas na Figura 13. O termo garganta refere-se à distância horizontal entre a ferramenta de clinching e o fundo da abertura da estrutura em C.

No desenvolvimento das geometrias foi necessário levar em consideração o tamanho e a fixação dos cilindros e dos boosters hidropneumáticos, componentes estes do conjunto de acionamento diretamente relacionados com a carga necessária. Para cada força exigida é usado um conjunto de acionamento diferente e como neste desenvolvimento estão sendo consideradas as cargas de 4 e 6 ton, dois conjuntos foram abordados.

Figura 13 – Estruturas em C desenvolvidas a partir do estudo das estruturas fabricadas

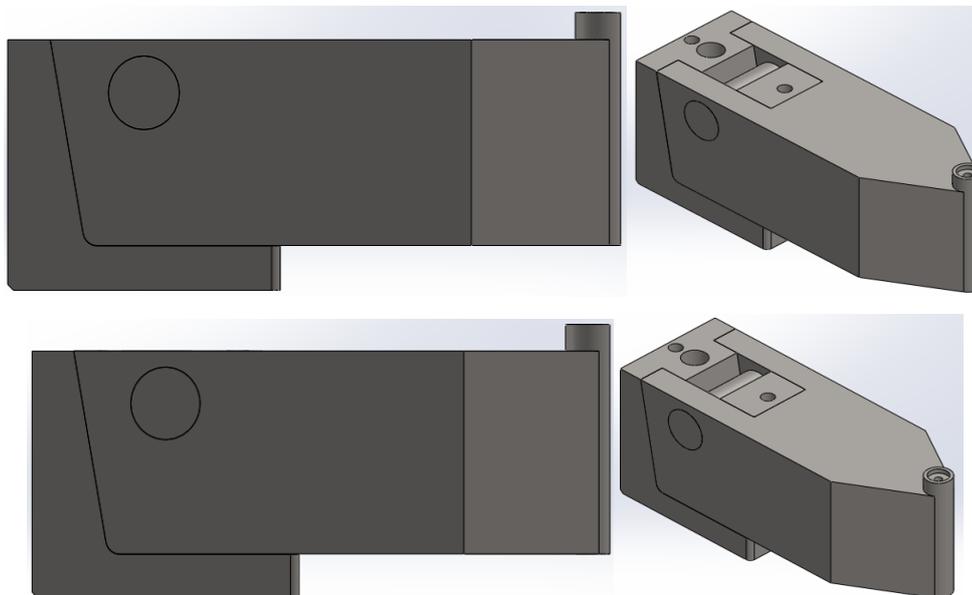


Fonte: Autora (2018).

O cilindro hidropneumático é um atuador mecânico usado para aplicar uma força através de um percurso linear. Em seu funcionamento apresenta um curso de aproximação pneumática que ao encontrar uma resistência, automaticamente aciona o curso de força completando a operação. Em relação à diferença entre os cilindros hidropneumáticos considerados no projeto, a fixação e tamanho do cabeçote dos mesmos foram os maiores dilemas enfrentados. E para resolvê-los foi definida uma medida de fixação padrão para esses dois modelos visando à utilização de um mesmo corpo fundido para dois tamanhos diferentes de cilindros. Porém, tiveram que ser mantidos suas dimensões originais e por esta razão foram

desenvolvidos dois queixos com comprimentos diferentes, mostrados na Figura 14, para suprir a distância necessária (oito milímetros) para a centralização da ferramenta de clinching. As mudanças na configuração dos cilindros serão realizadas pelo fabricante do mesmo.

Figura 14 – Modelagem dos queixos móveis



Fonte: Autora (2018).

A modelagem da estrutura em C foi desenvolvida com base no tamanho do cabeçote do cilindro maior, já que os dois têm a mesma altura e apenas a largura do local de fixação no corpo será diferente. Para remediar esteticamente a diferença entre os cabeçotes foi projetada uma placa de ajuste que será posicionada entre o corpo e o cilindro para fazer gradualmente essa redução. Outra maneira de resolver esta situação seria pedir à fundição que coloque um calço no molde para dimensionar a largura do local de fixação no corpo conforme o cilindro menor.

O Booster hidropneumático é um equipamento usado para amplificar a força de fluídos hidráulicos, funcionando através do diferencial de área que existe entre a câmara hidráulica e a câmara pneumática, podendo desta forma trabalhar com fluido hidráulico em alta pressão. Quanto à diferença entre os dois modelos utilizados no projeto a desigualdade ocorre em suas alturas, o que dificultam suas fixações já que ela é realizada por meio do aparafusamento de suas extremidades inferiores. Para resolver este empasse, a nova geometria foi projetada para contemplar as duas alturas de fixação, pois foram modeladas duas áreas de marcação para os parafusos serem posicionados nas duas situações.

4.3 DEFINIÇÕES DOS MATERIAIS

Como já dito anteriormente, o material selecionado para o desenvolvimento da estrutura em C a ser fabricada por meio do processo de fundição será o ferro fundido nodular FE 70002, pois apresenta características comparáveis aos do aço médio carbono como os aços SAE 1045 e A36 utilizados atualmente e que serão substituídos.

As placas de ajustes dos cilindros serão fabricadas em aço SAE 1045 conforme a utilização recorrente desse material para este fim, observada no estudo das estruturas já fabricadas. Já para a confecção do queixo, que será manufaturado mediante a usinagem avançada, foi optado pelo aço ferramenta AISI D2 por apresentar propriedades mecânicas adequadas à aplicação e excelente desempenho nas simulações.

O AISI D2 é um aço ferramenta de alto carbono que possui elevado teor de cromo ligado com molibdênio e vanádio, é caracterizado por alta resistência ao desgaste (tanto abrasivo quanto adesivo), alta resistência à compressão, boas propriedades de endurecimento, alta estabilidade no endurecimento e boa resistência à revenimento. Sua maior aplicabilidade é no segmento metal-mecânico, principalmente na indústria de conformação e corte a frio.

Para a análise foi necessário representar o cilindro hidropneumático, porém não foi possível obter as informações referentes ao aço utilizado pelo fabricante do mesmo e por esta razão definiu-se o aço SAE 1045 para realizar a simulação. Na Tabela 6 são descritas as propriedades mecânicas dos materiais utilizadas no programa Ansys Workbench. São estas, densidade (ρ), módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), módulo de compressibilidade (K), módulo de cisalhamento (G), limite de escoamento (LE) e limite de resistência à tração (LRT).

Tabela 6 – Propriedades dos materiais utilizados nas simulações

Material	ρ (kg/m ³)	E (GPa)	ν	K (GPa)	G (GPa)	LE (MPa)	LRT (MPa)
SAE 1045	7850	205	0,29	162,7	79,457	530	625
FE 70002	7250	185	0,29	146,83	71,705	440	700
AISI D2	7720	210	0,3	175	80,77	1470	1920

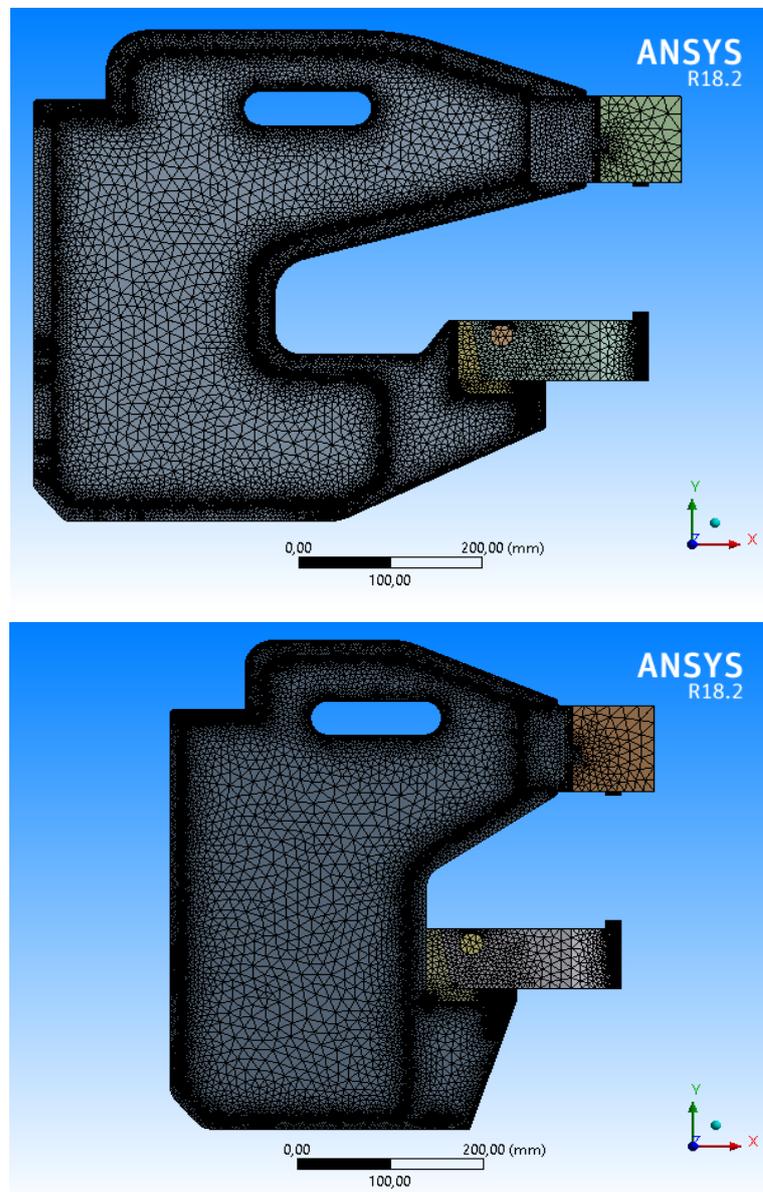
Fonte: Autora (2018).

Após a finalização da geometria e da escolha do material, a modelagem foi importada para o programa Ansys Workbench a fim de ser realizada uma análise mais apurada que a efetuada pelo programa Solidworks.

4.4 DISCRETIZAÇÃO DAS GEOMETRIAS

A malha inicial foi gerada na forma padrão no programa SolidWorks. No programa Ansys Workbench utilizou-se o método tetraédrico, que se mostrou o melhor para esta aplicação, com a função de tamanho de proximidade e curvatura, relevância, ângulo de amplitude e smoothing médios, transição lenta e definição de 1 mm para tamanho mínimo, tamanho mínimo de proximidade e defeature. Essa configuração foi aplicada para os dois modelos das montagens das estruturas em C com os queixos, as placas de ajuste do cilindro e a representação do cabeçote do cilindro, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Discretização das geometrias desenvolvidas



Fonte: Autora (2018).

Percebe-se que essa configuração gerou um refinamento da malha nos pontos mais essenciais, que são o queixo e local onde é fixado o cilindro hidropneumático. A discretização das geometrias produziram os dados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados da malha gerada para as geometrias na forma de montagem

Tamanho da garganta (mm)	408	400	208	200
Número de nós	1982903	1979212	1635815	1653267
Número de elementos	1360773	1358330	1118816	1131174
Medida da malha	Qualidade do elemento			
Mínimo	0,14539	0,20916	0,12949	6,05692E-02
Máximo	0,99999	0,99999	0,99998	0,999993
Médio	0,83196	0,83209	0,83195	0,831816
Desvio padrão	9,56132E-02	9,551601E-02	9,58063E-02	9,58845E-02

Fonte: Autora (2018).

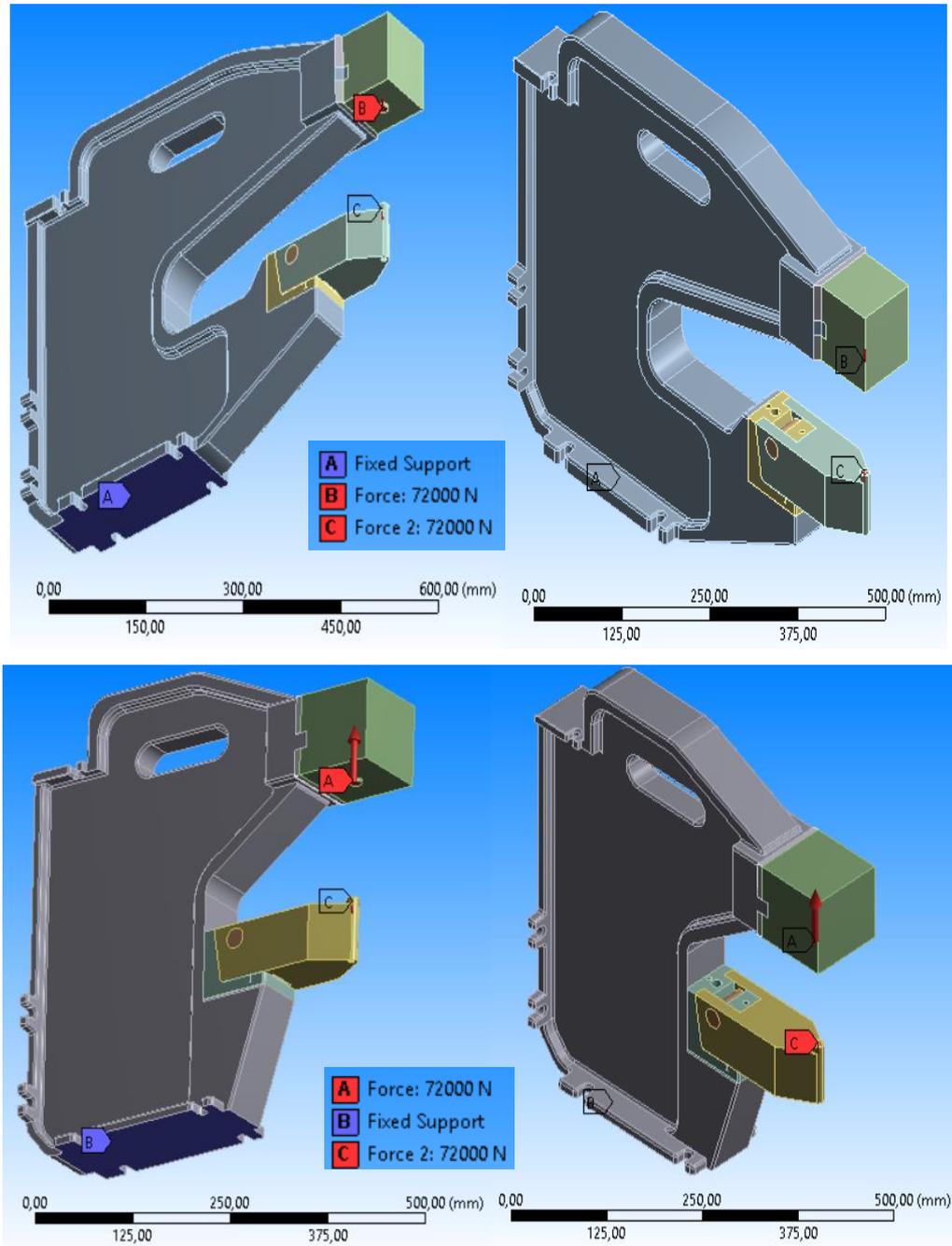
Devido à incapacidade do computador onde foram executadas as análises e tempo limitado, não foi possível fazer um refinamento mais apurado em nenhuma das malhas geradas neste trabalho. O tempo de simulação para cada estrutura foi de aproximadamente uma hora no computador do laboratório da universidade, que possui capacidade mediana para esse tipo de aplicação.

