

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA - CAMPUS LAGES**

**CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MAICKON NORO AURELIO**

**ANÁLISE TÉCNICA DO PROJETO DE FABRICAÇÃO DA CARÇAÇA DE  
MANDRIL NO TRATOR CORTADOR DE GRAMA HUSQVARNA MODELO TS 142**

**LAGES/SC**

**2023**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA – CAMPUS LAGES**

**CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MAICKON NORO AURELIO**

**ANÁLISE TÉCNICA DO PROJETO DE FABRICAÇÃO DA CARÇAÇA DE  
MANDRIL NO TRATOR CORTADOR DE GRAMA HUSQVARNA MODELO TS 142**

Trabalho submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para aprovação na área de Engenharia Mecânica.

Orientador: Me. Ariton Araldi

**LAGES/SC**

**2023**

Maickon Noro Aurelio

**ANÁLISE TÉCNICA DO PROJETO DE FABRICAÇÃO DA CARÇA DE  
MANDRIL NO TRATOR CORTADOR DE GRAMA HUSQVARNA MODELO TS 142**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para  
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua  
forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Lages, 12 de dezembro de 2023.

---

Prof. Natalia Madalena Boelter, Me.(a)  
Coordenador(a) do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof.(a) Ariton Araldi, Me.(a)  
Orientador(a)  
IFSC Campus Lages

---

Prof.(a) Matheus Fontanelle Pereira, Dr.  
Avaliador(a)  
IFSC Campus Lages

---

Prof.(a) Ricardo Teran Muhl, Me.(a)  
Avaliador(a)  
IFSC Campus Lages

Ao meu pai, cuja presença é uma fortaleza de fibra e retidão. Você me ensinou o verdadeiro significado de ser um homem de caráter, sempre guiando-me com sabedoria e exemplo.

À minha mãe, cuja persistência é uma força constante que nunca esgota. Seu espírito incansável e sua determinação moldaram minha compreensão de que a verdadeira grandiosidade reside na luta por um sonho.

## RESUMO

A presente pesquisa aborda uma análise técnica do projeto de fabricação da carcaça de mandril no trator cortador de grama Husqvarna modelo TS 142, com o objetivo de aumentar sua vida útil operacional. A pesquisa inicia com a identificação do material mais adequado, considerando resistência mecânica e custo-benefício. A análise de elementos finitos da estrutura original revelou um preocupante fator de segurança de 0,581807, levando a modificações no formato da peça e a mudança para aço 1020. Simulações subsequentes indicaram uma distribuição mais eficiente de forças, resultando em um notável aumento no fator de segurança para 30,6659. O processo evoluiu para a geração de um código CNC para a produção eficiente da peça otimizada. Os resultados destacam não apenas a resolução das falhas iniciais, mas também estabelecem bases sólidas para futuras otimizações na engenharia mecânica. O estudo, caracterizado como pesquisa descritiva e explicativa, combina abordagens qualitativas e quantitativas, utilizando conhecimentos de engenharia mecânica e técnicas de análise de elementos finitos. Este trabalho não apenas contribui para a compreensão das falhas mecânicas, mas também fornece diretrizes práticas para aprimorar a durabilidade e desempenho de peças em contextos similares.

**Palavras-chave:** Carcaça de mandril; Análise técnica; Elementos finitos; Resistência mecânica; Otimização.

## ABSTRACT

This research deals with a technical analysis of the manufacturing project for the chuck housing on the Husqvarna TS 142 model lawn mower, to increase its operational service life. The research begins by identifying the most suitable material, considering mechanical strength and cost-effectiveness. Finite element analysis of the original structure revealed a worrying safety factor of 0.581807, leading to modifications to the shape of the part and a switch to 1020 steel. Subsequent simulations indicated a more efficient distribution of forces, resulting in a notable increase in the factor of safety to 30.6659. The process evolved into generating a CNC code for the efficient production of the optimized part. The results highlight not only the resolution of the initial faults but also lay solid foundations for future optimizations in mechanical engineering. The study, characterized as descriptive and explanatory research, combines qualitative and quantitative approaches, using mechanical engineering knowledge and finite element analysis techniques. This work not only contributes to the understanding of mechanical failures but also provides practical guidelines for improving the durability and performance of parts in similar contexts.

**Keywords:** Chuck housing; Technical analysis; Finite elements; Mechanical strength; Optimization.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO .....	14
<b>FIGURA 2</b> - TORNO CNC ERGOMET TND 200 COM COMANDO FANUC .....	16
<b>FIGURA 3</b> - PROCESSO DE FABRICAÇÃO E USINAGEM TND 200.....	17
<b>FIGURA 4</b> - ESQUEMA DE UM TORNO EM OPERAÇÃO .....	17
<b>FIGURA 5</b> - TABELA DE VELOCIDADE DE CORTE .....	22
<b>FIGURA 6</b> - GRANDEZAS DE CORTE NO TORNEAMENTO .....	25
<b>FIGURA 7</b> - FORÇA DE USINAGEM E SEUS COMPONENTES .....	26
<b>FIGURA 8</b> - PROPORÇÃO DOS COMPONENTES DA FORÇA DE USINAGEM PARA O TORNEAMENTO DE AÇO ST42.11, COM UMA TENSÃO DE RUPTURA DE $\sigma_R = 450 \text{ N/MM}^2$	29
<b>FIGURA 9</b> - DIAGRAMA DE BARRA QUE MOSTRA MÓDULO PARA FAMÍLIAS DE SÓLIDOS .....	32
<b>FIGURA 10</b> - DIAGRAMA DE PROPRIEDADE DE MATERIAIS: MÓDULO DE YOUNG X DENSIDADE .....	33
<b>FIGURA 11</b> - DIAGRAMA MÓDULO - DENSIDADE .....	34
<b>FIGURA 12</b> - DIAGRAMA RESISTÊNCIA - DENSIDADE.....	36
<b>FIGURA 13</b> - DIAGRAMA MÓDULO - RESISTÊNCIA.....	37
<b>FIGURA 14</b> - DIAGRAMA TENACIDADE À FRATURA - MÓDULO.....	38
<b>FIGURA 15</b> - DIAGRAMA TENACIDADE À FRATURA - RESISTÊNCIA .....	39
<b>FIGURA 16</b> - CARÇAÇA DE MANDRIL DEFEITUOSA.....	43
<b>FIGURA 17</b> - LOCALIZAÇÃO CARÇAÇA DE MANDRIL NO TRATOR HUSKVARNA TS 142 .....	44
<b>FIGURA 18</b> - MODELO ORIGINAL DA CARÇAÇA DE MANDRIL.....	50
<b>FIGURA 19</b> - MODELO MODIFICADO DA CARÇAÇA DE MANDRIL .....	51
<b>FIGURA 20</b> - DESENHO TÉCNICO CARÇAÇA DE MANDRIL .....	52
<b>FIGURA 21</b> - FATOR DE SEGURANÇA OBTIDO DURANTE ANÁLISE FEA DA CARÇAÇA DE MANDRIL ORIGINAL .....	70
<b>FIGURA 22</b> - FATOR DE SEGURANÇA OBTIDO DURANTE ANÁLISE FEA DA CARÇAÇA DE MANDRIL MODIFICADA.....	70
<b>FIGURA 23</b> – CÓDIGO CNC REPRESENTANDO O LADO 1 DA CARÇAÇA DE MANDRIL .....	73
<b>FIGURA 24</b> - REPRESENTAÇÃO DO LADO 1 DO CÓDIGO CNC .....	77
<b>FIGURA 25</b> - CÓDIGO CNC REPRESENTANDO O LADO 2 DA CARÇAÇA DE MANDRIL .....	78
<b>FIGURA 26</b> - REPRESENTAÇÃO DO LADO 2 DO CÓDIGO CNC .....	81

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> - COMPARAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS ENTRE ALUMÍNIO E AÇO 1020 .	46
<b>TABELA 2</b> - DISCUSSÃO SOBRE A EFICÁCIA DAS MUDANÇAS REALIZADAS NO CORTADOR DE GRAMA .....	53
<b>TABELA 3</b> - INFORMAÇÕES CARÇAÇA DE MANDRIL ORIGINAL.....	56
<b>TABELA 4</b> - INFORMAÇÕES CARÇAÇA DE MANDRIL MODIFICADA .....	57
<b>TABELA 5</b> - PROPRIEDADES CARÇAÇA DE MANDRIL ORIGINAL .....	59
<b>TABELA 6</b> - PROPRIEDADES CARÇAÇA DE MANDRIL MODIFICADA.....	60
<b>TABELA 7</b> - LIMITE DE ESCOAMENTO CARÇAÇA DE MANDRIL ORIGINAL .....	65
<b>TABELA 8</b> - LIMITE DE ESCOAMENTO CARÇAÇA DE MANDRIL MODIFICADA .....	66
<b>TABELA 9</b> - DESLOCAMENTO RESULTANTE CARÇAÇA DE MANDRIL ORIGINAL.....	67
<b>TABELA 10</b> - DESLOCAMENTO RESULTANTE CARÇAÇA DE MANDRIL MODIFICADA .....	68
<b>TABELA 11</b> - <i>FATOR DE SEGURANÇA CARÇAÇA DE MANDRIL ORIGINAL</i> .....	69
<b>TABELA 12</b> - <i>FATOR DE SEGURANÇA CARÇAÇA DE MANDRIL MODIFICADA</i> .....	70
<b>TABELA 13</b> - TABELA DE ORÇAMENTO.....	83

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>EQUAÇÃO 1</b> - FÓRMULA DA VELOCIDADE DE CORTE .....	19
<b>EQUAÇÃO 2</b> - CALCULANDO RPM .....	20
<b>EQUAÇÃO 3</b> - FÓRMULA DO AVANÇO DE CORTE .....	23
<b>EQUAÇÃO 4</b> - FÓRMULA DA APROXIMAÇÃO DO ANEL GRADUADO.....	24
<b>EQUAÇÃO 5</b> - FORÇA DE USINAGEM E SEUS COMPONENTES.....	27
<b>EQUAÇÃO 6</b> - FÓRMULA DA POTÊNCIA DE CORTE .....	27
<b>EQUAÇÃO 7</b> - FÓRMULA DA POTÊNCIA DE AVANÇO .....	28
<b>EQUAÇÃO 8</b> - FÓRMULA DA POTÊNCIA DOS MOTORES EIXO-ÁRVORE E SISTEMA DE AVANÇO	28
<b>EQUAÇÃO 9</b> - PROPORÇÃO PARA USINAGEM DE AÇOS COMUNS COM FERRAMENTA DE METAL DURO.....	30
<b>EQUAÇÃO 10</b> - FÓRMULA DA PORCENTAGEM DE AUMENTO .....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

CNC – Comando Numérico Computadorizado

TND – Testes não destrutivos

$\pi$  – considerar 3,14.

D – Diâmetro da peça.

N – Rotações por minuto

RPM – Rotações por minuto

$V_c$  – velocidade de corte

S – Avanço de corte

A – Aproximação do anel graduado

Pf – Passo do Fuso

N.<sup>o</sup>div. – Número de divisões

FU – Força de usinagem

$F_c$  – Força de corte

$F_f$  – Força de avanço

$F_p$  – Força de profundidade

$F_{ap}$  – Força de apoio

$P_c$  – Potência de corte

$P_f$  – Potência de avanço

$P_{mc}$  – Potência do motor (eixo árvore)

$P_{mf}$  – Potência do motor (sistema de avanço)

E – Módulo de Young

GPa – Gigapascal

v – Velocidade de onda longitudinal elástica

$\rho$ : Densidade

$\sigma_f$  – Resistência

FEA: Análise de elementos finitos

FOS: Fator de Segurança

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	9
1.2 OBJETIVOS .....	10
1.2.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	10
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	10
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1 FRATURA MECÂNICA .....	11
2.2 TRATAMENTO TÉRMICO.....	12
2.3 USINAGEM.....	13
2.3.1 <i>Gerações da usinagem com CNC</i> .....	14
2.3.2 <i>Torno CNC</i> .....	15
2.3.3 <i>Torneamento</i> .....	18
2.3.3.1 <i>Parâmetros de corte para torneamento</i> .....	18
2.3.3.2 <i>Velocidade de Corte</i> .....	19
2.3.3.3 <i>RPM</i> .....	20
2.3.3.4 <i>Avanço de corte</i> .....	23
2.3.3.5 <i>Aproximação do anel graduado</i> .....	23
2.3.3.6 <i>Profundidade de corte</i> .....	24
2.3.4 <i>Força de usinagem</i> .....	25
2.3.4.1 <i>Força de usinagem tridimensional</i> .....	25
2.3.4.2 <i>Potência de usinagem</i> .....	27
2.3.5 <i>Seleção de materiais</i> .....	30
2.3.5.1 <i>Mapas de Ashby</i> .....	31
2.3.5.2 <i>Conclusões sobre os mapas</i> .....	40
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
<b>4. ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA CARÇAÇA DE MANDRIL .....</b>	<b>43</b>
4.1 ANÁLISE DE RUPTURAS: CARÇAÇA DE MANDRIL SOB ESTUDO .....	43
4.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE MODIFICAÇÃO DA CARÇAÇA DE MANDRIL .....	44

4.3 RAZÃO DA TROCA DO MATERIAL DE ALUMÍNIO PARA AÇO 1020 .....	45
4.4 CORROSÃO DO AÇO 1020: DESAFIOS, MECANISMOS E ESTRATÉGIAS DE PREVENÇÃO .....	46
4.5 COMPARAÇÃO ENTRE A ESTRUTURA ORIGINAL E A MODIFICADA .....	49
4.6 DESENHO TÉCNICO DA CARÇAÇA DE MANDRIL MODIFICADA.....	52
4.7 VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS MODIFICAÇÕES .....	52
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>55</b>
5.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS OBTIDOS DURANTE A ANÁLISE TÉCNICA .....	55
5.2 RESULTADOS OBTIDOS COM APLICAÇÃO DE CARGA .....	63
5.1.1 <i>Tensão de Von Mises</i> .....	63
5.1.2 <i>Deslocamento Resultante</i> .....	67
5.1.3 <i>Fator de segurança</i> .....	69
<b>6 PROGRAMAÇÃO CNC COMANDO FANUC .....</b>	<b>72</b>
<b>7 ORÇAMENTO .....</b>	<b>83</b>
<b>8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho é um estudo que busca aprofundar o conhecimento na área de engenharia mecânica. Dessa forma, o objeto de estudo em questão se trata de uma carcaça de mandril de um trator cortador de grama onde o mesmo aponta falhas nas extremidades do material, as falhas se manifestam através de rupturas e trincas. Sendo assim, levanta-se duas questões: a primeira em relação ao material utilizado na carcaça de mandril (o mesmo seria o material mais adequado para cumprir com as tarefas do maquinário?) À segunda, acerca do projeto, o projeto teve um mal dimensionamento mecânico quando feito?

Por conseguinte, algumas hipóteses já podem ser postas em contexto para uma solução superficial. Sendo assim, busca-se uma melhoria no material utilizado já que o mesmo está sofrendo rupturas, logo, a escolha de um material com uma maior tenacidade e resistência mecânica se torna uma possível solução para o problema em questão. Também, fica claro que há uma grande chance das trincas e rupturas estarem relacionadas ao formato da carcaça de mandril, tornando necessário a recriação da peça com formato original no Solidworks buscando encontrar onde se encontra os maiores pontos de tensão e deste modo modificar o formato nesses locais.

Em relação aos objetivos a serem alcançados, enxerga-se dois objetivos de forma clara: o primeiro objetivo é a troca do material utilizado na carcaça de mandril, buscando aumentar sua resistência mecânica. O segundo um redimensionamento do formato da carcaça de mandril, visando criar uma estrutura que minimize as tensões que a carcaça sofre durante a operação do trator. Se os objetivos do estudo se concretizarem, tornando a peça mecânica eficaz no seu campo de atuação, a pesquisa servirá como base para estudos futuros na área que envolva projetos mecânicos.

## 1.1 Justificativa

Tendo em vista que a carcaça de mandril envolve áreas da mecânica que abarcam ramos da área de materiais e projetos, a presente pesquisa visa encontrar como tal projeto se desenvolve, porém, vai além de somente entender como foi feito e sim porque foi desenvolvido dessa forma, para assim, conseguir buscar melhorias do projeto.

A motivação do projeto se deve a dois pontos, sendo o primeiro relacionado às possibilidades levantadas para resolver os desafios apresentados pelo maquinário. Assim sendo, a pesquisa possibilita testar o conhecimento de matérias específicas da engenharia de forma prática, assim, possibilitando se aprofundar na área da mecânica e conseqüentemente enriquecer o conhecimento do pesquisador. O segundo motivo refere-se à falta de material didático prático para maquinários mecânicos específicos, é comum na engenharia que os projetos não fiquem à disposição de forma aprofundada, afinal, esses engenhos tem um objetivo de fim comercial, ou seja, a forma como foi projetado e produzido de forma aprofundada acaba não sendo disponibilizado ao público, a fim de proteger a empresa que o projeta, produz e comercializa. No entanto, no contexto da engenharia de manutenção, essa falta de acesso acaba se tornando um obstáculo adicional para resolver infortúnios que o maquinário possa vir a apresentar.

Em relação aos pretextos do estudo, três pontos fundamentais merecem destaque. Primeiramente, a pesquisa aborda a relevância teórica e prática na área mecânica, concentrando-se em projetos, materiais e testes práticos de um dispositivo mecânico. Em segundo lugar, caso a pesquisa resolva eficazmente o problema da quebra da carcaça de mandril, há potencial para contribuir na escolha de materiais para o serviço do cortador de grama, melhorando a estrutura da carcaça de mandril e otimizando sua forma para operações em terrenos íngremes. Adicionalmente, o terceiro ponto visa entender por que o alumínio é o material mais utilizado e investigar as razões por trás do formato atual da base da carcaça de mandril, que apresenta extremidades que favorecem a quebra.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Pretende-se realizar uma análise técnica de melhorias em uma carcaça de mandril que garanta que o trator cortador de grama opere com uma maior vida útil de trabalho, garantindo que o serviço possa ser feito sem paradas indesejadas, fornecendo o serviço que justifique o valor do produto.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Os principais objetivos do trabalho são:

- a. Realizar uma análise dos materiais disponíveis para identificar o mais adequado à aplicação, considerando a melhor resistência mecânica em relação ao custo-benefício e ao tempo de vida útil durante a execução do serviço.
- b. Realizar uma análise de falha para identificar os pontos de quebra, verificando os maiores pontos de tensão na carcaça do mandril por meio de análise de elementos finitos no SolidWorks.
- c. Dimensionar uma nova peça que opere sem sofrer grandes tensões, evitando a ocorrência de pontos críticos e conseqüentemente diminuir a possibilidade de fratura do material.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Fratura Mecânica

No campo da mecânica de fratura, Irwin emergiu como uma figura proeminente cujas contribuições têm sido amplamente reconhecidas. Suas pesquisas e teorias sobre a tensão de fratura crítica estabeleceram os fundamentos para o avanço do conhecimento nessa área. Seu trabalho tem sido fundamental para o desenvolvimento de métodos de análise de fratura, oferecendo uma base sólida para pesquisadores e engenheiros interessados no estudo das propriedades de fratura dos materiais. Irwin deixou um legado duradouro e seu trabalho continua a ser uma referência essencial para a compreensão e aprimoramento dos fenômenos de fratura mecânica.

Sobre a fratura em metais podemos afirmar que: “Para os metais, pode haver dois modos de fratura: dúctil e frágil. A classificação está baseada na habilidade de um material apresentar deformação plástica” (Callister, 2018, página).

Desse modo, conclui-se que para os metais, pode haver dois modos de fratura que são amplamente estudados e classificados: a fratura dúctil e a fratura frágil. Essa classificação é determinada pela habilidade de um material em sofrer deformação plástica antes de falhar. Irwin (1948) define a fratura dúctil como um processo de ruptura em materiais que exibem extensa deformação plástica antes da falha final. Irwin propôs que, durante a fratura dúctil, uma trinca se propaga através de uma região plástica no material, em contraste com a fratura frágil, em que a propagação da trinca ocorre predominantemente através de uma região elástica.