4.5 CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno aplicadas para a análise estrutural foram, a fixação da estrutura em C na parte inferior representando sua fixação no pedestal, e a aplicação de uma força de 72 kN na ponta do queixo onde será instalada a ferramenta e outra na face do cubo que representará o cabeçote do cilindro hidropneumático, aparato responsável pela aplicação da força no queixo. A força foi calculada acrescentando-se 20% na carga de 6 ton definida como meta para este desenvolvimento. As condições de contorno são apontadas na Figura 16.

No programa SolidWorks as condições de contorno são aplicadas antes de gerar a malha, já no programa Ansys Workbench a malha é gerada antes da aplicação das mesmas. Apesar de a análise inicial ter sido realizada no programa SolidWorks optou-se por não apresentar esses resultados, pois os mesmos não apresentaram a eficácia necessária para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 16 – Condições de contorno aplicadas nas geometrias desenvolvidas



Fonte: Autora (2018).

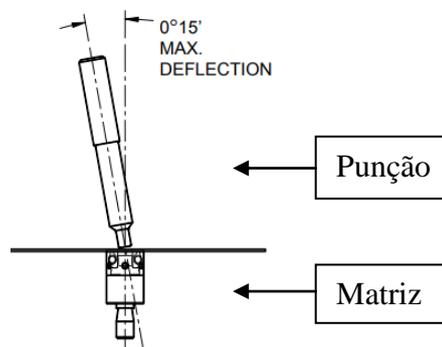
4.6 CONFIGURAÇÕES DO TIPO DE ANÁLISE

Após a discretização das geometrias e da aplicação das condições de contorno, são definidos os tipos de resultados que os programas deverão retornar com a solução da simulação. Para a escolha destes parâmetros foi levada em consideração a restrição de deslocamento pela qual as estruturas em C são impostas. Essa prescrição vem da necessidade

de centralização do conjunto de ferramentas de clinching utilizado, que acaba por definir o deslocamento máximo admitido pela abertura da geometria para a realização e garantia da qualidade do ponto de clinching e a prevenção da quebra ou desgaste precoce das ferramentas.

Existem algumas recomendações de medidas de centralização desse conjunto, porém apenas a deflexão máxima permitida entre as ferramentas, apresentada na Figura 17, será considerada para realizar o cálculo que indicará o deslocamento máximo tolerado para a abertura das geometrias em razão da carga aplicada.

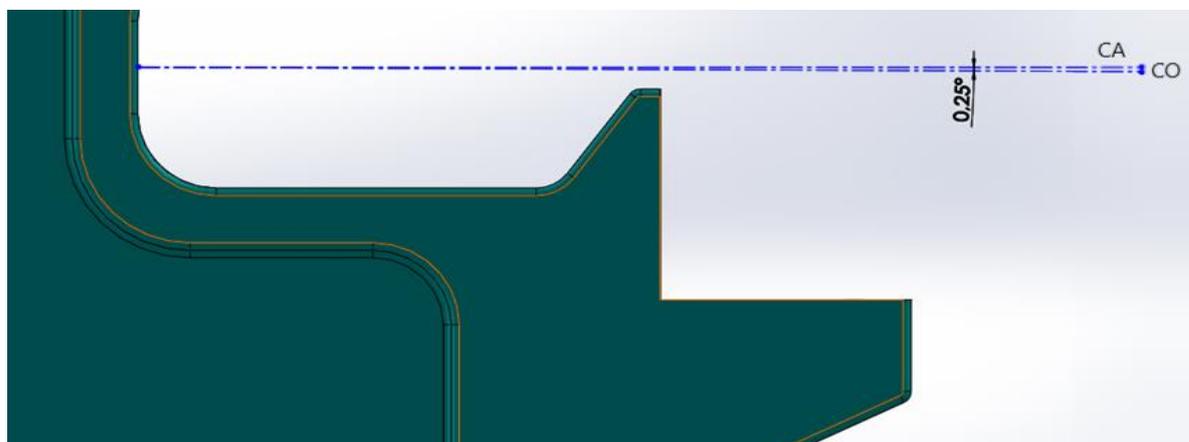
Figura 17 – Deflexão máxima admitida entre o conjunto de ferramentas de clinching



Fonte: BTM (2018, p. 11).

No cálculo efetuado, o punção sempre será considerado como totalmente alinhado, o que é uma suposição válida já que sua fixação é bastante precisa e eficiente. Para a realização dessa operação será construída uma linha horizontal alinhada com a ferramenta matriz que vai do seu centro até a abertura máxima da garganta na horizontal, onde será aplicado o ângulo de deflexão exigido de $0^{\circ}15'$ que equivale a $0,25^{\circ}$, como exposto na Figura 18.

Figura 18 – Representação do cálculo do deslocamento máximo



Fonte: Autora (2018).

Nota-se que, com a criação do triângulo o deslocamento máximo será o cateto oposto ao ângulo de $0,25^\circ$ e como o cateto adjacente é a medida da garganta, esse cálculo é efetuado de forma simples mostrado a seguir. Esse cálculo foi desenvolvido pela microempresa GPTech e será seguido para o desenvolvimento deste trabalho.

$$\tan \theta = \frac{CO}{CA} \quad (1)$$

Resultando nos seguintes deslocamentos máximos permitidos para as estruturas em C desenvolvidas, listados na Tabela 8.

Tabela 8 – Deslocamentos máximos permitidos

Medida da garganta (mm)	Deslocamento máximo permitido (mm)
200	0,87
208	0,91
400	1,74
408	1,78

Fonte: Autora (2018).

O maior objetivo do projeto é construir uma estrutura segura que não ultrapasse os valores de deslocamentos admitidos. Visando essa meta, foram selecionados os dados a serem exibidos após gerada a solução. Sendo eles, deslocamento ou deflexão total (d), deformação elástica equivalente (ϵ), tensão equivalente de von Mises (σ) e fator de segurança (FS).

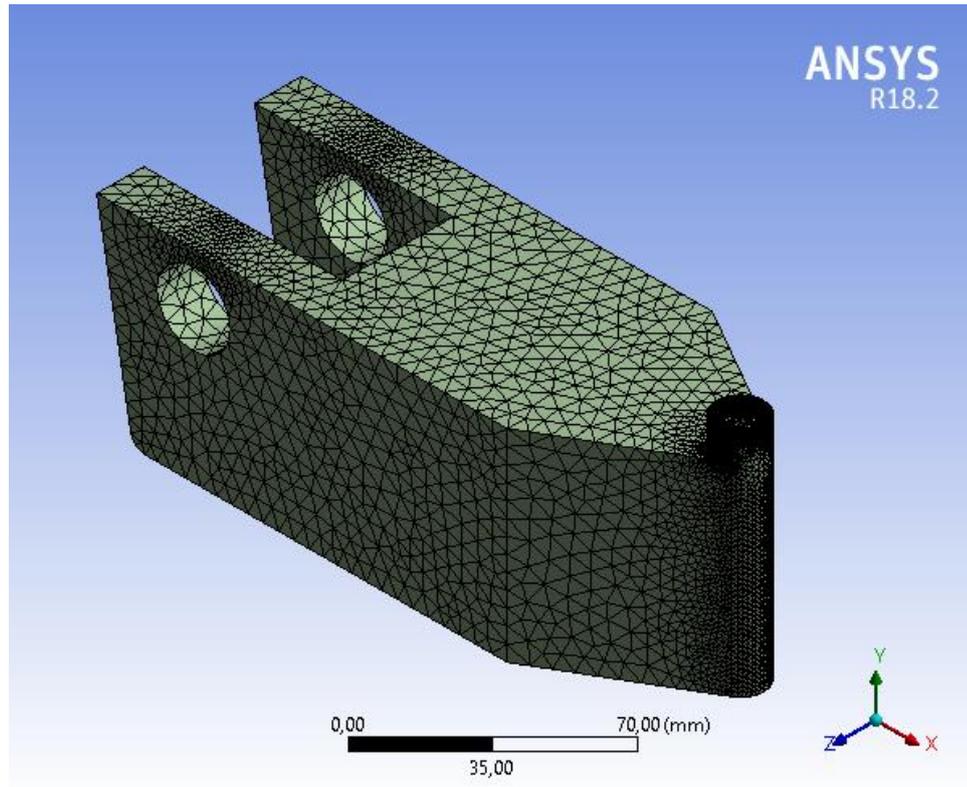
4.7 ANÁLISE DA PARTE MÓVEL DO SUPORTE DA FERRAMENTA

O local mais solicitado durante o processo de formação do ponto de clinching é situado na ponta do suporte da ferramenta matriz, por esta razão a parte móvel do queixo será analisada separadamente de modo que seja analisado mais a fundo a segurança desta região.

4.7.1 Simulação

Para a simulação da parte móvel do queixo foi selecionada a mesma malha utilizada na análise da estrutura completa. A malha gerada para o comprimento de 200 mm do queixo completo (menor) é mostrada na Figura 19.

Figura 19 – Discretização da parte móvel do queixo analisado separadamente



Fonte: Autora (2018).

Como a diferença entre os dois tamanho de queixo é de apenas 8 mm, optou-se por analisar apenas o de menor tamanho. As estatísticas da malha são apresentadas na Tabela 9.

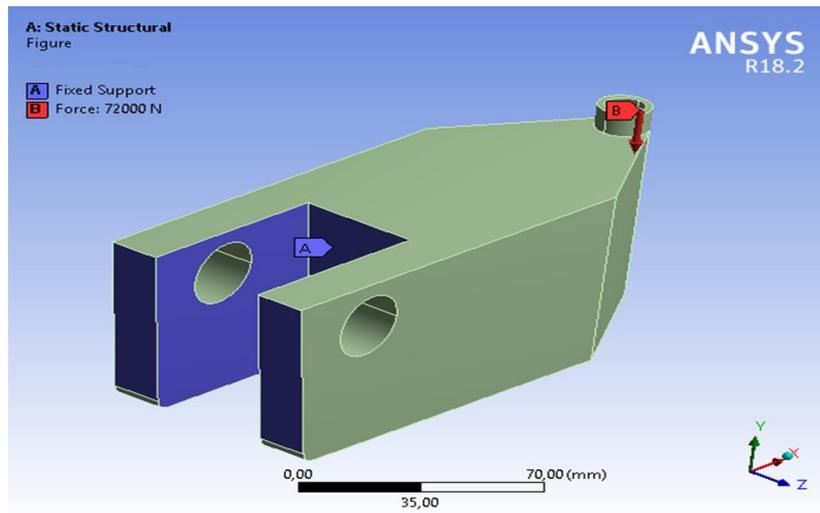
Tabela 9 – Dados da malha gerada para as geometrias na forma de montagem

Tamanho da parte móvel (mm)	193
Número de nós	165249
Número de elementos	111888
Medida da malha	Qualidade do Elemento
Mínimo	0,10623
Máximo	0,99997
Médio	0,83334
Desvio padrão	9,42625E-02

Fonte: Autora (2018).

As condições de contorno para esta análise são a aplicação da força de 72 kN na ponta do queixo onde a matriz será fixada e a consideração do engastamento a partir do último contato da parte móvel com a parte fixa queixo, ilustradas na Figura 20. A partir deste último contato a peça móvel será considerada como em balanço.

Figura 20 – Condições de contorno da parte móvel do queixo analisado separadamente



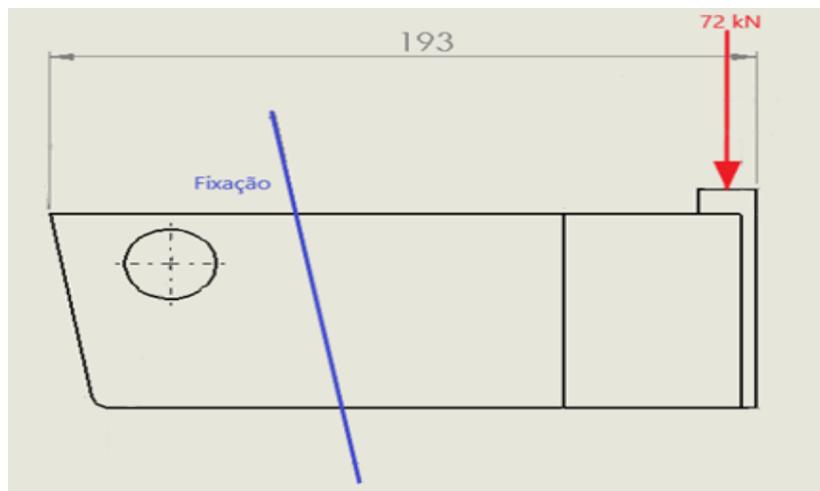
Fonte: Autora (2018).

Os dados seleccionados para serem exibidos após a geração da solução foram os mesmo escolhidos para a estrutura em C montada.

4.7.2 Cálculo Analítico

No intuito de realizar futuras comparações foi efetuado o cálculo analítico da carga estática na região onde a força atua diretamente, ou seja, na parte móvel do queixo considerada em balanço. Para elaborar este cálculo a peça foi considerada como uma viga engastada em balanço, apontada na Figura 21.

Figura 21 – Local da fixação e posição da força



Fonte: Autora (2018).

Todos os cálculos neste tópico foram desenvolvidos com base na teoria de deflexão de vigas apresentada por Pereira (2003). E são relacionados ao local da força aplicada, que não está posicionada exatamente no fim do comprimento da geometria e sim a 185 mm do eixo x e 76,16 mm do eixo y, neste caso a distância do eixo z é zero.

. A Equação 2, a seguir, mostra o cálculo da deflexão máxima da geometria.

$$d = \frac{PL^3}{3EI} \quad (2)$$

Onde:

P = Força aplicada;

L = Comprimento total;

E = Módulo de elasticidade;

I = Momento de inércia.

Para os cálculos foram utilizados os momentos de inércia apurados pelo programa SolidWorks nos três eixos, este e alguns outros dados são mostrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados retirados do programa SolidWorks

Massa (kg)	4,6559
Volume (mm³)	6,0309E+005
Comprimento em x (mm)	193
Comprimento em y (mm)	79
Comprimento em z (mm)	70
Centroide em x (mm)	92,344
Centroide em y (mm)	35,171
Centroide em z (mm)	-1,5565E-015
Momento de inércia em x (kg mm²)	3954,4
Momento de inércia em y (kg mm²)	11234
Momento de inércia em z (kg mm²)	11103

Fonte: Autora (2018).

Resolvendo a Equação 2 obteve-se o valor de 0,183 mm para o deslocamento máximo da geometria estudada. Percebe-se que este valor é muito inferior ao deslocamento máximo permitido de 0,84 mm calculado através do ângulo de deflexão máximo admitido para a realização do ponto de clinching.

Em seguida foi calculada a tensão de flexão máxima situada no exato local da aplicação da força, a Equação 3 apresenta a formulação utilizada para este fim.

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{PLy}{I} \quad (3)$$

Onde:

y = Distância do centro do eixo ao ponto de análise;

σ = Tensão de flexão.

Resultando da equação acima obteve-se o valor de 651, 24 MPa para a tensão na face onde a carga é diretamente aplicada. A Equação 4 abaixo, determina a deformação da geometria, pela lei de Hooke, que será calculada no mesmo ponto em que a tensão de flexão foi prevista.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (4)$$

Onde:

ε = Deformação.

A deformação do local onde a força é diretamente aplicada resultou em 0,00311 mm. Por último, será calculado o fator de segurança do queixo móvel, porém será dado ênfase no mesmo local dos cálculos anteriores. Esse cálculo se dá pela Equação 5 a seguir.

$$N = \frac{S_y}{\sigma} \quad (5)$$

Onde:

N = Fator de segurança;

S_y = Tensão de escoamento do material (LE).

Para o fator de segurança foi encontrado o valor de 2,26 no ponto estudado. No capítulo de resultados e discussões, a seguir, serão comparados os resultados do cálculo analítico com as soluções geradas pela simulação do programa Ansys Workbench para o queixo separado. Serão apresentados também os dados obtidos para a estrutura em C completa, essa etapa é chamada de pós-processamento e inclui a análise dos resultados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a discretização das geometrias e da aplicação das condições de contorno no programa Ansys Workbench, descritas no capítulo anterior, foi realizada a simulação da análise estrutural estática onde obteve-se o comportamento das duas geometrias desenvolvidas. Como o intuito deste trabalho é a substituição do processo de fabricação utilizado atualmente, as simulações foram aplicadas para a estrutura considerando aço SAE 1045 e o ferro fundido nodular FE 70002.

5.1 DEFLEXÃO

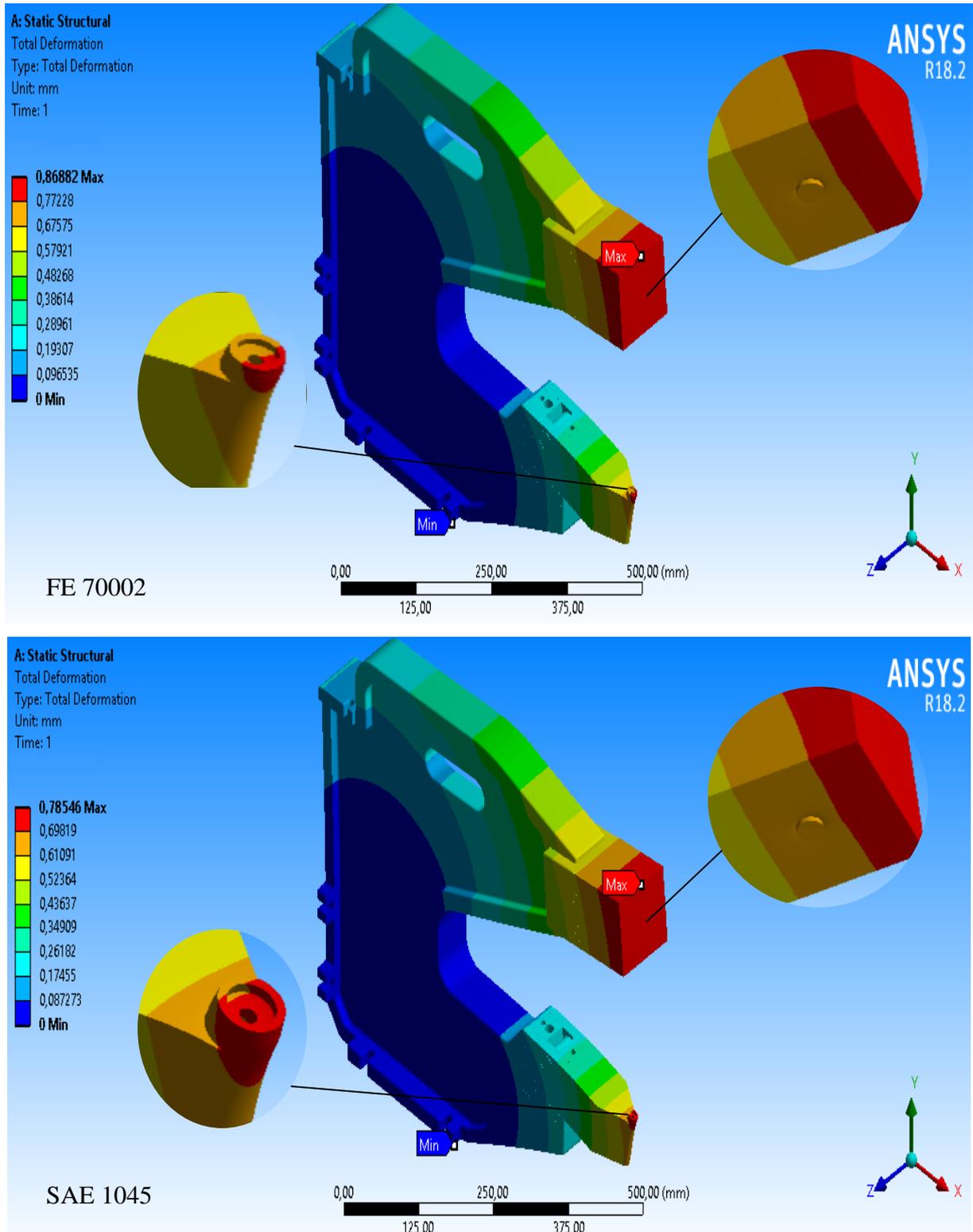
A primeira solução encontrada e a de maior importância para o estudo deste trabalho foi a deformação. Neste ponto é visto o deslocamento máximo que o local onde a ferramenta será instalada irá sofrer com a carga aplicada de 72 kN, sendo o primeiro resultado apresentado o da geometria média com garganta de 408 mm.

Como a diferença entre os tamanhos das gargantas das duas estruturas em C é de apenas 8 mm e o comportamento delas durante as análises foram similares, os resultados das geometrias com a garganta menor serão mostrados apenas nos gráficos construídos no final de cada tópico.

Através da Figura 22 percebe-se que o deslocamento máximo da região da aplicação da carga no ferro fundido nodular foi um pouco maior do que o deslocamento sofrido pelo aço, porém este comportamento era esperado já que o módulo de elasticidade e o limite de resistência ao escoamento do aço são maiores. Apesar do resultado inferior os valores do ferro fundido nodular ficaram dentro do valor máximo calculado.

Os valores apresentados pela simulação mostram apenas o resultado para metade da estrutura (parte de baixo ou parte de cima), para saber o deslocamento total é necessário somar o deslocamento da parte de baixo com o deslocamento da parte de cima.

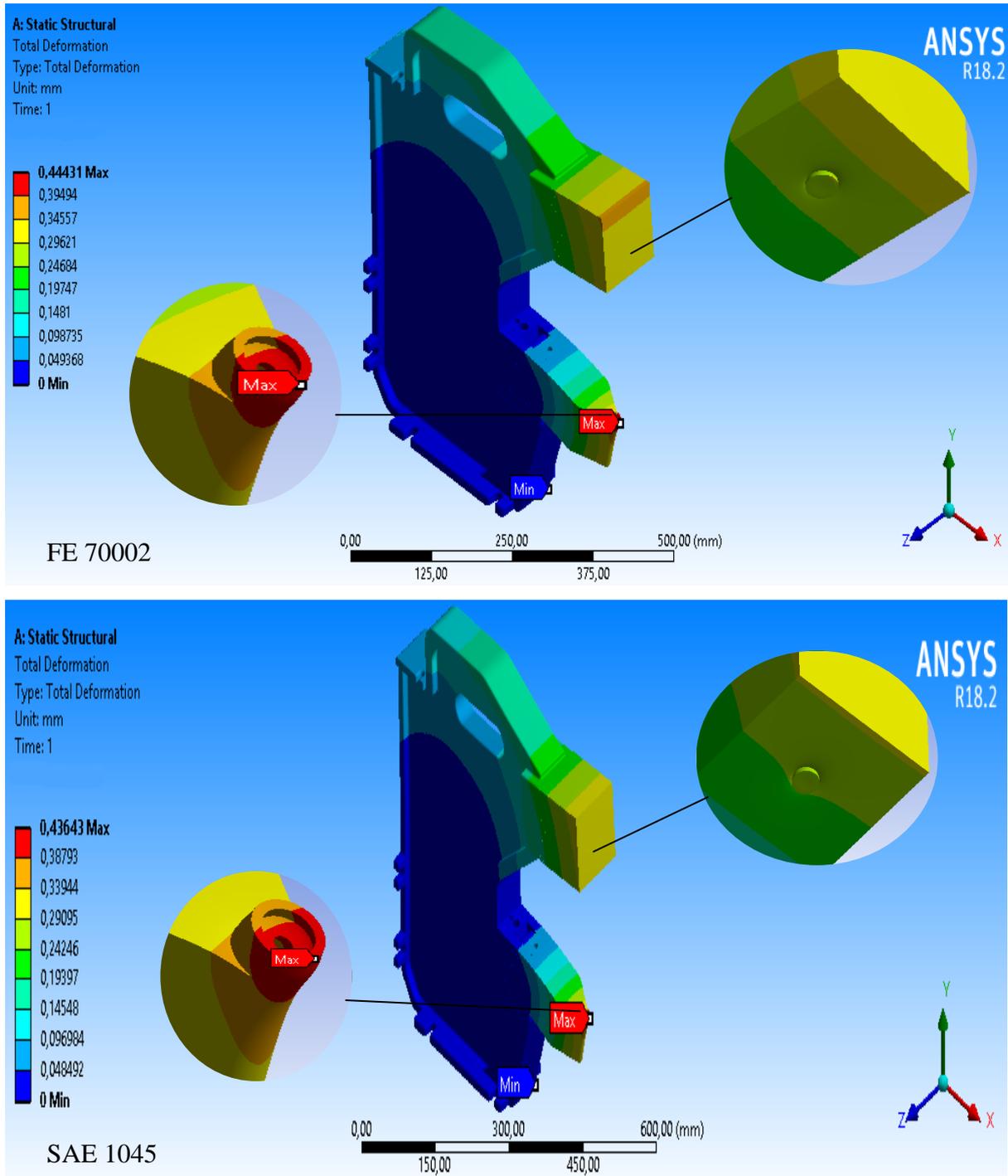
Figura 22 – Deflexão da geometria média para os dois materiais considerados



Fonte: Autora (2018).

O mesmo comportamento da geometria média pode ser visto na geometria pequena com garganta de 208 mm, apresentada na Figura 23.