Por outro lado, de acordo com a teoria de Griffith (1920), a fratura frágil ocorre quando a energia necessária para propagar uma trinca em um material frágil é menor do que a energia de deformação elástica armazenada na região da ponta da trinca. Essa diferença de energia é conhecida como "energia de deformação elástica liberada". Quando a energia de deformação elástica liberada é suficientemente alta para permitir a propagação da trinca, ocorre a falha frágil.

## 2.2 Tratamento térmico

Segundo Callister (2018), o tratamento térmico envolve o aquecimento do material a uma temperatura específica e mantendo-o nessa temperatura por um determinado período de tempo, seguido de um resfriamento controlado. Essas etapas são realizadas para promover mudanças na microestrutura do material, resultando em propriedades desejáveis.

Callister explica que diferentes técnicas de tratamento térmico, como recozimento, têmpera, revenido e envelhecimento, são aplicadas para alcançar objetivos específicos. Cada técnica tem efeitos diferentes na microestrutura, na dureza, na resistência e em outras propriedades do material. O autor discute também a importância da seleção adequada dos parâmetros de tratamento térmico, como temperatura, tempo de permanência e taxa de resfriamento, para obter os resultados desejados.

Logo, o que se pode afirmar em relação ao tratamento térmico aplicado na soldagem é:

O tratamento térmico em metais é um conjunto de operações que envolve aquecimento, tempo de permanência em determinadas temperaturas e resfriamento sob condições controladas, com o objetivo de melhorar as propriedades do material ou conferir-lhe características predeterminadas. (GIMENES JR, 2019, p.205).

Dessa forma, o tratamento térmico tem uma importância grande no âmbito industrial, logo, peças mecânicas que sofrem com fraturas recorrentes podem se utilizar do tratamento térmico para aumentar a resistência mecânica e conseqüentemente serem utilizadas de forma que garantam um aumento na vida útil do equipamento.

## 2.3 Usinagem

Na área da usinagem, ALMEIDA (2015) afirma que a usinagem é um processo de manufatura mecânica em que ocorre a remoção do excesso de material da peça por meio de operações de corte, tanto utilizando máquinas quanto ferramentas manuais. Durante o processo de usinagem, é essencial que as máquinas estejam equipadas com ferramentas de corte que possuam ângulos específicos, permitindo a penetração controlada no material e a remoção de quantidades proporcionais de resíduos de acordo com suas características construtivas. Os resíduos gerados durante a usinagem são comumente conhecidos como cavacos.

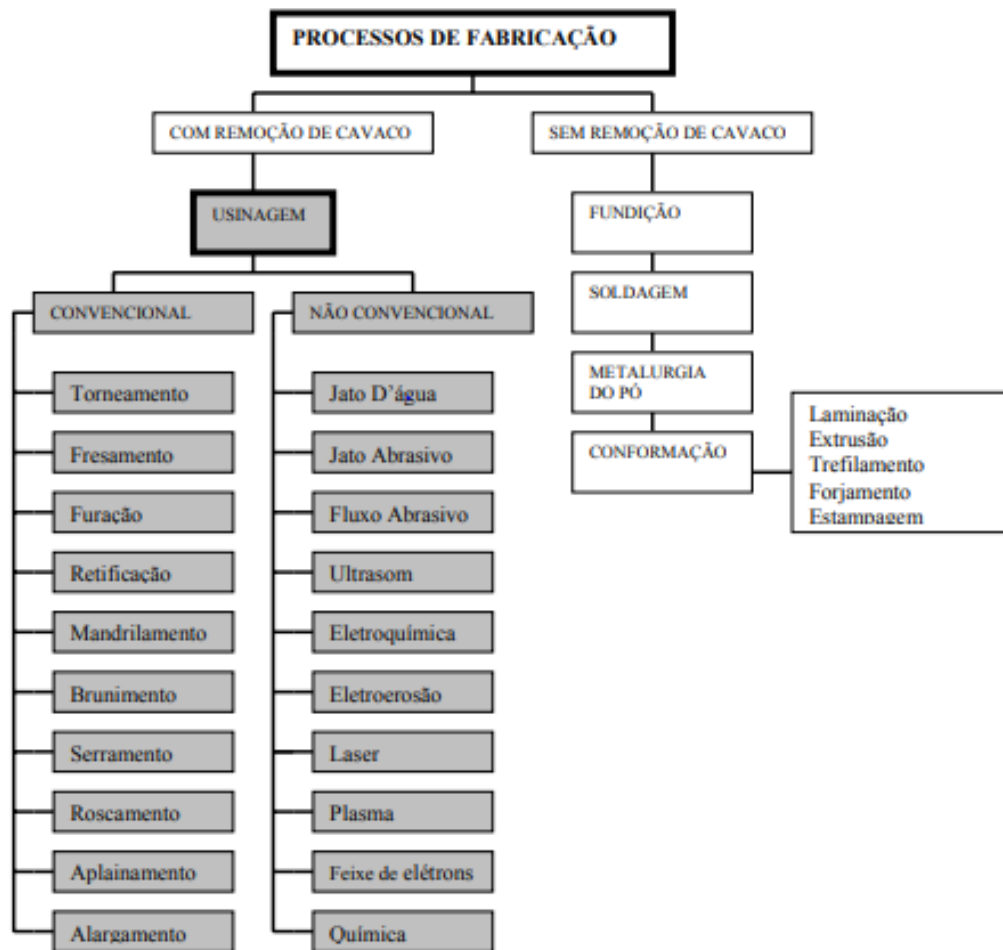
Pode-se afirmar em relação ao processo de usinagem o seguinte:

Uma simples definição de usinagem pode ser tirada da Figura 1.2 como sendo processo de fabricação com remoção de cavaco. Consultando, porém, uma bibliografia especializada pode-se definir usinagem de forma mais abrangente, como sendo: “Operação que ao conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda a combinação qualquer destes itens, produzem cavacos”. E por cavaco entende-se: “Porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar uma forma geométrica irregular”.

(SILVA COSTA, 2006, p.6).

A figura 1 mostra de forma simplificada como são classificados os processos de fabricação.

**Figura 1** - Classificação dos processos de fabricação



Fonte: Academia.edu

### 2.3.1 Gerações da usinagem com CNC

De acordo com Fitzpatrick (2013) A progressão da máquina-ferramenta programável pode ser dividida em três gerações distintas, delineadas pela sua aplicação tanto na indústria quanto no ensino em escolas técnicas, sendo elas:

Primeira Geração (1940-1965): A aquisição de uma máquina CNC (controlada por fita, sem computador) somente seria justificada se o piso de fábrica demandar a produção de milhares de peças similares ou se a tarefa não pudesse ser executada de nenhuma outra maneira. Como a programação numérica era uma especialidade,

era ministrada em apenas algumas escolas, e somente no final dessa geração. Trabalhos em CNC nunca foram atribuídos a iniciantes (Fitzpatrick (2013).

#### Segunda Geração (1965-1990):

Essa fase pode ser considerada como a de grande expansão. Ela começou com uma razão estimada de 20/80 de máquinas programáveis comparada com máquinas convencionais, mas terminou com algo em torno de 90/10! Durante o meio da fase, os PCs se tornaram acessíveis e os softwares ficaram populares. A programação se tornou uma atividade de computadores de mesa (desktops). Com a velocidade dos processadores crescendo, as máquinas programáveis se tornaram cada vez mais acessíveis e capazes; o trabalho era então planejado especificamente para manufatura com CNC. Próximo ao fim dessa fase, a corrente principal da manufatura era realizada por máquinas programáveis. As escolas ensinavam a disciplina como um curso avançado, próximo ao fim do curso de usinagem

(Fitzpatrick, 2013, p.11).

Chegando na terceira geração que acontece entre os anos de 1990 até o presente, pode-se afirmar o seguinte:

As máquinas programáveis representam próximo de 100% da manufatura e, de grande impacto para você, dos novos empregos gerados. Os profissionais iniciantes normalmente começam no chão de fábrica como operadores de CNC. Flexíveis e amigáveis, as máquinas e os sistemas de programação são tão rápidos e fáceis de aprender que agora podem ser aplicados tanto na fabricação de um único molde como em produção regular. As escolas integram e ensinam CNC como disciplina básica, começando com a primeira lição no primeiro dia.

(Fitzpatrick, 2013, p.11).

#### 2.3.2 Torno CNC

De acordo com Domingues da Silva (2015) pode-se conceituar a ideia de um torno CNC como um equipamento de elevada tecnologia, que apresenta os mesmos dispositivos e conceitos de um torno mecânico, realizando as operações de usinagem com uma precisão incontestável. Atualmente, é associado a tudo que é considerado moderno no campo da eletrônica e da informática. Para compreendermos o princípio

fundamental de funcionamento de um torno CNC, é necessário dividi-lo, de forma genérica, em dois componentes: a máquina-ferramenta e o Comando Numérico.

Uma máquina ferramenta tem o intuito de utilizar ferramentas adequadas de acordo com a operação para realizar tarefas específicas, nessa relação pode-se reiterar o seguinte:

É o elemento composto de dispositivos de fixação, como placas, morsas, grampos, entre outros, para que seja aplicado um processo de fabricação de produtos usináveis através de movimentos mecânicos manuais ou automáticos. O projeto da máquina-ferramenta deverá objetivar os recursos operacionais oferecidos pelo CN. Quanto mais recursos oferecer, maior a versatilidade.

(Silva, 2015, p.15).

Já o comando numérico é um sistema de controle utilizado em máquinas-ferramenta para automatizar e programar suas operações, logo, o que se pode afirmar é:

É o elemento composto de um equipamento eletrônico capaz de receber informações através de entrada própria de dados e transformar essas informações para transmiti-las como comando de movimentos ou de ativar e desativar recursos da máquina-ferramenta, sem a intervenção do operador, realizando as operações na sequência programada.

As informações podem ser inseridas através de coletores de dados eletrônicos, computadores interligados com as máquinas e acessórios de última geração, como cartões de memória, pen drive ou então via teclado do equipamento.

(Silva, 2015, p.15).