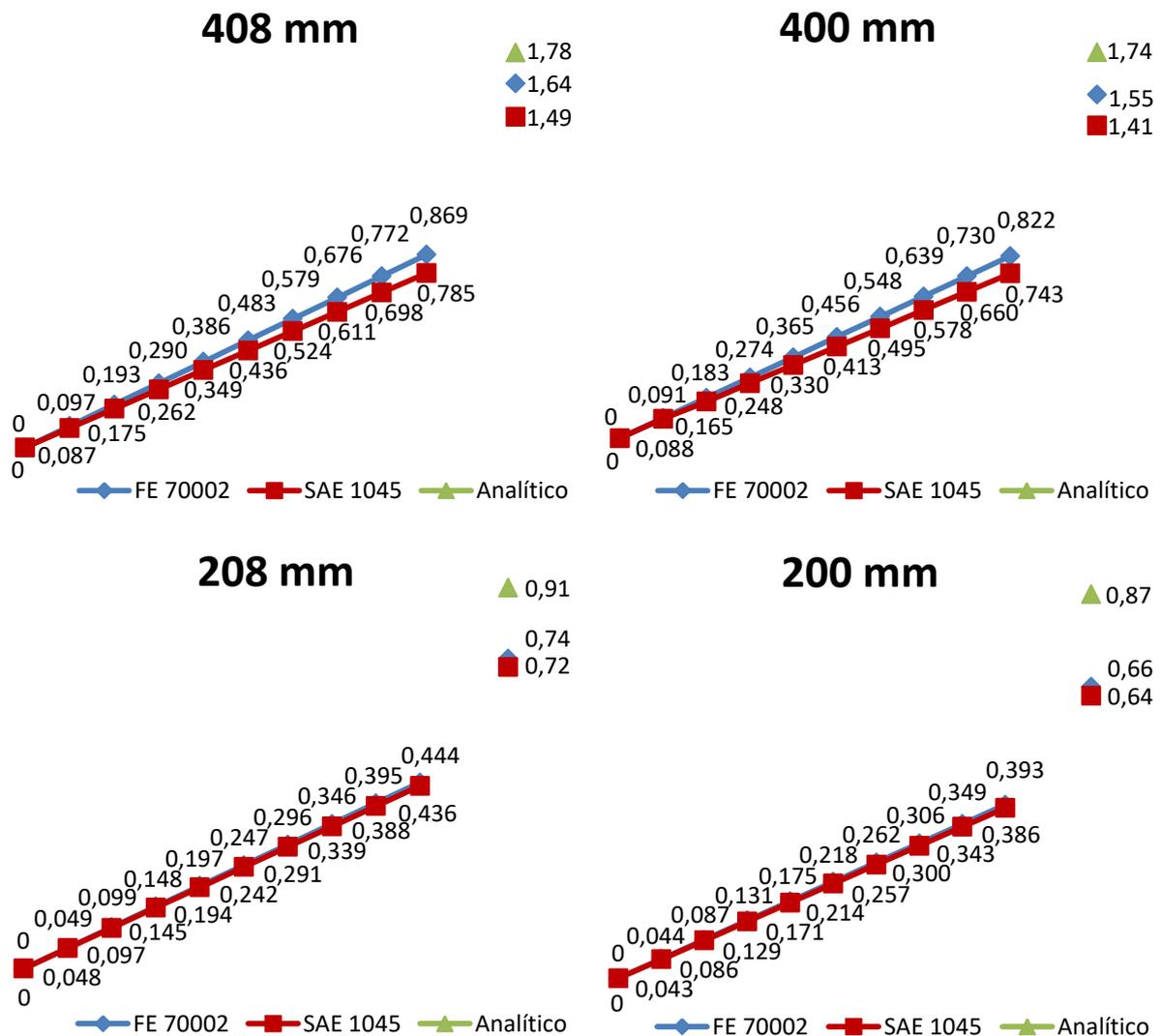
Figura 23 – Deflexão da geometria pequena para os dois materiais considerados



Fonte: Autora (2018).

Para melhor visualização dos resultados, a Figura 24 faz uma comparação gráfica entre os dois materiais estudados e o valor calculado de deslocamento para todas as geometrias desenvolvidas. A parte do gráfico que mostra o crescimento é o resultado obtido pela simulação e os pontos separados são os valores totais (soma da parte de cima com a parte de baixo) de deslocamento simulado e o valor calculado.

Figura 24 – Comparação gráfica para a deflexão



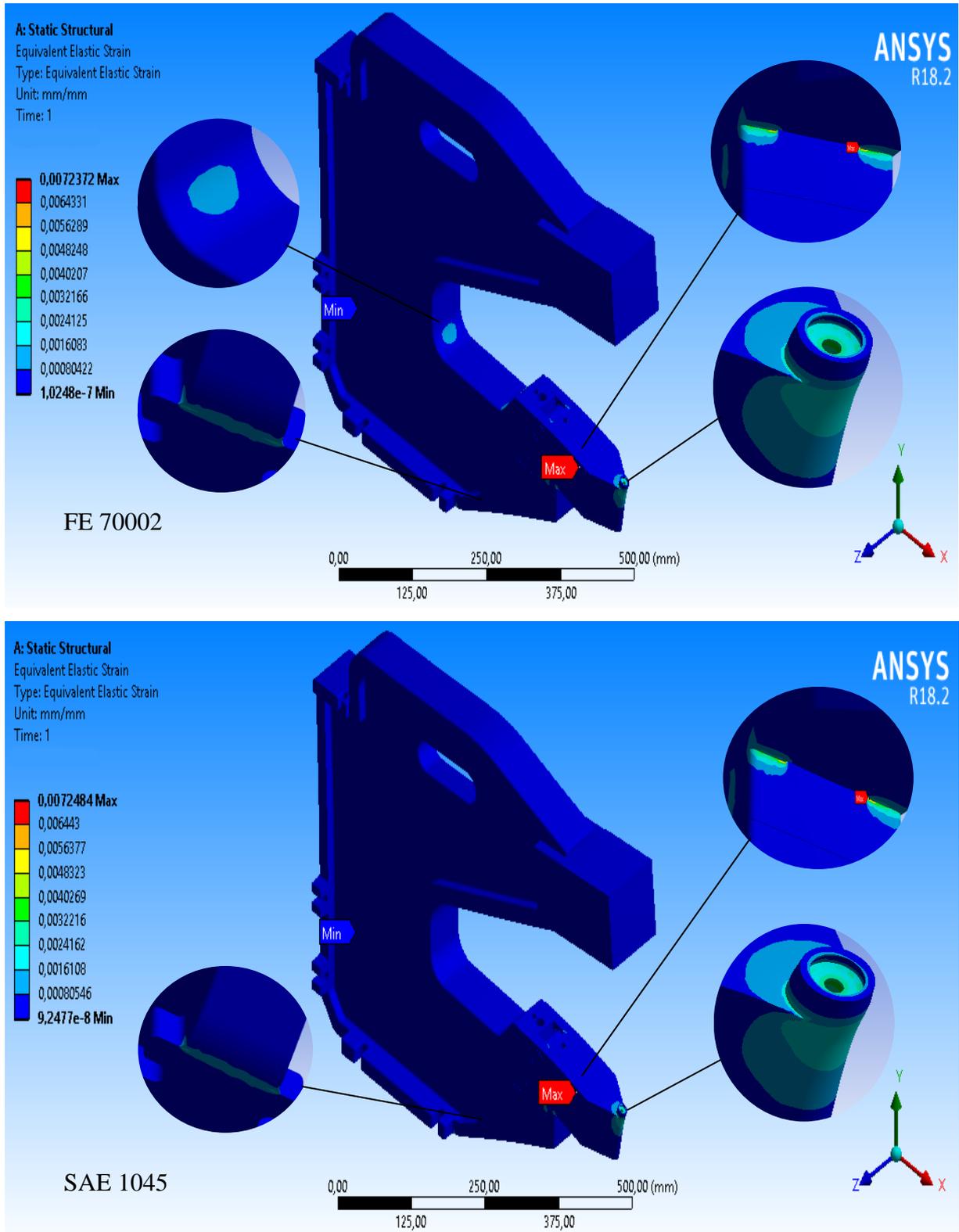
Fonte: Autora (2018).

5.2 DEFORMAÇÃO

A segunda solução retratada foi a deformação sofrida pelas geometrias devido a carga aplicada no local de fixação das ferramentas. A Figura 25 mostra a deformação da geometria média.

Nota-se que as deformações no aço 1045 são ligeiramente maiores que as do ferro fundido nodular, isso é decorrente do limite de resistência à tração ser menor do que a do ferro fundido. Percebe-se também que a deformação máxima não ocorre na ponta do queixo onde a carga é diretamente aplicada e sim no local onde o suporte da matriz passa para o estado em balanço. Assim como para o deslocamento os valores apresentados pela simulação mostram apenas o resultado para metade da estrutura (parte de baixo ou parte de cima).

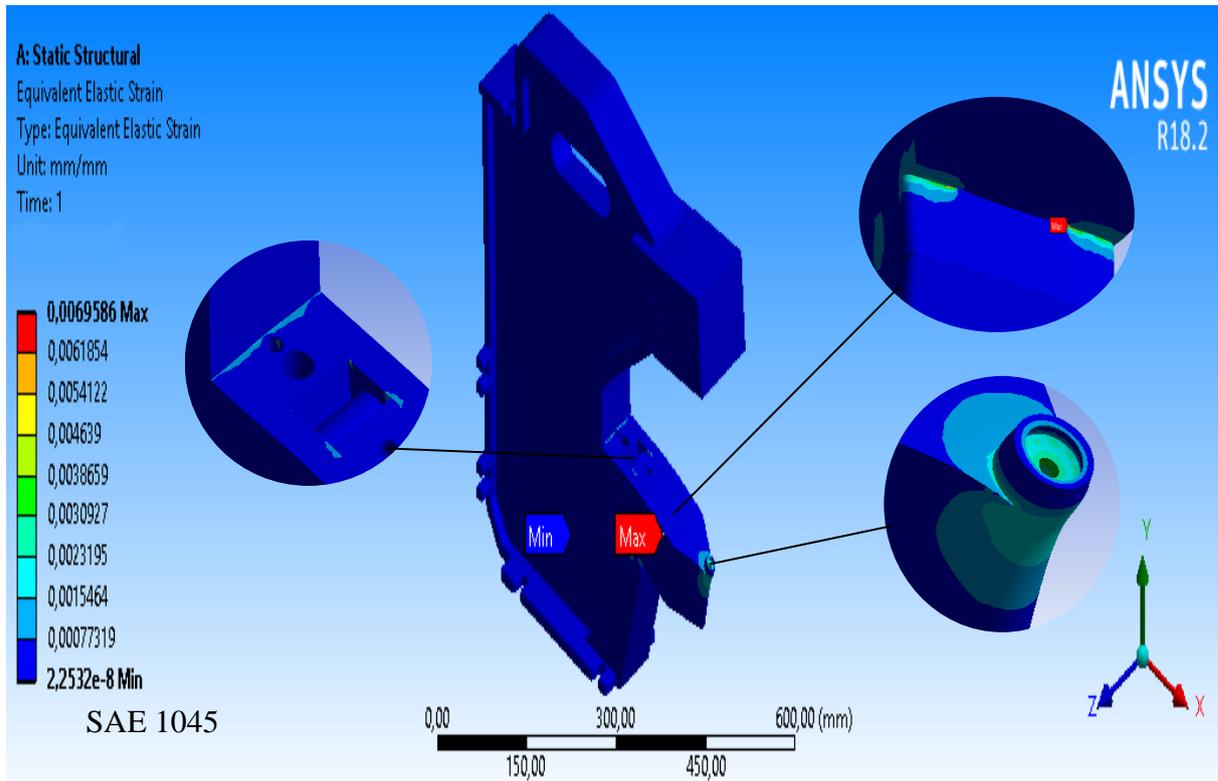
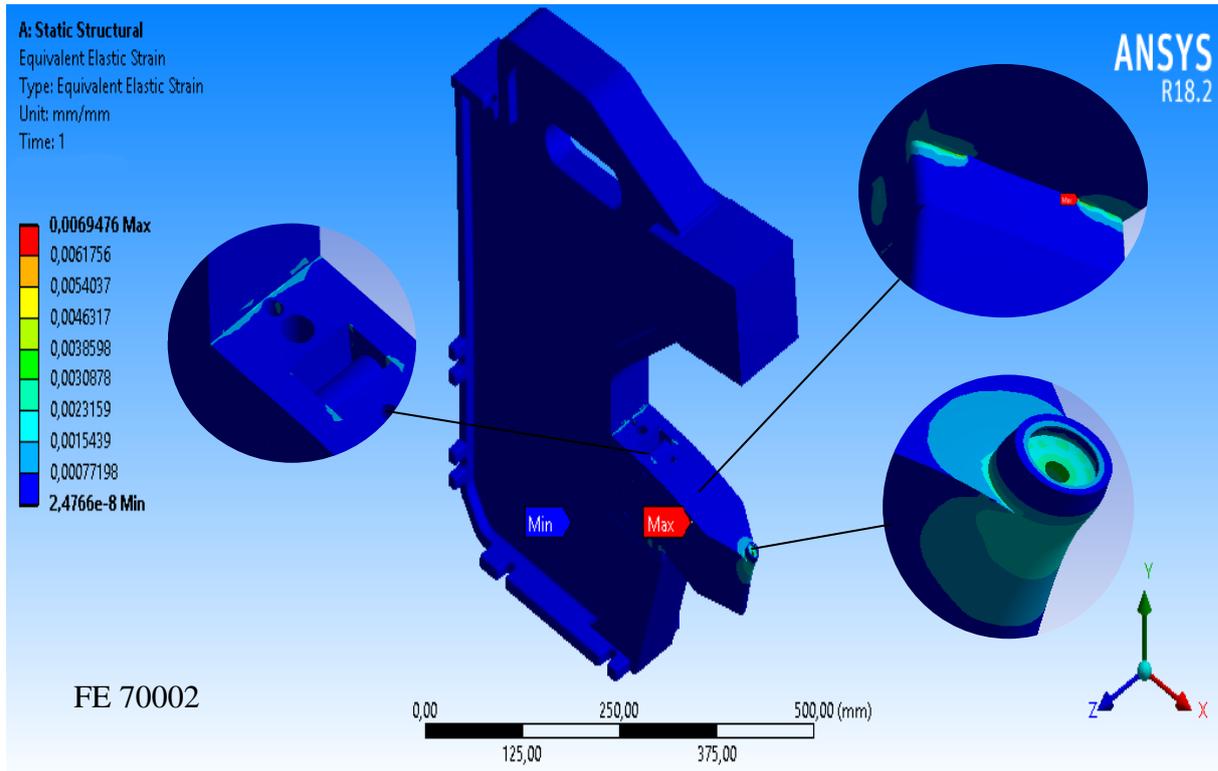
Figura 25 – Deformação da geometria média para os dois materiais considerados



Fonte: Autora (2018).

O comportamento apresentado pela geometria média é também observado nas geometrias pequenas apresentadas na Figura 26.

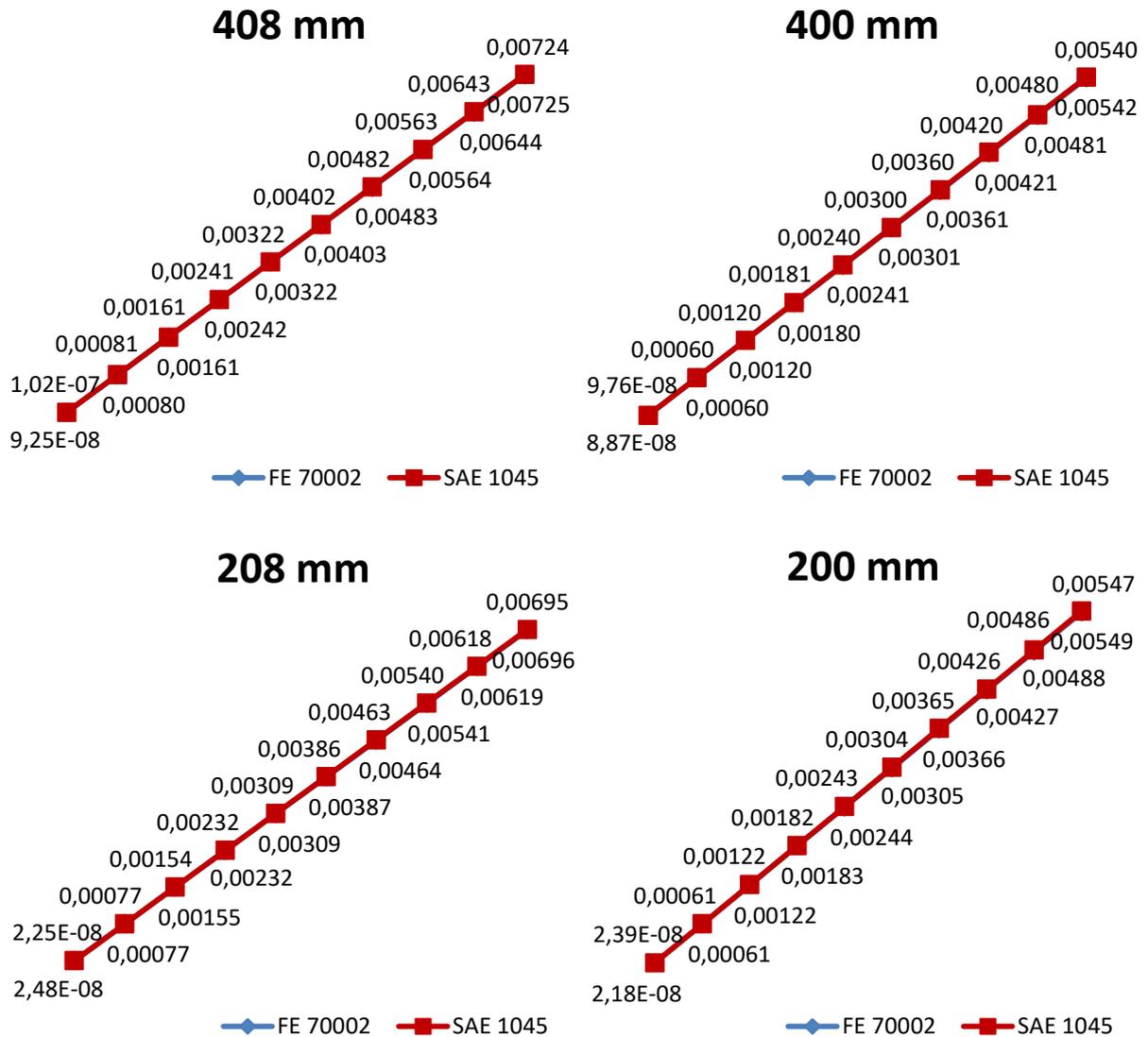
Figura 26 – Deformação da geometria pequena para os dois materiais considerados



Fonte: Autora (2018).

A Figura 27 faz uma comparação da deformação entre os dois materiais estudados para todas as geometrias desenvolvidas.

Figura 27 – Comparação gráfica para a deformação



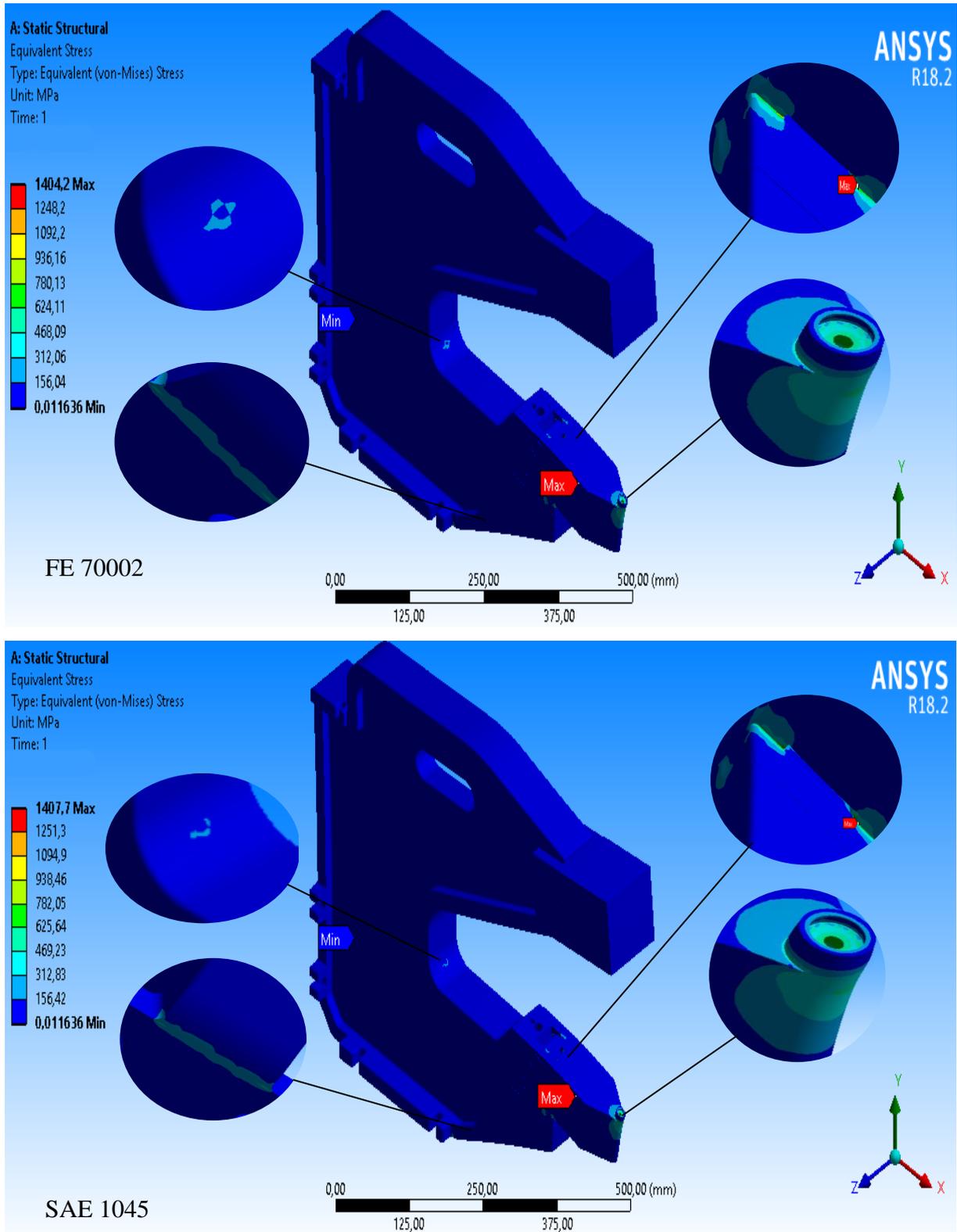
Fonte: Autora (2018).

5.3 TENSÃO EQUIVALENTE DE VON MISES

A terceira solução denotada das simulações de análise estática é a tensão equivalente de von Mises. Assim como para os tópicos anteriores os valores apresentados pela simulação mostram apenas o resultado para metade da estrutura (parte de baixo ou parte de cima), esse estilo de apresentação também é exibido na análise do fator de segurança que será estudado a seguir.

Na Figura 28 têm-se o resultado para a geometria média, onde verifica-se que a tensão equivalente de von Mises se comporta proporcionalmente a deformação da geometria e sua magnitude é mais elevada no aço SAE 1045.

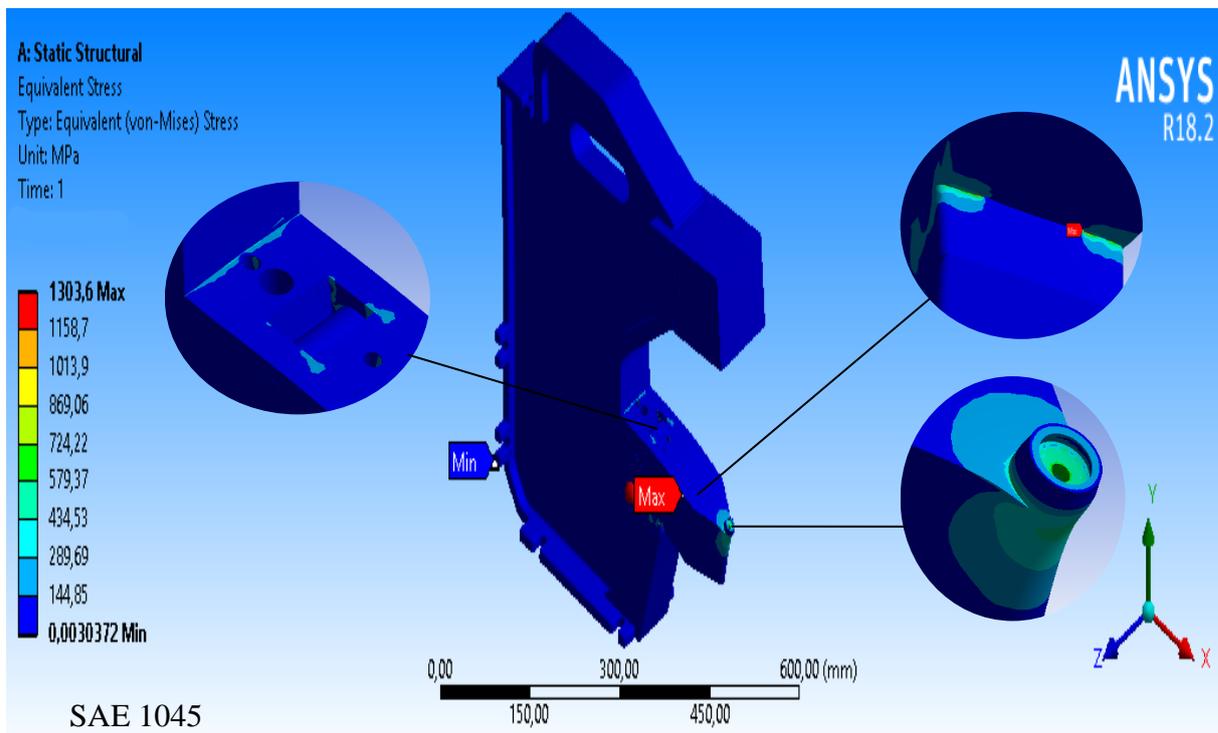
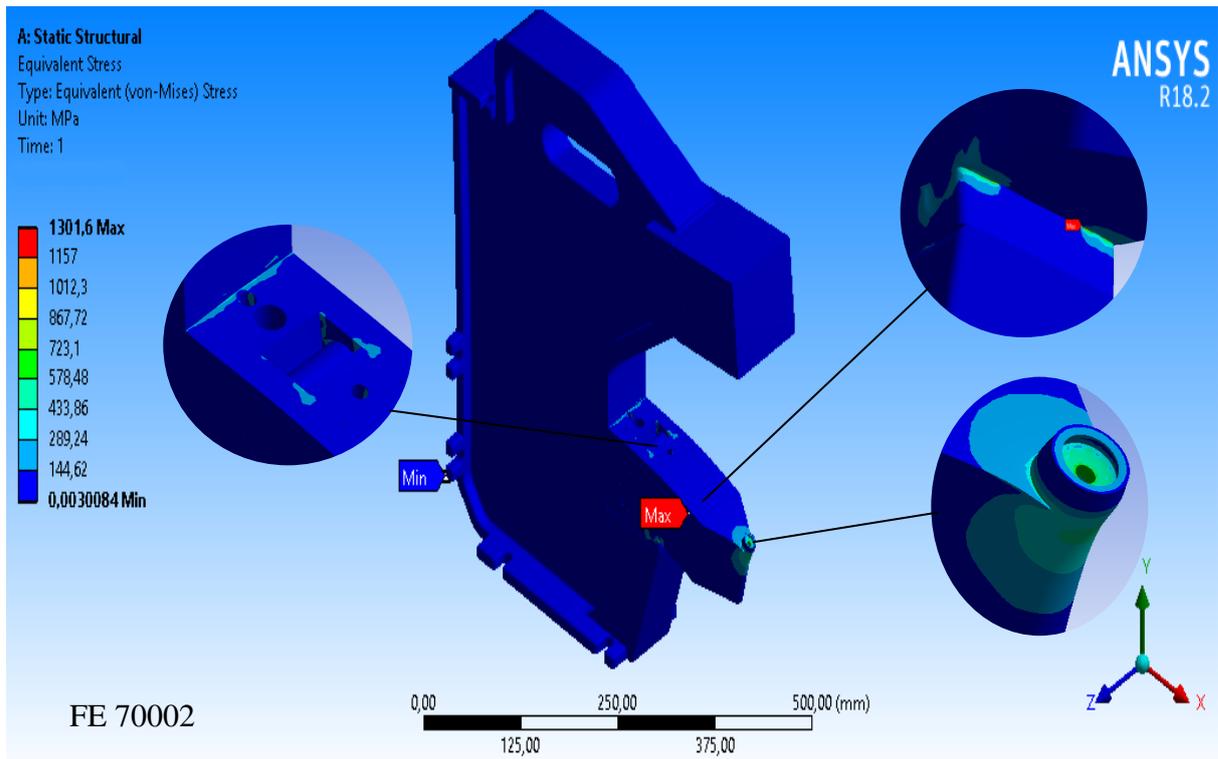
Figura 28 – Tensão de von Mises da geometria média para os dois materiais considerados



Fonte: Autora (2018).

A conduta apresentada na imagem anterior é similar ao que acontece na geometria pequena ilustrada na Figura 29.