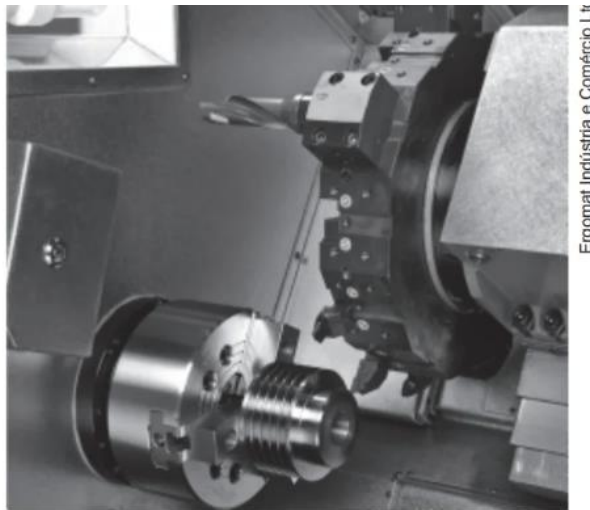
As figuras a seguir exibem tornos CNC, que atuam hoje nas indústrias.

**Figura 2** - Torno CNC Ergomet TND 200 com comando Fanuc



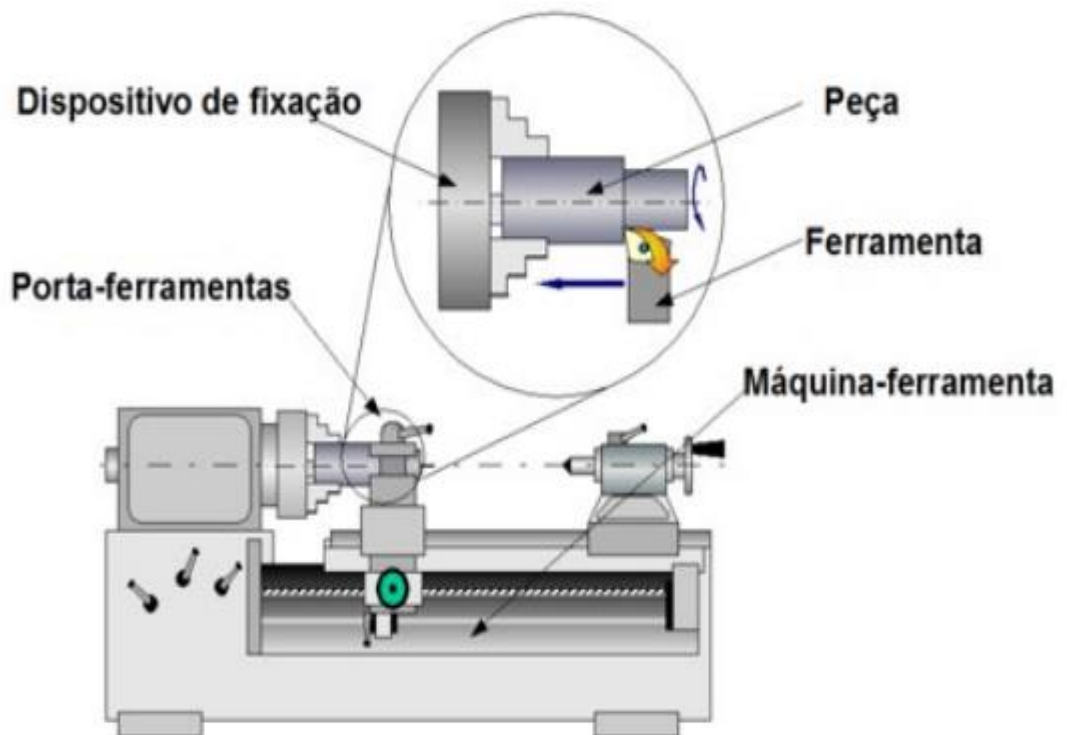
Fonte: Elaborado por Silva (2015)

**Figura 3** - Processo de fabricação e usinagem TND 200



Fonte: Elaborado por Silva (2015)

**Figura 4** - Esquema de um torno em operação



Fonte: Elaborado por Lage; Guerra; Andrade (2022)

### 2.3.3 Torneamento

O processo de torneamento envolve a fixação de uma peça em uma base giratória e a utilização de uma ferramenta de corte que se movimenta ao redor da peça em rotação, resultando na remoção de material e na conformação da peça conforme desejado. Esse método pode ser realizado manualmente em tornos convencionais, conhecidos como tornos universais, ou de maneira automatizada através do uso de tornos CNC (Controle Numérico Computadorizado). O processo automatizado é mais complexo, porém amplamente empregado na indústria devido à sua capacidade de produção em larga escala e repetitiva. Por outro lado, o uso de tornos universais é comum para reparos rápidos e fabricação ágil de peças de reposição, o que também é altamente valorizado na indústria (FREITAS, 2017).

Na diversidade dos processos de torneamento, certos parâmetros físicos essenciais são fundamentais para otimizar a usinagem da peça, considerando as ferramentas utilizadas e visando o resultado desejado. A definição desses parâmetros costuma depender da percepção e experiência do operador do torno. (SILVA, 2020 apud FREITAS,2017)

#### 2.3.3.1 Parâmetros de corte para torneamento

Os parâmetros de corte são elementos essenciais para a operação e preparação adequadas das máquinas de usinagem. Quando utilizados corretamente nas operações de usinagem, esses parâmetros proporcionam um desempenho aprimorado, reduzindo o esforço exigido pela máquina durante o processo de usinagem (ALMEIDA, 2015).

Em relação aos principais parâmetros (ALMEIDA,2015) cita que entre eles a velocidade de corte, rpm, avanço e a aproximação do anel graduado são cálculos que garantem de forma correta as operações de usinagem.

### 2.3.3.2 Velocidade de Corte

A determinação da velocidade de corte é um fator de cálculo relevante na usinagem, pois indica a facilidade de usinagem de um material, seja ele metálico ou não metálico. A velocidade de corte é medida em metros por minuto (m/min) e está relacionada à quantidade de material removido pela ferramenta de usinagem em um período de um minuto, abrangendo processos como torneamento, fresagem, furação, entre outros. A velocidade de corte desempenha um papel crucial ao calcular as rotações por minuto das ferramentas de usinagem e varia de acordo com a resistência característica de cada tipo de material (ALMEIDA, 2015).

**Equação 1** - Fórmula da Velocidade de Corte

$$\frac{\pi \times D \times n}{1.000}$$

Fonte: ALMEIDA (2015)

Onde:

$\pi$ : considerar 3,14.

D: diâmetro da peça.

N: rotações por minuto (rpm).

1.000: constante que serve para converter o valor para milímetros por minuto. m/min: resultado em metros por minuto.

### 2.3.3.3 RPM

RPM (rotações por minuto) é uma medida que indica o número de rotações completas que um objeto realiza em um minuto. É uma medida amplamente utilizada na indústria e na engenharia. A ideia de medir a velocidade de rotação de objetos remonta a séculos atrás, com a evolução dos dispositivos e instrumentos de medição ao longo do tempo. Atualmente, a determinação e o controle das rotações por minuto são realizados por meio de instrumentos e sistemas de medição, como tacômetros e controles eletrônicos de máquinas.

De acordo com (ALMEIDA, 2015) ao realizar operações de torneamento, é imprescindível selecionar corretamente o número de rotações por minuto (RPM) para garantir um processo de usinagem adequado. Essa seleção traz consigo uma série de vantagens, tais como:

- >> Correta utilização do torque da máquina, visando um aproveitamento adequado.
- >> Redução do consumo de energia elétrica.
- >> Geração de cavacos quebrados adequados para prevenir acidentes.
- >> Eficiente aproveitamento da ferramenta de corte.
- >> Aperfeiçoamento do acabamento e precisão das medidas da peça.

**Equação 2** - Calculando RPM

$$\text{rpm} = \frac{VC \times 318}{D}$$

Fonte: AMEIDA (2015)

em que:

$\pi$ : considerar 3,14.

D: diâmetro da peça.

rpm: rotações por minuto (N).

1.000: constante que serve para converter o valor para metros por minuto.

VC: velocidade de corte em m/min (metros por minuto)

A velocidade de corte CNC é determinada levando em consideração fatores como o tipo de material a ser usinado, as características da ferramenta de corte e a complexidade da operação. É importante ajustar a velocidade de corte de forma adequada para garantir a qualidade da usinagem, minimizar o desgaste da ferramenta e otimizar a eficiência do processo. Para o cálculo da velocidade de corte pode-se utilizar a seguinte tabela como referência de parâmetro:

**Figura 5** - Tabela de velocidade de corte

Tabelas Relativas à Velocidade de Corte no Torno					
Tabelas como as que se seguem, permite determinar a velocidade de corte para cada caso, conhecidos os fatores vistos anteriormente.					
Conhecida a velocidade de corte, pode-se encontrar a rotação por minuto (rpm), por cálculos ou em tabelas					
Tabela de Velocidade de Corte (Vc) para o torno (em metros por minuto)					
Materiais	Ferramenta de Aço Rápido			Ferramentas de Carboneto Metálico	
	Desbaste	Acabamento	Roscar e Recartilhar	Desbaste	Acabamento
1020 - 1030 Aço Carbono Macio	25	30	10	200	300
1045 - 1050 Aço Carbono Duro	15	20	8	120	160
1060 - 1070 Aço Carbono Extraduro	12	16	6	40	60
Ferro Fundido Maleável	20	25	8	70	85
Ferro Fundido Cinzento	15	20	8	65	95
Ferro Fundido Duro	10	15	6	30	50
Bronze	30	40	10 a 25	300	380
Latão e Bronze	40	50	10 a 25	350	400
Alumínio	60	90	15 a 35	500	700
Fibra e Ebonite	25	40	10 a 20	120	150

Fonte: Gianpaulo Alves Medeiros, disponível em docente.ifsc.edu.br

#### 2.3.3.4 Avanço de corte

Em relação ao avanço de corte (AMEIDA, 2015) define como a distância percorrida pela ferramenta ou peça em cada rotação, sendo influenciado pela velocidade de corte e RPM do material. Ele é medido em unidades de comprimento por minuto (mm/min) ou por rotação (mm/r) e é representado pela letra S.

**Equação 3** - Fórmula do avanço de corte

$$S \left( \frac{mm}{r} \right) = 0,5 \times R\varepsilon$$

Fonte: ALMEIDA (2015)

Onde:

Rε: raio da ponta da ferramenta

ap: profundidade de corte

fn: avanço da ferramenta

S: Avanço de corte

#### 2.3.3.5 Aproximação do anel graduado

O anel graduado desempenha um papel fundamental no controle dimensional das peças usinadas em máquinas operatrizes. Trata-se de uma peça cilíndrica de espessura radial reduzida, que possui uma graduação baseada no passo do fuso do

carro e no número de divisões do anel. À medida que o anel graduado completa uma rotação, o carro da máquina é deslocado em uma distância igual ao passo do fuso. Por meio das marcações do anel graduado, é possível realizar um controle preciso das operações de desbaste e acabamento em processos como torneamento, fresagem e retificação (ALMEIDA, 2015).

A determinação do valor de cada marcação no anel graduado é feita por meio da divisão do passo do fuso do carro da máquina (Pf) pelo número de divisões presentes no anel (N.º div.)

**Equação 4** - Fórmula da aproximação do anel graduado

$$A = \frac{Pf}{N.º\text{div.}}$$

Fonte: ALMEIDA (2015)

Onde:

A: aproximação do anel graduado (mm)

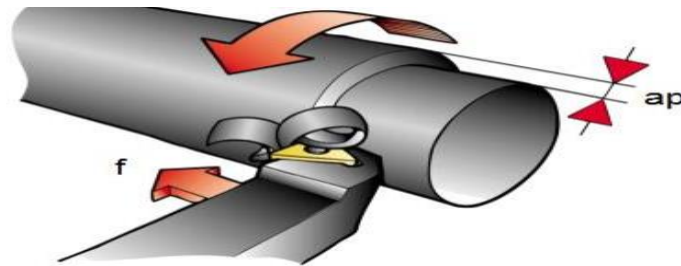
Pf: Passo do Fuso (mm)

N.ºdiv.: Número de divisões

#### 2.3.3.6 Profundidade de corte

De acordo com (FREITAS, 2017) a profundidade de corte, também é uma das grandezas importantes para o processo de torneamento, o mesmo afirma que a medida da profundidade de corte (ap) é realizada em milímetros e representa a quantidade de material que a ferramenta de corte adentra na peça durante o processo de usinagem.

**Figura 6** - Grandezas de corte no torneamento



Fonte: FREITAS (2017)

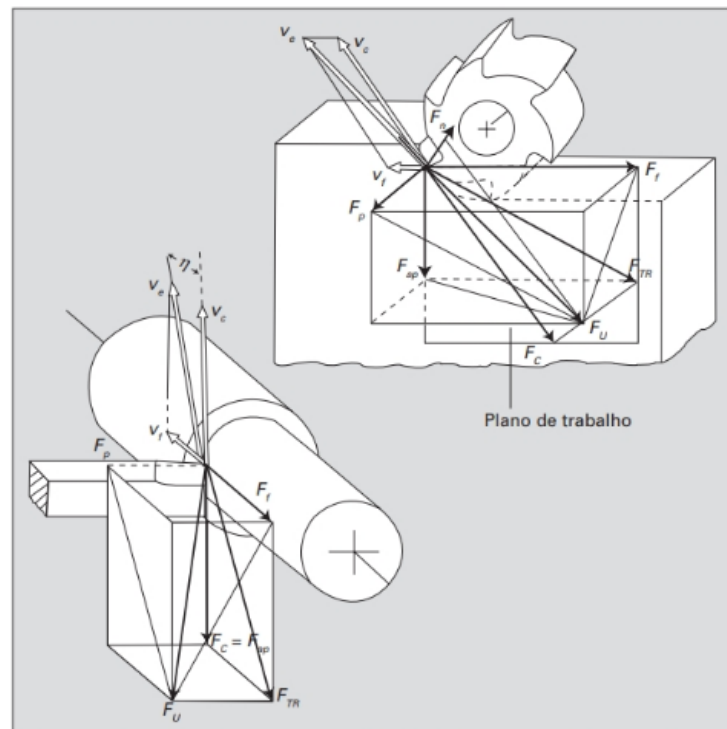
### 2.3.4 Força de usinagem

#### 2.3.4.1 Força de usinagem tridimensional

De acordo com (MACHADO et al., 2015) é de grande importância compreender a força de usinagem que incide sobre a cunha cortante e analisar as suas componentes vetoriais. Essas informações permitem estimar a potência requerida para a operação de corte e também identificar as forças envolvidas nos componentes da máquina-ferramenta. Além disso, esse conhecimento está diretamente relacionado ao desgaste das ferramentas de corte, o que influencia a viabilidade econômica do processo.

Ademais (MACHADO et al., 2015) cita que a cunha cortante é diretamente afetada pela força de usinagem (FU) devido à sua localização no espaço tridimensional, o que implica na presença de três componentes fundamentais. Essas componentes, por sua vez, exercem influência na estrutura da máquina-ferramenta.

**Figura 7** - Força de usinagem e seus componentes



Fonte: MACHADO et al. (2015)

Logo, se vê três principais forças de usinagem, (MACHADO et al., 2015) cita os mesmos como conseguinte:

→ A força principal de corte, também conhecida como força de corte ( $F_c$ ): é obtida por meio da projeção da força de usinagem no plano de trabalho, na direção do corte. Essa projeção é determinada pela velocidade de corte.

→ Força de avanço ( $F_f$ ): A força principal de corte, também conhecida como força de corte ( $F_c$ ), é resultado da projeção da força de usinagem no plano de trabalho, seguindo a direção de avanço. Essa projeção é determinada pela velocidade de avanço.

→ Força passiva ou força de profundidade ( $F_p$ ): A projeção da força de usinagem perpendicularmente ao plano de trabalho é o que define a força principal de corte.

Dessa forma, a relação entre as três principais forças vale, como na seguinte figura:

**Equação 5** - Força de usinagem e seus componentes

$$F_u = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [\text{N}]$$

Fonte: MACHADO et al. (2015)

#### 2.3.4.2 Potência de usinagem

Conforme (MACHADO et al., 2015) a determinação da potência de usinagem envolve a combinação das potências necessárias para cada componente da força de usinagem, bem como a multiplicação da velocidade pela força e pelo cosseno do ângulo entre elas. Nesse sentido, apenas os componentes de corte e avanço contribuem para a potência de usinagem.

**Equação 6** - Fórmula da potência de corte

$$P_c = \frac{F_c \times V_c}{6,0 \times 10^4} \quad [\text{kW}]$$

Fonte: MACHADO et al. (2015)

Onde:

$F_c$ : Força de corte [N]

$V_c$ : Velocidade de corte [m/min]

$P_c$ : Potência de corte [kW]

**Equação 7** - Fórmula da potência de avanço

$$P_f = \frac{F_f \times v_f}{6,0 \times 10^7}$$

Fonte: MACHADO et al. (2015)

Onde:

“A unidade usual em usinagem para a velocidade de avanço é em [mm/min]. Se a potência deve ser expressa em [CV], dividem-se os valores obtidos acima por 0,735.” (MACHADO et al., 2015, p. 129).

Com o resultado de ambas, pode-se usar o resultado dos resultados das potências de corte e avanço para encontrar a potência do motor de acionamento, de forma resumida, dizemos que o mesmo é a quantidade de energia que um motor é capaz de fornecer para realizar determinado trabalho. É uma medida da taxa na qual o motor pode realizar a transferência de energia, seja para mover uma máquina ou para executar uma tarefa específica.

Em relação a potência do motor, pode-se afirmar o seguinte, a potência do motor de acionamento é determinada em cada situação, utilizando a potência resultante das Equações de potência de avanço e corte, que é então dividida pela eficiência dos sistemas de transmissão entre os eixos dos motores e dos sistemas finais responsáveis por entregar a potência à ferramenta ou ao carro de avanço da máquina-ferramenta. Dessa forma, obtém-se o valor da potência do motor de acionamento (MACHADO et al., 2015).

**Equação 8** - Fórmula da potência dos motores eixo-árvore e sistema de avanço

$$P_{mc} = \frac{P_c}{\eta_c} \quad [\text{kW}]$$

$$P_{mf} = \frac{P_f}{n_f} \quad [\text{kW}]$$

Fonte: MACHADO et al. (2015)

Onde:

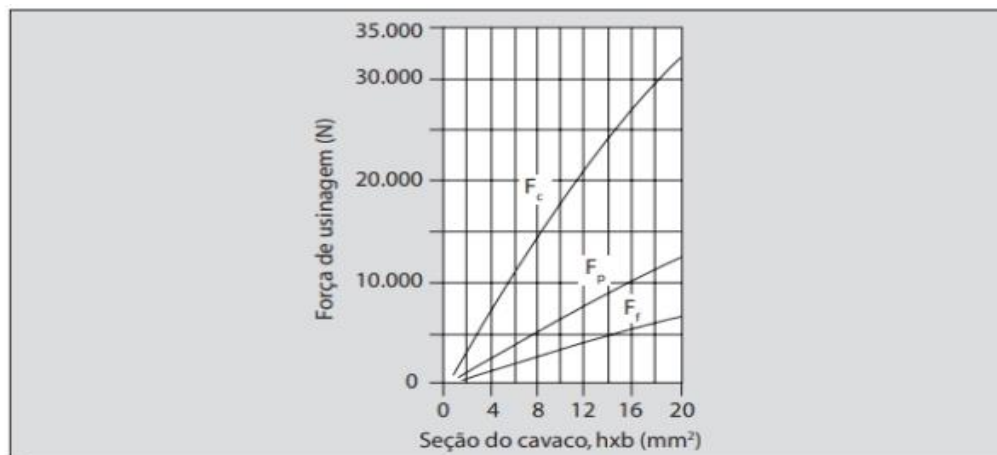
$P_{mc}$  = Potência do motor (eixo árvore)

$P_{mf}$  = Potência do motor (sistema de avanço)

Em sistemas de transmissão com engrenagens ou correias (MACHADO et al., 2015) cita que as eficiências geralmente variam entre 0,65 e 0,85. Para sistemas com motor acoplado, a eficiência fica em torno de 0,80 a 0,85. Em máquinas-ferramentas com um único motor, as potências para avanço são consideravelmente menores do que as potências de corte. Isso ocorre devido às forças de avanço serem menores e às velocidades de avanço serem cerca de mil vezes mais baixas do que as velocidades de corte. Normalmente, a potência de avanço é desprezada na seleção da máquina.