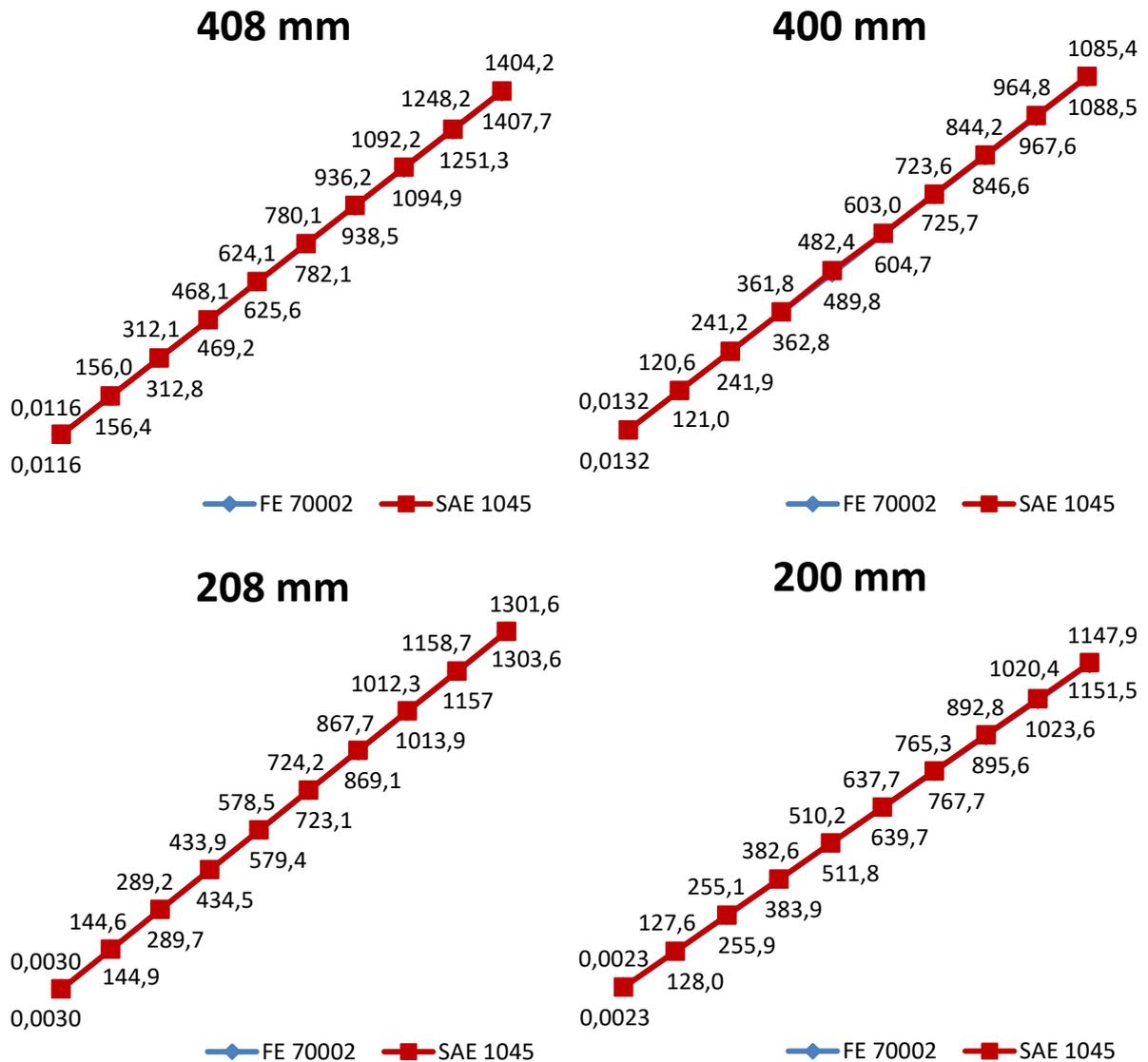
Figura 29 – Tensão de von Mises da geometria pequena para os dois materiais considerados



Fonte: Autora (2018).

A Figura 30 faz uma comparação da tensão equivalentes de von Mises entre os dois materiais estudados para todas as geometrias desenvolvidas. Nota-se que a tensão cresce para todas as estruturas.

Figura 30 – Comparação gráfica para a tensão

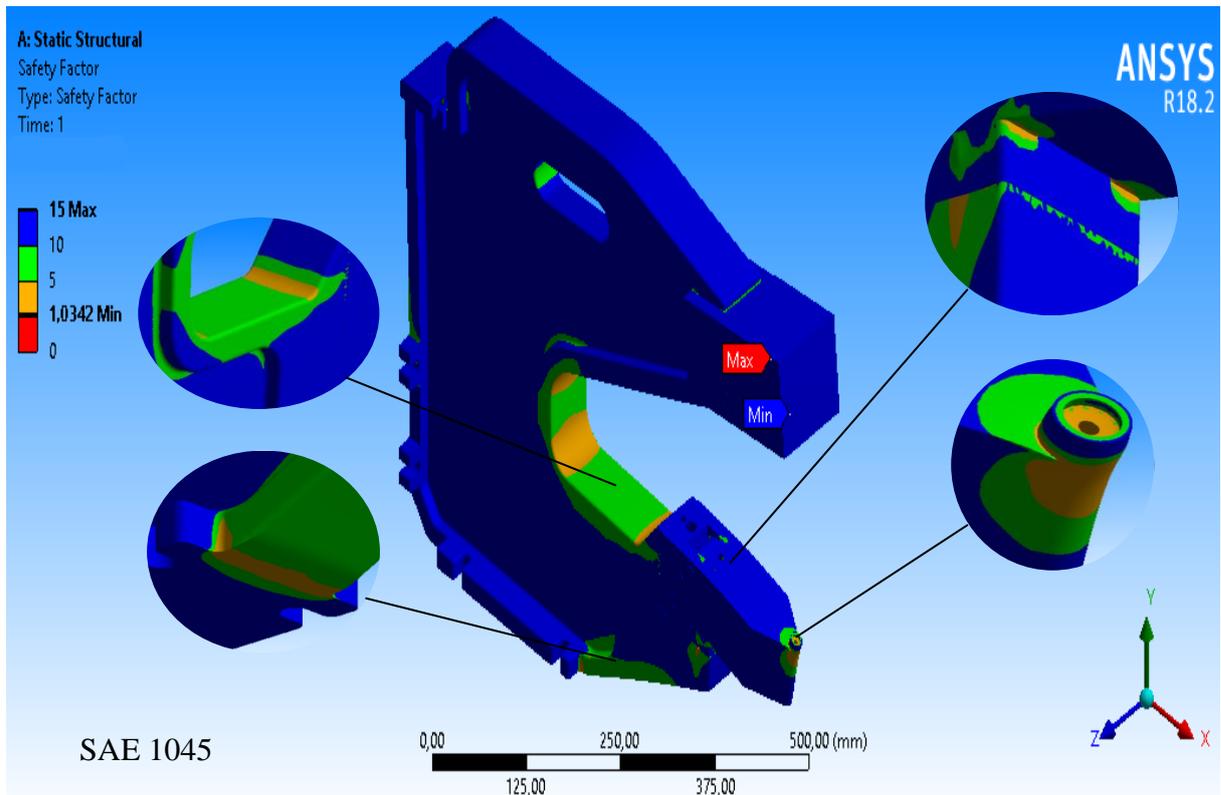
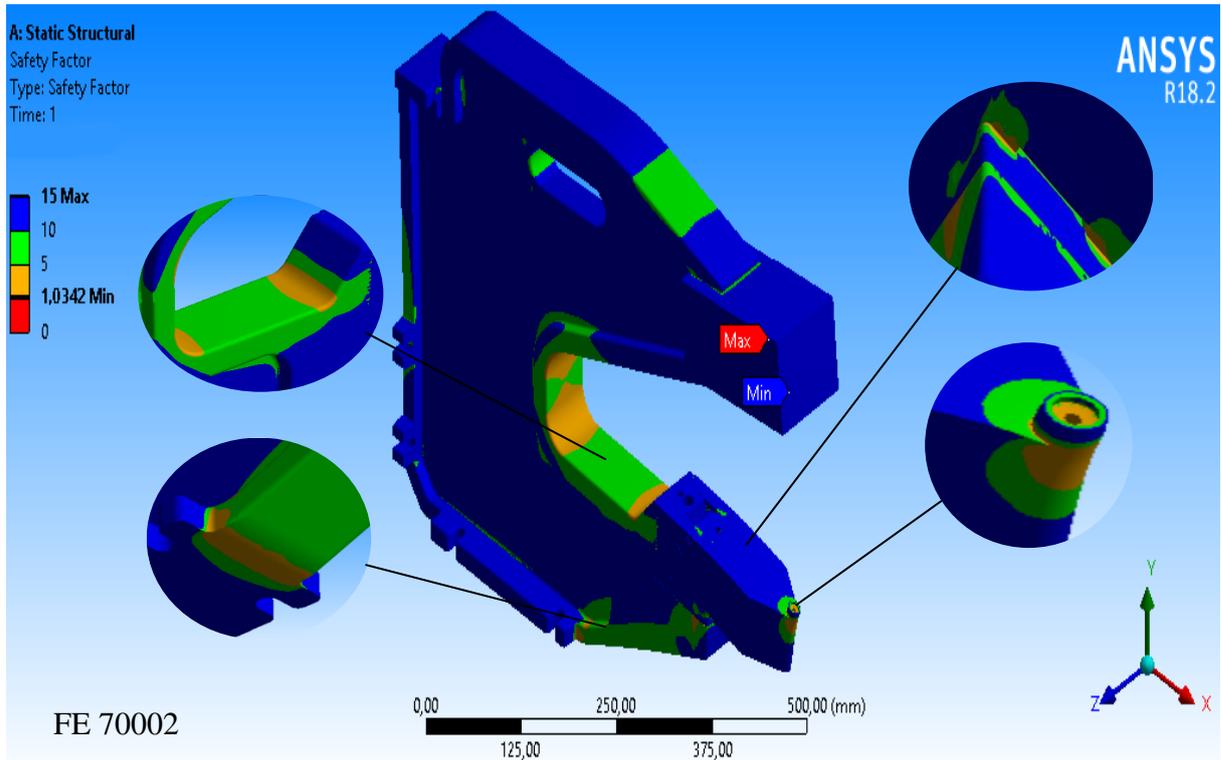


Fonte: Autora (2018).

5.4 FATOR DE SEGURANÇA

A última solução representada foi o fator de segurança, que é de extrema importância para qualquer projeto. A Figura 31 mostra os resultados desses fatores obtidos para a geometria média, onde é visível pelas imagens a seguir que o fator de segurança para a estrutura em C simulada com ferro fundido nodular tem maiores variações na geometria como um todo apesar dos valores máximos e mínimos dos dois materiais terem as mesmas medidas. Apesar de o valor mínimo ser apontado no cubo que representa o cilindro hidropneumático, ele será desconsiderado para este local em virtude do uso de um material não autêntico na simulação, o material utilizado para essa representação foi o aço SAE 1045.

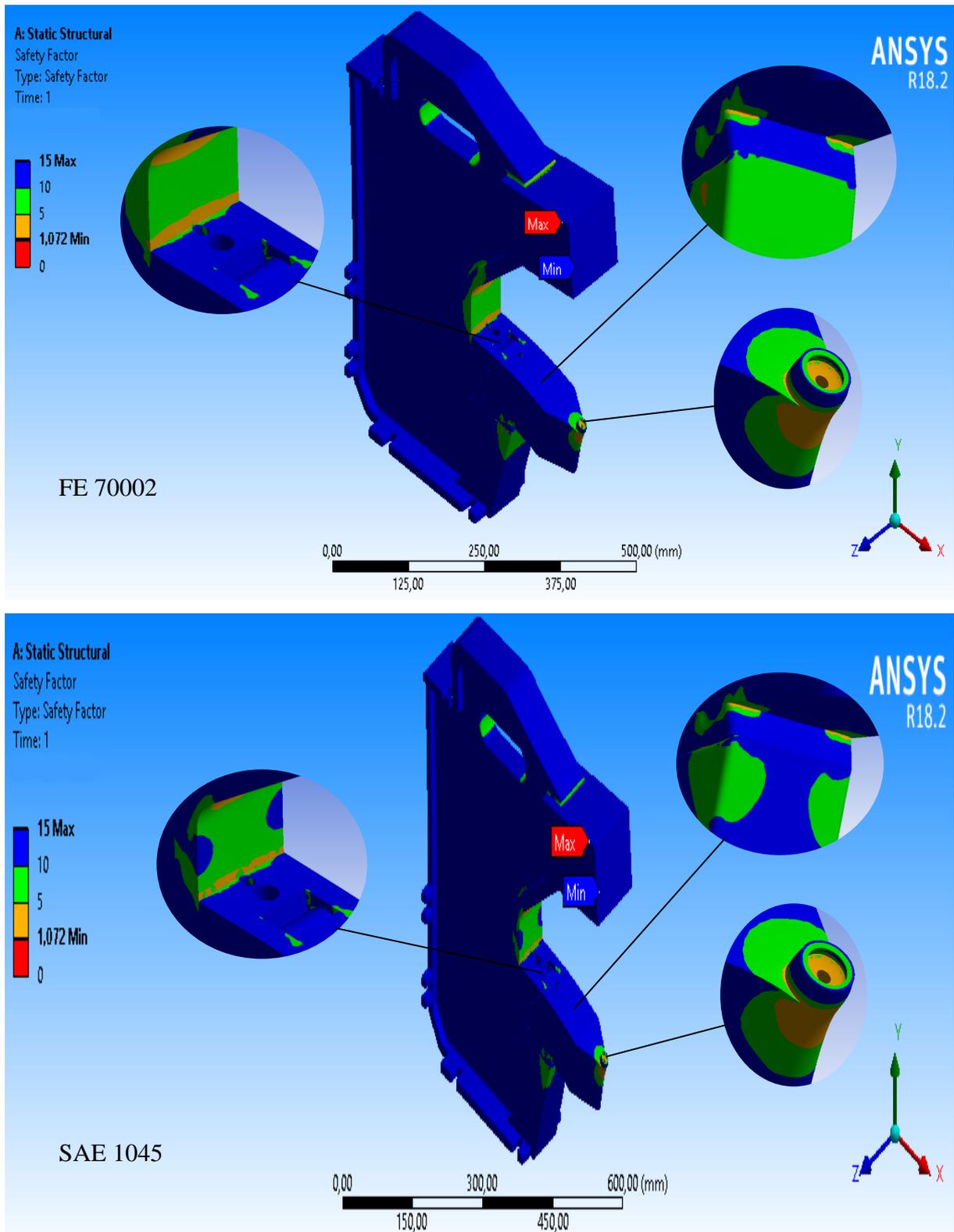
Figura 31 – Fator de segurança da geometria média para os dois materiais considerados



Fonte: Autora (2018).

Na Figura 32 é mostrado o fator de segurança da geometria pequena que obteve o mesmo comportamento da geometria média.

Figura 32 – Fator de segurança da geometria média para os dois materiais considerados

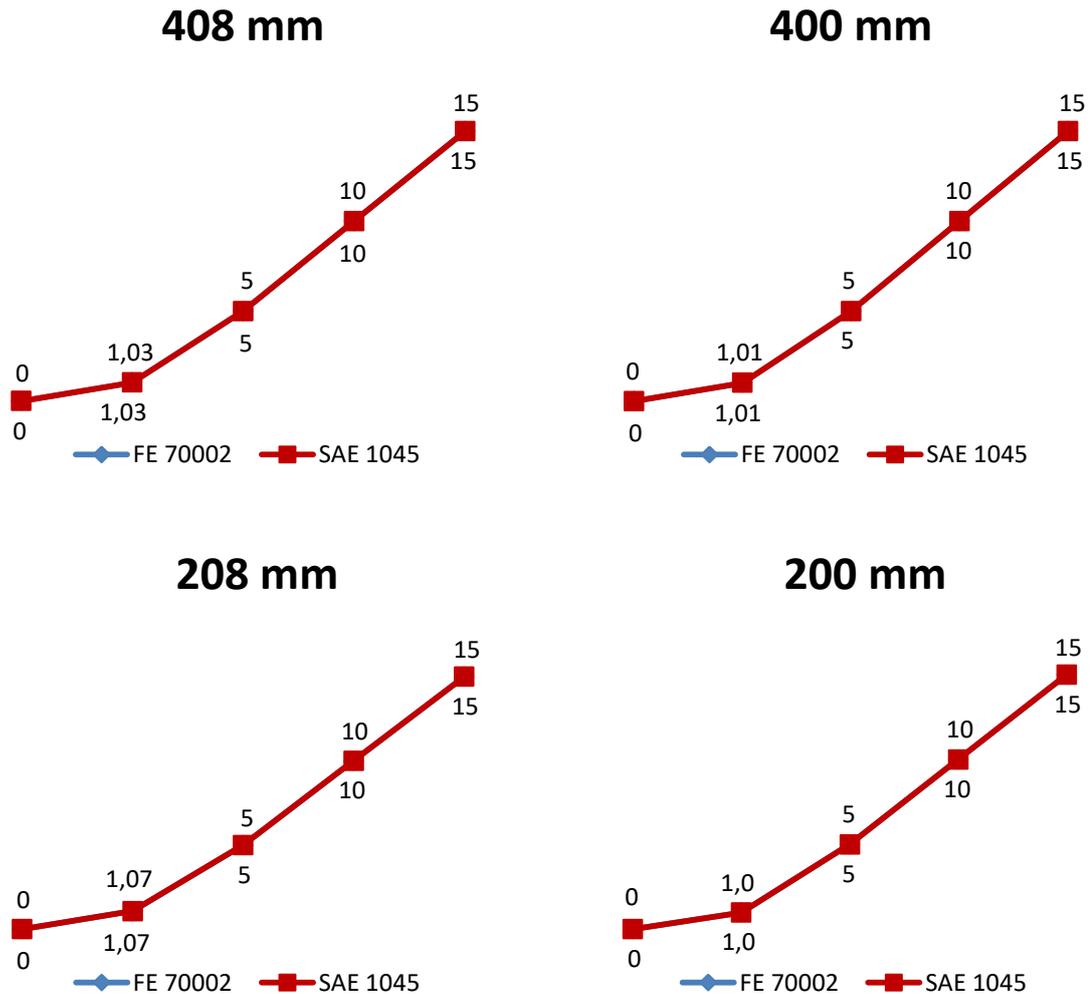


Fonte: Autora (2018).

Com base nos resultados das análises pode-se considerar que o fator de segurança na ponta do queixo (parte laranja) é de aproximadamente 2. Esse valor foi confirmado pela

análise da parte móvel do suporte da ferramenta apresentada no próximo tópico. Na Figura 33 são expostas as comparações dos resultados dos fatores de segurança dos materiais estudados para os dois tamanhos de geometrias. Apesar dos gráficos começarem do zero, os valores mínimos encontrados para os fatores de segurança são maiores do que um.

Figura 33 – Comparação gráfica para o fator de segurança

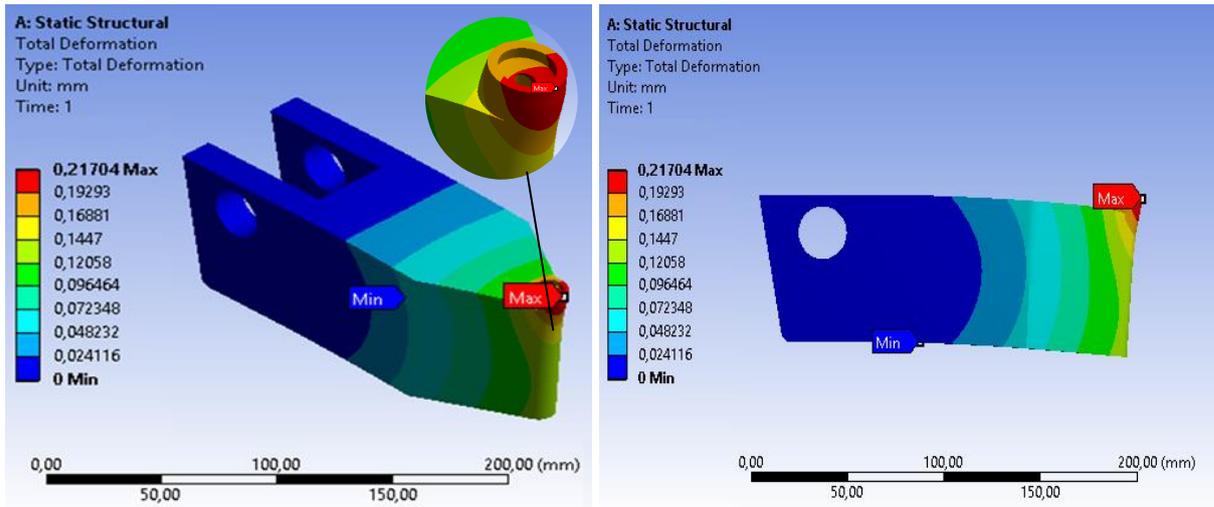


Fonte: Autora (2018).

5.5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO QUEIXO MÓVEL

A seqüência de apresentação dos resultados deste tópico será a mesma efetuada para a estrutura completa e o ponto de análise será sempre o local onde a força de 72 kN é diretamente aplicada. A Figura 34 exibe o resultado do deslocamento obtido através da simulação.

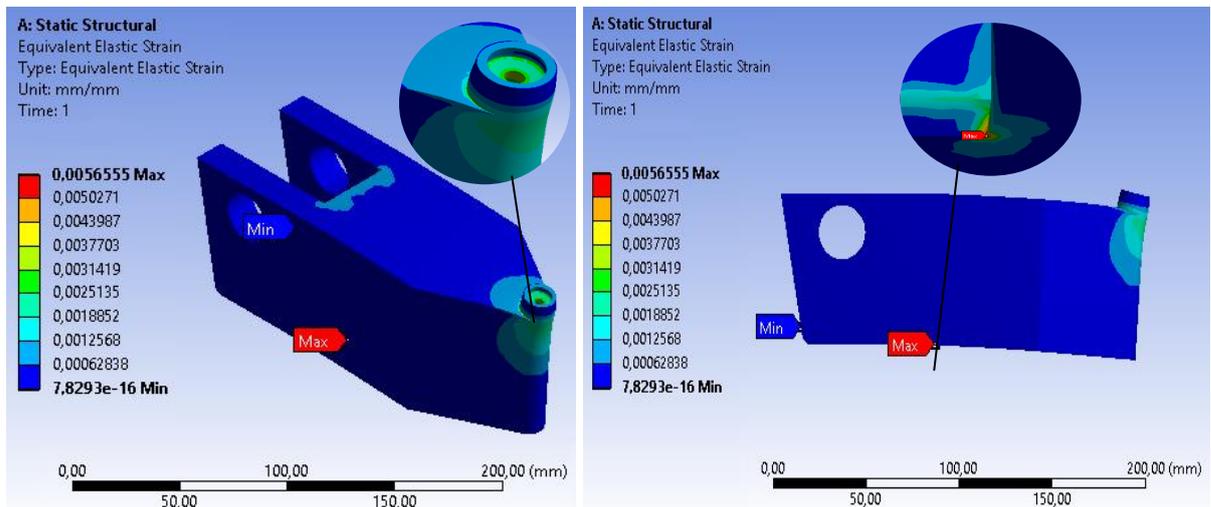
Figura 34 – Deflexão do suporte para a ferramenta



Fonte: Autora (2018).

Nota-se que o deslocamento máximo ocorre na ponta da geometria, o que é esperado, e que seu valor é muito inferior ao calculado através do ângulo de deflexão máxima do conjunto de ferramentas de clinching. Esse desempenho se mostrou similar ao encontrado no cálculo analítico. A seguir na Figura 35 será apontada a deformação sofrida pela geometria.

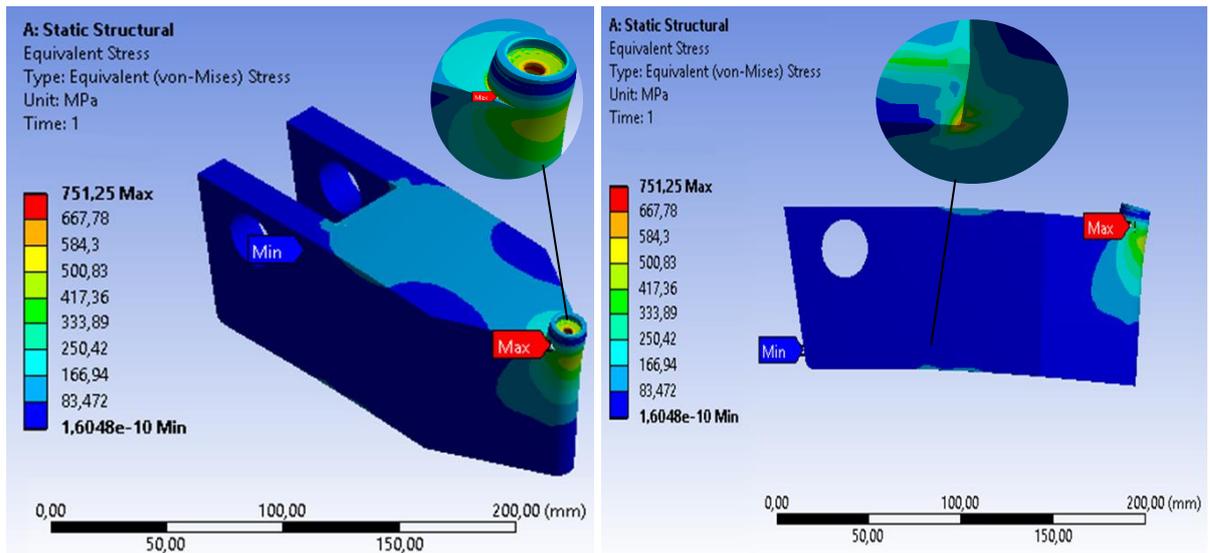
Figura 35 – Deformação do suporte para a ferramenta



Fonte: Autora (2018).

A deformação da parte móvel do queixo age de acordo com a deformação da estrutura completa, reafirmando a necessidade de dar mais atenção à região de transição do estado fixo para o estado em balanço e também ao local de fixação da ferramenta de clinching. A tensão equivalente de von Mises é representada pela Figura 36 na sequência.

Figura 36 – Tensão equivalente de von Mises do suporte para a ferramenta

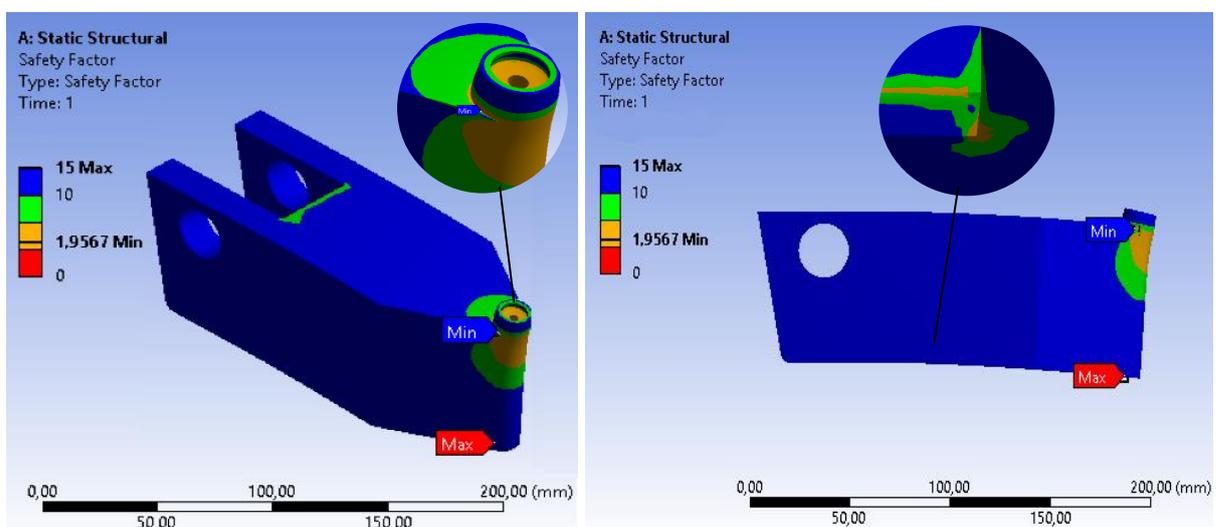


Fonte: Autora (2018).

Observa-se que a tensão equivalente de von Mises teve um comportamento um pouco diferente do mostrado pela estrutura completa, exibindo o seu valor máximo na fixação da ferramenta ao invés de no local de transição. Porém, através de uma análise mais apurada desse local de transição foi possível identificar dois pontos em que a tensão é quase máxima. Sendo assim, o resultado obtido na simulação do queixo separado continua válido já que é certo que na estrutura completa o local de fixação é exigido em sua quase totalidade.