A figura 8 mostra os três componentes na força de usinagem e como os mesmos se proporcionam entre eles.

**Figura 8** - Proporção dos componentes da força de usinagem para o torneamento de aço St42.11, com uma tensão de ruptura de  $\sigma_R = 450 \text{ N/mm}^2$



Fonte: MACHADO et al. (2015)

**Equação 9** - Proporção para usinagem de aços comuns com ferramenta de metal duro

$$Fc: Fp: Ff = 4,5: 2,5: 1$$

Fonte: MACHADO et al. (2015)

Para a seleção da máquina ferramenta as informações fornecidas serão suficientes para a escolha da mesma, (MACHADO et al., 2015) ressalta que se levado em consideração essas proporções, em geral, é possível afirmar que o cálculo da força de corte é o único requisito necessário para selecionar uma máquina-ferramenta com base na potência exigida para a operação de usinagem.

### 2.3.5 Seleção de materiais

A seleção de materiais é uma etapa essencial no desenvolvimento de projetos, independentemente da área de atuação. Essa etapa consiste em escolher os materiais mais adequados com base nos requisitos funcionais, estéticos, econômicos e ambientais do projeto.

Em relação a escolha de um material (ASHBY, 2018) cita que não existe uma solução única "correta" para esses problemas, embora algumas soluções sejam claramente superiores a outras. Eles diferem dos problemas analíticos comumente usados para ensinar mecânica, estruturas ou termodinâmica, que geralmente possuem respostas únicas e corretas. Portanto, a primeira habilidade essencial para um projetista é ter uma mente aberta, estar disposto a considerar todas as possibilidades. No entanto, ao lançar uma rede ampla, capturamos uma grande variedade de peixes. É necessário um procedimento para distinguir o excelente do apenas bom.

Portanto uma seleção cuidadosa dos materiais pode resultar em benefícios significativos, como melhor desempenho, redução de custos, aumento da vida útil do

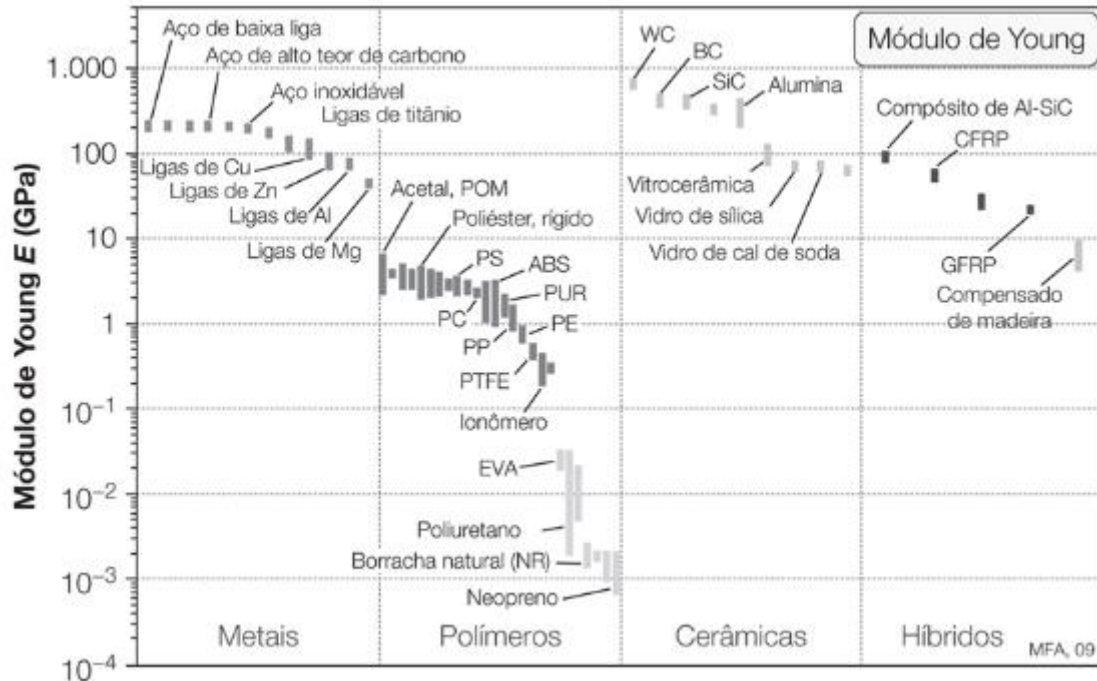
produto e menor impacto ambiental. Por outro lado, uma escolha inadequada pode acarretar em falhas, retrabalho, custos extras e insatisfação do cliente.

#### 2.3.5.1 Mapas de Ashby

Desenvolvido por Michael Ashby, um engenheiro de materiais, o Mapa de Ashby, também conhecido como Mapa de Seleção de Materiais, é uma representação gráfica que estabelece conexões entre as propriedades dos materiais em um espaço bidimensional. Sua finalidade é auxiliar engenheiros e projetistas na escolha dos materiais mais apropriados para determinadas aplicações.

Por meio do Mapa de Ashby, é possível obter uma visão rápida das características dos materiais e identificar possíveis opções para um projeto. Essa ferramenta se mostra valiosa na etapa inicial de seleção de materiais, porém, é necessário realizar análises adicionais e levar em consideração outros fatores antes de tomar uma decisão final.

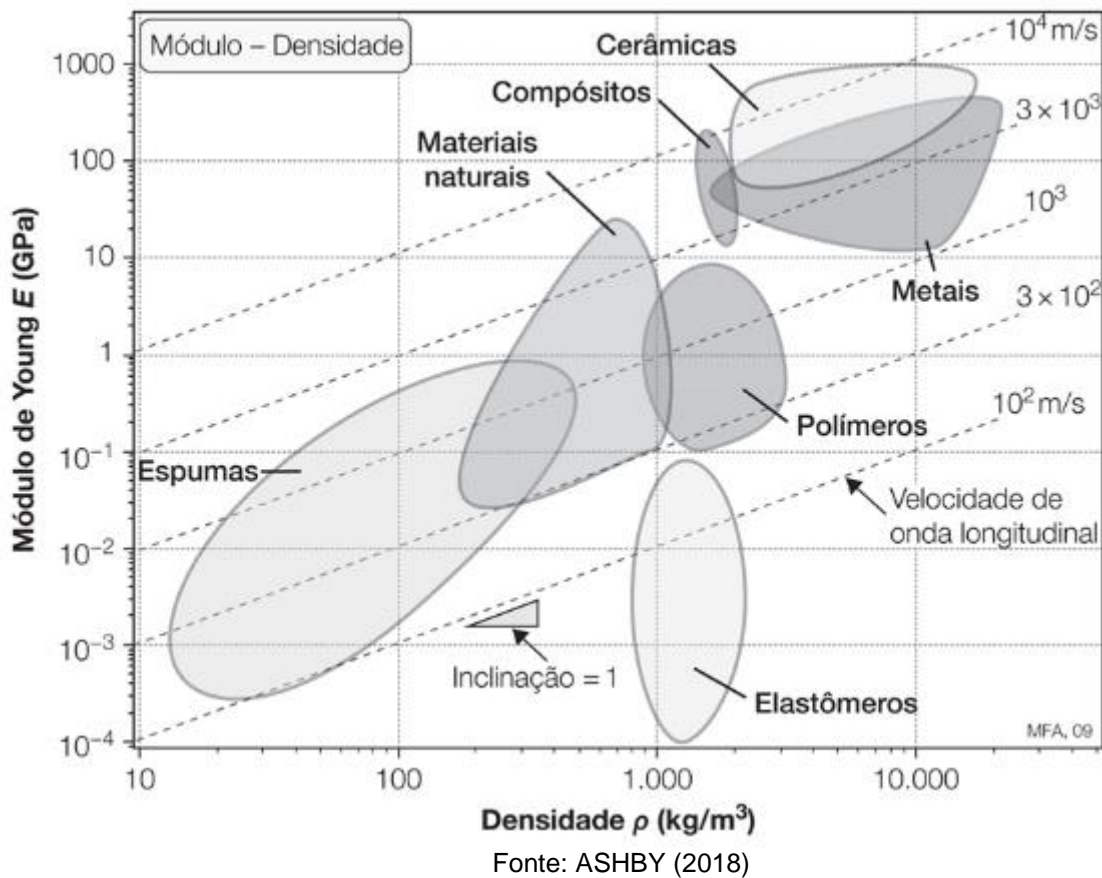
**Figura 9** - Diagrama de barra que mostra módulo para famílias de sólidos



Fonte: ASHBY (2018)

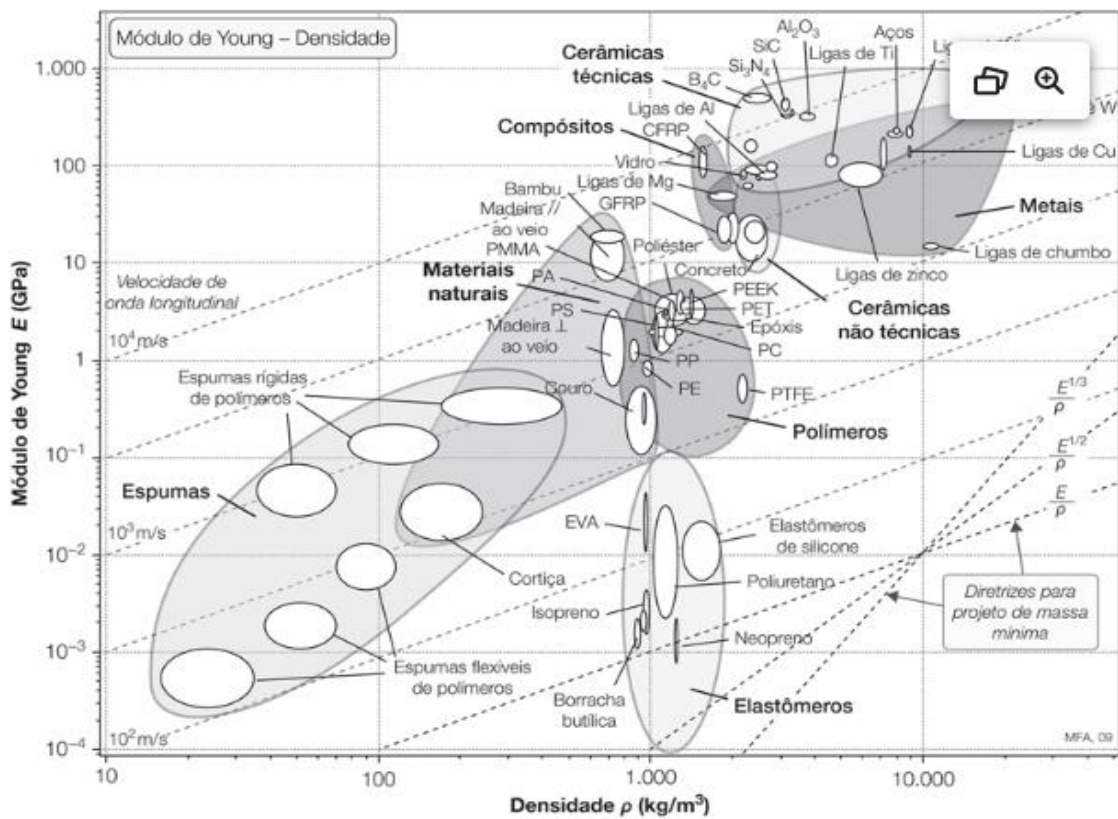
As barras representam diferentes materiais, sendo que o comprimento de cada barra indica a variação dos módulos exibidos pelo material em suas diferentes formas. Os materiais são agrupados em diferentes classes. Cada classe possui uma faixa característica: os metais e cerâmicas têm módulos elevados, os polímeros têm módulos baixos, enquanto os híbridos apresentam uma faixa ampla de módulos, variando de baixos a altos (ASHBY, 2018).

**Figura 10** - Diagrama de propriedade de materiais: Módulo de Young x Densidade



Neste caso, um gráfico representa a relação entre uma propriedade (o módulo,  $E$ ) e outra propriedade (a densidade,  $\rho$ ). A escala dos eixos é escolhida para abranger uma ampla gama de materiais, desde espumas leves e menos rígidas até metais mais pesados e mais rígidos, sendo necessário o uso de escalas logarítmicas. Observa-se que os dados para uma determinada família de materiais (por exemplo, polímeros) tendem a se agrupar; a faixa de variação associada a uma família de materiais é consideravelmente menor em comparação com a faixa total dessa propriedade. Para uma família de materiais, os dados podem ser envolvidos em um envelope de propriedade - representados neste esquema (ASHBY, 2018).

Figura 11 - Diagrama Módulo - Densidade



As propriedades do módulo e densidade são amplamente conhecidas. A rigidez do aço e a flexibilidade da borracha são exemplos de efeitos causados pelo módulo. Da mesma forma, o peso do chumbo e a capacidade de flutuação da cortiça são efeitos relacionados à densidade. A figura 11 ilustra a variação dos módulos de Young,  $E$ , e da densidade,  $\rho$ , para materiais de engenharia. Os dados dos membros de uma família específica de materiais tendem a se agrupar e podem ser representados por meio de um envelope colorido.

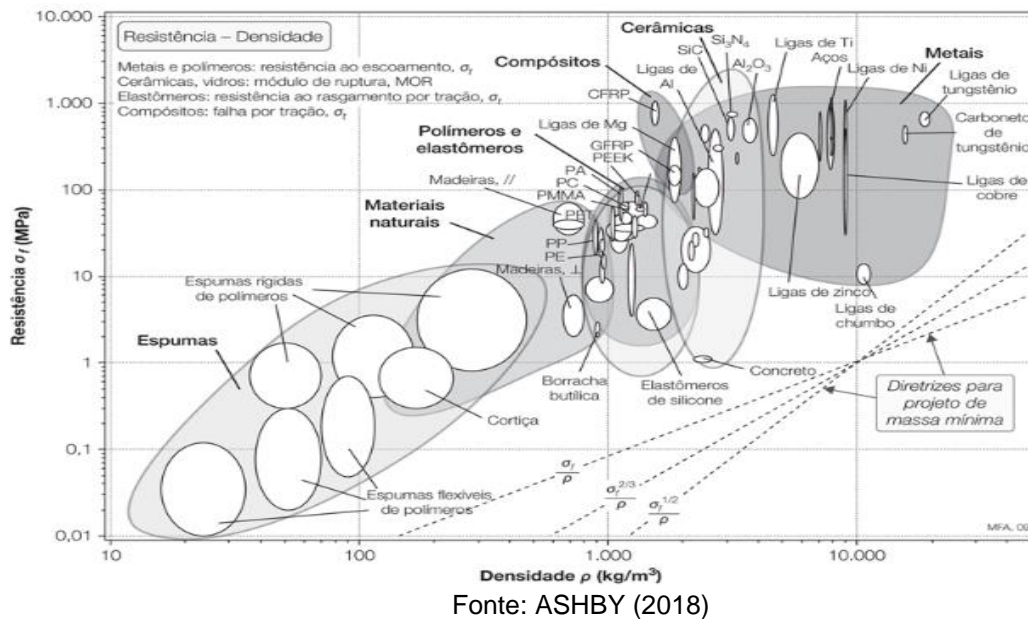
Resumindo, o mapa de Ashby módulo-densidade oferece uma representação gráfica que possibilita a observação da distribuição dos materiais no espaço e a identificação de regiões com características específicas. Por exemplo, materiais com alta rigidez e baixa densidade serão encontrados em uma área do mapa, enquanto materiais com baixa rigidez e alta densidade estarão localizados em outra região. Essa visualização simplifica a compreensão das propriedades dos diferentes materiais e

permite a identificação rápida de opções promissoras para um projeto específico. Além disso, o mapa pode evidenciar tendências e relações entre o módulo e a densidade dos materiais, auxiliando na tomada de decisões e na otimização de projetos (ASHBY, 2018).

Pode-se tirar as seguintes conclusões:

1. O Mapa de Ashby módulo-densidade é uma ferramenta útil para a seleção de materiais em projetos.
2. Através do mapa, é possível visualizar a distribuição dos materiais no espaço e identificar regiões com características específicas.
3. Materiais com alta rigidez e baixa densidade ocupam uma área específica no mapa, enquanto materiais com baixa rigidez e alta densidade estão em outra região.
4. A visualização do mapa facilita a compreensão das propriedades dos materiais e permite a identificação rápida de opções promissoras para um projeto.
5. O mapa também revela tendências e relações entre o módulo e a densidade dos materiais, o que auxilia na tomada de decisões e otimização de projetos.

Figura 12 - Diagrama Resistência - Densidade

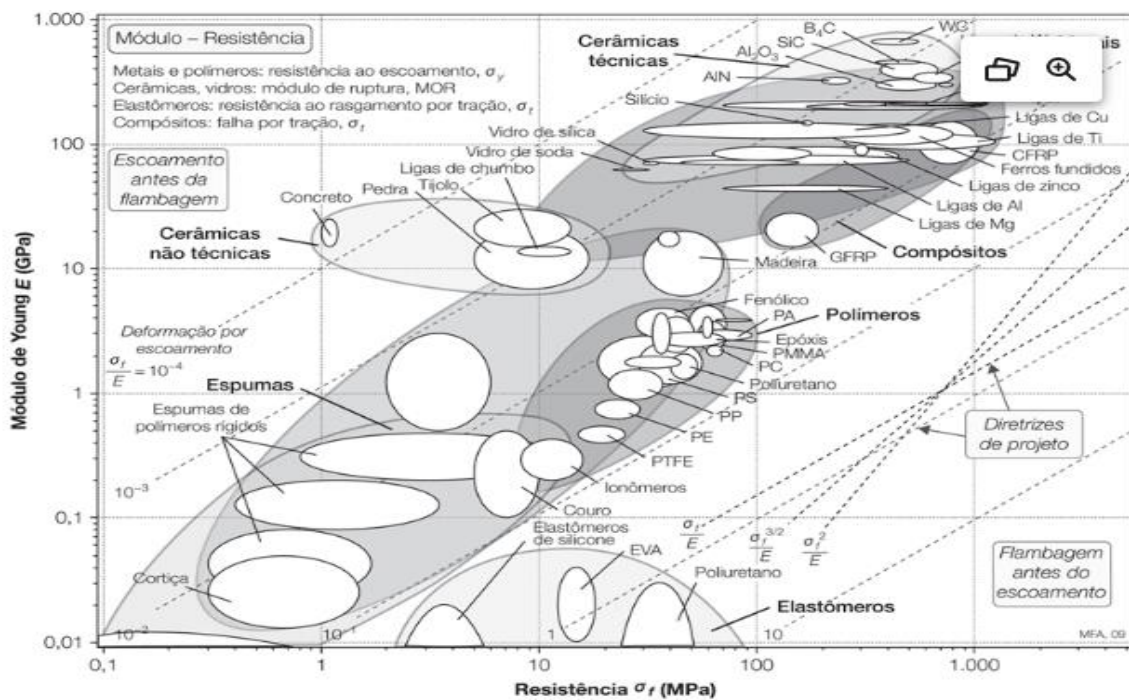


A definição da palavra "resistência" varia de acordo com o tipo de material. No caso de metais e polímeros, ela se refere ao limite de escoamento, que possui uma ampla faixa de valores devido a diferentes processos de endurecimento ou amolecimento. Para cerâmicas frágeis, a resistência representada nos gráficos é o módulo de ruptura, ou seja, a resistência à flexão. Essa resistência é ligeiramente maior do que a resistência à tração, mas muito menor do que a resistência à compressão, que é significativamente maior nas cerâmicas, cerca de 10 a 15 vezes a resistência à tração. No caso de elastômeros, a resistência se refere à capacidade de resistir ao rasgamento por tração, enquanto para compósitos, é a resistência à falha por tração (a resistência à compressão pode ser até 30% menor devido à flambagem das fibras). O símbolo  $\sigma_f$  é utilizado para representar todas essas formas de resistência, permitindo uma comparação inicial entre os materiais, apesar dos diferentes mecanismos de falha envolvidos (ASHBY, 2018).