Por fim, será analisado o fator de segurança ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Fator de segurança do suporte para a ferramenta

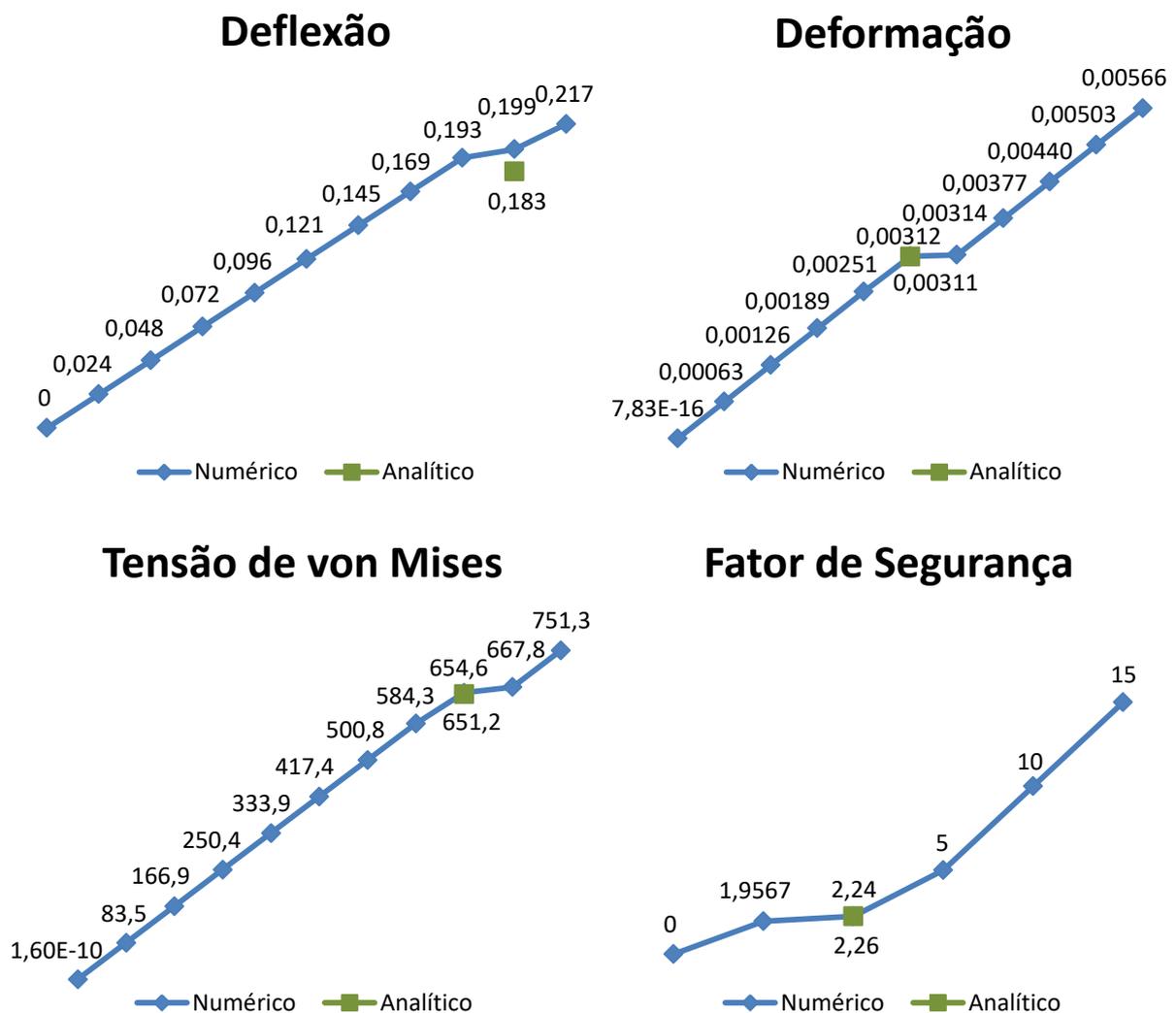


Fonte: Autora (2018).

Como esperado, os menores valores de fator de segurança ocorrem nos locais mais exigidos, onde a tensão possui um valor alto como no ponto de fixação da ferramenta e no local de transição do estado fixo para o estado em balanço.

Na sequência, a Figura 38 mostra uma comparação entre os resultados simulados e os obtidos pelo cálculo analítico, lembrando que a comparação será realizada no ponto onde a força é aplicada.

Figura 38 – Comparação entre os resultados numéricos e analíticos

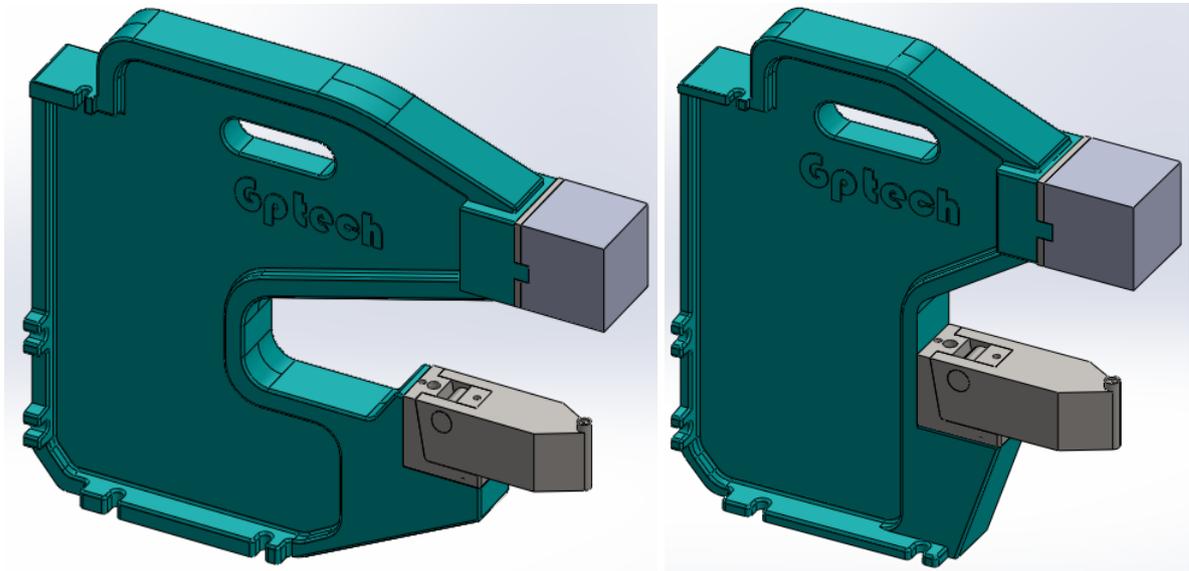


Fonte: Autora (2018).

Para a obtenção dos resultados numéricos foi selecionado um ponto na borda interior do furo central do local de fixação da ferramenta, o que acaba produzindo uma distância mínima no eixo z desconsiderado no cálculo analítico. Verificam-se através dos gráficos que os valores analíticos são próximos aos encontrados na simulação.

A Figura 39 a seguir apresenta os dois tamanhos das geometrias finalizadas com a inclusão do suporte da ferramenta de clinching.

Figura 39 – Estruturas em C desenvolvidas



Fonte: Autora (2018).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a análise dos resultados pode-se constatar uma diferença pequena entre os valores apresentados pela estrutura de ferro fundido e a estrutura de aço. O ferro fundido indicou, como esperado, a resposta inferior, porém a diferença foi muito pequena e ambos permaneceram dentro do limite de deflexão recomendado. Dessa maneira, a substituição do processo de fabricação atual pelo processo de fundição provou-se viável, pois as estruturas em C desenvolvidas com o material FE 70002 suportaram a carga de 72 kN prevista dentro do limite de deslocamento estipulado pelo ângulo de deflexão admitido para o conjunto de ferramentas de clinching.

Uma atenção maior deve ser despendida aos locais apontados com os menores fatores de segurança, apesar de terem apresentado valores aceitáveis, estes pontos são exatamente onde a força é aplicada e onde o operador da máquina terá acesso direto e constante. O monitoramento dessa região deve ser realizado visando observar o comportamento do suporte da ferramenta durante um período de testes. O reforço desta região pode se tornar necessário.

As estruturas em C apresentadas neste trabalho suprem todas as necessidades de fixação e centralização exigidas para esse tipo de aplicação. Sua configuração tratou de uma abertura de curso de força de 50 mm, todavia é possível fazer adaptações para distâncias menores. Lembrando que deve ser seguida a norma de segurança NR 12 que limita a medida entre o conjunto de ferramentas em 6 mm durante o acionamento para a realização do ponto de clinching. Essas adaptações deverão ser efetuadas no suporte da ferramenta matriz, onde o local de fixação poderá ter uma maior elevação com o devido reforço. A abertura desse leque de tamanhos de curso de força possibilita uma utilização mais ampla do equipamento, o que torna o mesmo mais atrativo para o mercado.

O estudo mais aprofundado sobre as possíveis características e formatos do suporte da ferramenta pode ser desenvolvido em trabalhos futuros, aumentando ainda mais o alcance para peças com diferentes geometrias. A otimização da estrutura em C nos locais de menor esforço visando diminuir o peso do produto é muito importante para a redução de custo. Outra sugestão é a realização de uma análise física nas peças fabricadas por meio da extensometria.

Contudo, as maiores recomendações para trabalhos futuros são o estudo sobre a concentração de tensão no suporte da ferramenta e uma forte investigação sobre a fadiga da estrutura completa, que trará resultados importantíssimos como o local onde ocorrerá a falha e o tempo de vida do equipamento.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos Finitos: A Base da Tecnologia CAE**. 5. ed. São Paulo: Érica, 2007. 292 p.

ANSYS. **Análise Estrutural**. 2018. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/structures>>. Acesso em: 02 abr. 2018.

ASSAN, Aloisio Ernesto. **Método dos Elementos Finitos: Primeiros Passos**. 2. ed. Campinas, SP: UNICAMP, 2003. 304 p.

AZEVEDO, Domingos Flávio de Oliveira. **Análise estrutural com Ansys Workbench: Static Structural**. Mogi das Cruzes: Isbn, 2016. 180 p. Disponível em: <<ftp://ftpaluno.umc.br/Aluno/Domingos/ENGENHARIA%20AUXILIADA%20POR%20COMPUTADORES/PROJETO%20DE%20SISTEMAS%20MEC%20NICOS%20III/An%20E1lise%20Estrutural%20com%20ANSYS%20Workbench%202016.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2018.

BRM. **Mancais e Rolamentos BRM**. Disponível em: <<http://brm.com.br/wp-content/uploads/2011/04/16-Characteristicas-ferros-fundidos2.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2018.

BTM. **Section D: Engineer Guide**. 2018. Disponível em: <<http://www.btmcorp.com/literature/btm-engineer-guide-section-d.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2018.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 1986. 2 v.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundido**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais - ABM, 2008. 600 p.

DASSAULT SYSTÈMES. **Fundamentos do SOLIDWORKS Simulation: Conceitos básicos de análise**. 2018. Disponível em: <http://help.solidworks.com/2016/portuguese-brazilian/SolidWorks/cworks/c_Basic_Concepts_of_Analysis.htm>. Acesso em: 02 abr. 2018.

FERREIRA, Paulo Roberto Walter. **Uma Metodologia de Implantação e Condução da Padronização Industrial em uma Indústria Metal-Mecânica**. 1995. 167 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995. Cap. 2.

FRANCO, Francis José Saldanha. **Influência da deformação superficial induzida na resistência à fadiga do ferro fundido nodular austemperado**. 2010. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

GPTECH. **União de chapa a frio**. 2018. Disponível em: <<http://gptechbrasil.com.br/site/uniao-de-chapa-a-frio/>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

IFSP. **Processos de Fabricação Mecânica**. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA_RS1.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2018.

KIM, Nam-Ho; SANKAR, Bhavani V. **Introduction to Finite Element Analysis and Design**. USA: Wiley, 2008. 421 p.

KIMINAMI, Claudio Shyinti; CASTRO, Walman Benício de; OLIVEIRA, Marcelo Falcão de. **Introdução aos Processos de Fabricação de Produtos Metálicos**. São Paulo: Blucher, 2013. 236 p.

MEIROVITCH, Leonard. **Fundamentals of Vibrations**. New York: McGraw-Hill, 2001. 826 p.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Fundição**. 2007. Disponível em: <<http://norbertocefetsc.pro.br/elm/wp-content/uploads/2014/09/fundicao.pdf>>. Acesso em: 02 abr. 2018.

PEREIRA, José Carlos. **Curso de Mecânica dos Sólidos II**. Florianópolis: GRANTE/UFSC, 2003. 142 p. Disponível em: <<http://www.grante.ufsc.br/download/MecSolA/mecsol-Parte II-J.Apostila-Carlos.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018.

SECCO, Adriano Ruiz; AMARAL FILHO, Dario do; OLIVEIRA, Nelson Costa de. **Processos de Fabricação 1**. Disponível em: <http://bmalbert.yolasite.com/resources/Telecurso_2000_-_Processos_de_Fabricacao_1.pdf>. Acesso em: 02 abr. 2018.

SENAI-SP, Divisão de Recursos Didáticos da Diretoria de Educação do Departamento Regional do. **Processos Mecânicos de Usinagem**. São Paulo: Senai-SP, 1998. 96 p.

SMITH NETO, Perrin. **Fundamentos para o Projeto de Componentes de Máquinas**. Belo Horizonte: Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 2005. 464 p.

SOARES, Gloria de Almeida. **FUNDIÇÃO: Mercado, Processos e Metalurgia**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2000. 123 p.

SOUZA, Ivan Sergio Freire de. **Classificação e Padronização de Produtos, com Ênfase na Agropecuária: Uma Análise Histórico-Conceitual**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica. 2001. 121 p.

SOUZA, Remo Magalhães de. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Belém: Universidade Federal do Pará, 2003. 40 p. Disponível em: <http://www.ufpa.br/nicae/integrantes/remo_souza/TrabPublicados/Apostilas/ApostilaElementosFinitosNiCAE.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2018.

TUPY. **FUCO Perfis Fundidos**. Joinville: TUPY, 2014. 56 p. Disponível em: <http://www.tupy.com.br/imagens/promocional/Catalogo_Tecnico_Fuco-Portugues.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2018.