A faixa de resistência para materiais de engenharia abrange uma ampla gama de valores, com várias ordens de magnitude, variando de menos de 0,01 MPa para espumas usadas em embalagens e sistemas de absorção de energia, até 30.000 MPa para a resistência do diamante, explorada em prensas de bigorna de diamante. Um

conceito fundamental para compreender essa ampla faixa de resistência é a resistência da estrutura cristalina, também conhecida como tensão de Peierls. Essa resistência está intrinsecamente ligada à estrutura cristalina e sua capacidade de resistir ao cisalhamento plástico. Nos metais puros, que são macios, a ligação metálica não localizada não impede significativamente o movimento das discordâncias, enquanto nas cerâmicas, que são materiais duros, as ligações covalentes e iônicas mais localizadas prendem as discordâncias no lugar, exigindo a quebra e a formação dessas ligações durante o cisalhamento. Em sólidos não cristalinos, como polímeros, a resistência está associada à barreira energética para o deslizamento relativo de segmentos em cadeias poliméricas ou para o cisalhamento de aglomerados moleculares em uma rede vítrea (ASHBY, 2018).

Figura 13 - Diagrama Módulo - Resistência



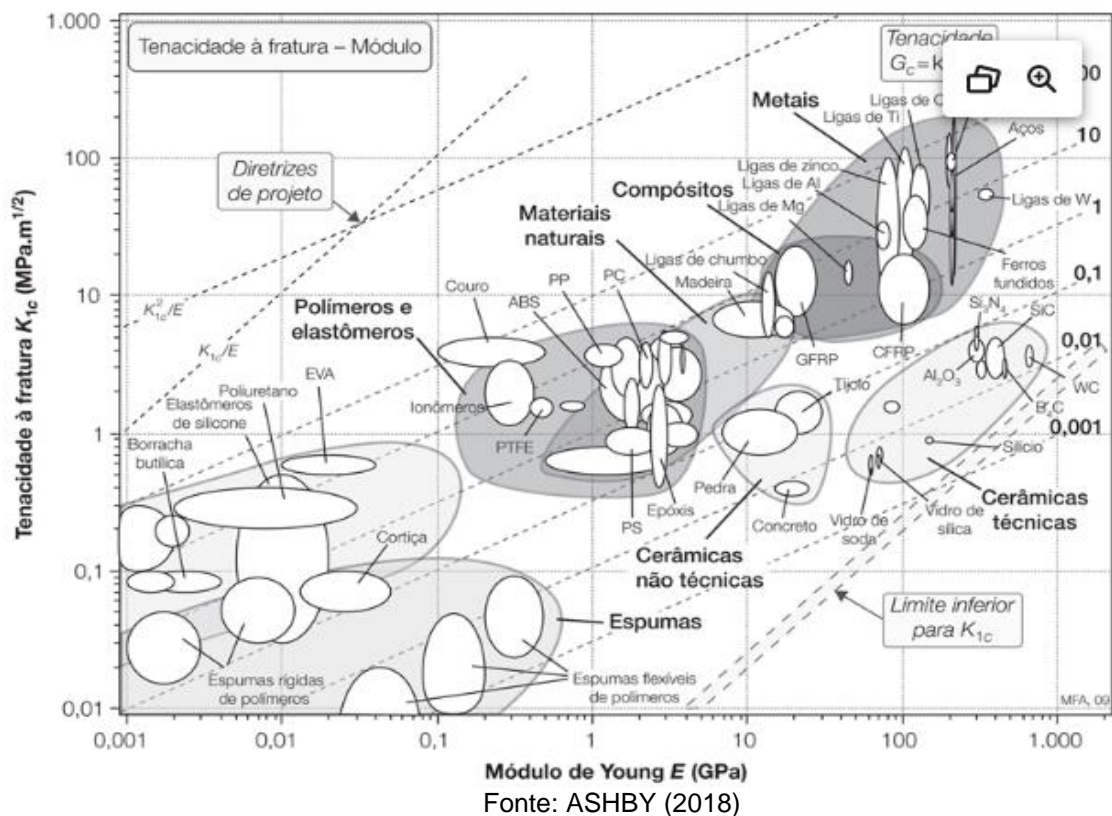
Fonte: ASHBY (2018)

Utilizando o Mapa de Ashby módulo-resistência, é possível visualizar a distribuição dos materiais em um espaço gráfico e identificar regiões que possuem características específicas. Os materiais com alta rigidez e alta resistência serão

encontrados em uma área delimitada no mapa, enquanto os materiais com baixa rigidez e baixa resistência estarão em outra região (Ashby, 2018).

Essa representação gráfica simplifica a compreensão das propriedades dos materiais relacionadas à rigidez e resistência, tornando mais fácil identificar rapidamente opções promissoras para um projeto em particular. Além disso, o mapa pode revelar tendências e relações entre o módulo e a resistência dos materiais, fornecendo auxílio na tomada de decisões e no aprimoramento de projetos (Ashby, 2018).

**Figura 14** - Diagrama Tenacidade à fratura - Módulo

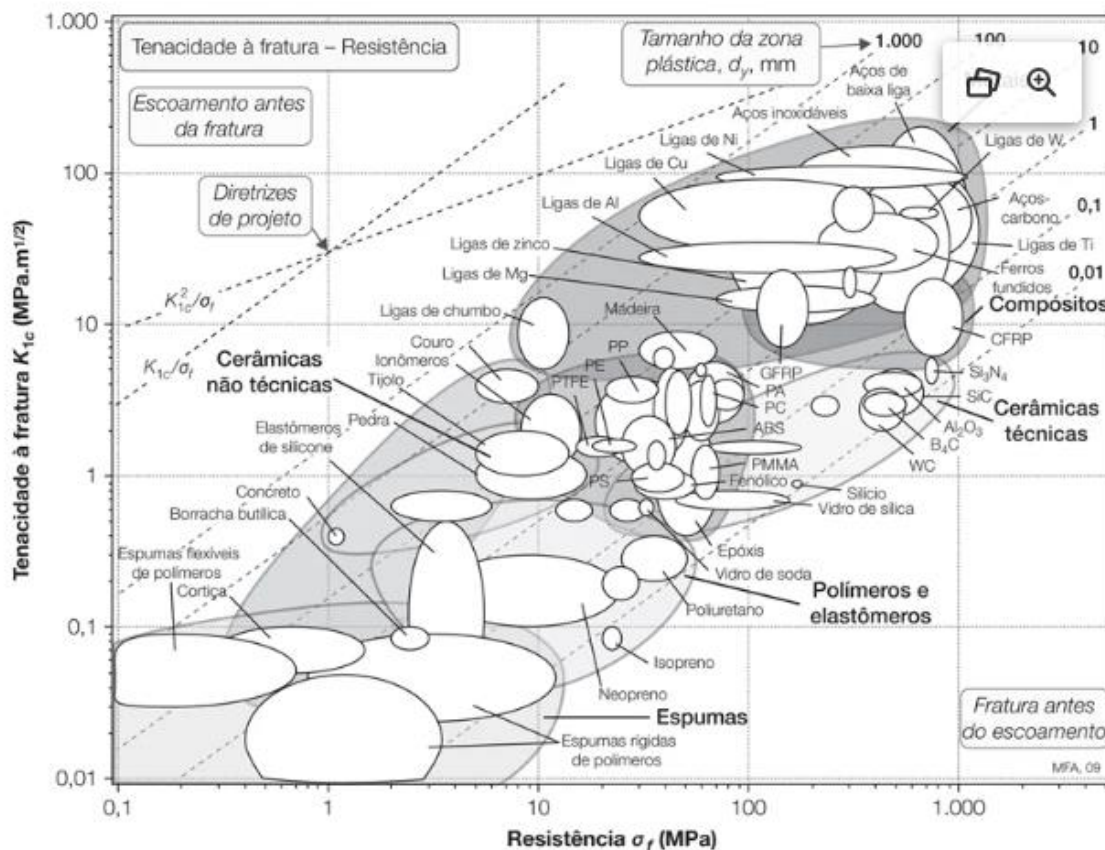


Aumentar a capacidade de resistência de um material é benéfico desde que o material permaneça em um estado plástico, evitando tornar-se frágil. A fragilidade indica uma suscetibilidade a falhas rápidas de fratura que podem ser iniciadas a partir de pequenas trincas ou defeitos presentes no material. A resistência à propagação de trincas é avaliada pela medida da tenacidade à fratura, representada como  $K_{1c}$ , cujas

unidades são  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Essa medida é relacionada graficamente com o módulo E no gráfico apresentado na Figura 14.

Os valores abrangem uma faixa que varia de menos de 0,01 a mais de 100  $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ . Na faixa inferior estão os materiais frágeis, como os vidros, que permanecem elásticos até o momento da fratura quando submetidos a carregamentos, para esses materiais, a mecânica da fratura elástica linear é aplicável e a tenacidade à fratura é uma propriedade bem definida

**Figura 15 - Diagrama tenacidade à fratura - resistência**



Fonte: ASHBY (2018).

A Figura 15 ilustra a relação entre a tenacidade à fratura e a resistência. Linhas diagonais quebradas representam o tamanho da zona de processo,  $d_y$ , que não pode ser menor que as dimensões atômicas. Isso resulta em uma zona de exclusão

representada pelo triângulo sombreado no canto inferior direito do gráfico. O tamanho da zona de processo varia desde dimensões próximas às atômicas para materiais cerâmicos e vidros altamente frágeis até cerca de 1 metro para metais altamente dúcteis. Com o tamanho da zona de processo mantido constante, observa-se um aumento esperado na tenacidade à fratura com o aumento da resistência. Esse padrão é responsável pela concentração dos dados ao longo da diagonal no diagrama da Figura 15. Materiais posicionados na parte inferior direita do gráfico apresentam alta resistência e baixa tenacidade, indicando que tendem a fraturar antes de atingir o limite de escoamento. Por outro lado, materiais na parte superior esquerda mostram o comportamento oposto, onde ocorre o escoamento antes da fratura.

#### 2.3.5.2 Conclusões sobre os mapas

O número exato de mapas de Ashby pode variar dependendo de diferentes fontes e abordagens. O mapa de Ashby originalmente introduzido por Michael Ashby foi o Mapa de Seleção de Materiais, que relaciona propriedades dos materiais em um espaço bidimensional. No entanto, ao longo dos anos, várias variações e adaptações do mapa de Ashby surgiram para abordar diferentes propriedades e contextos específicos. Alguns exemplos incluem o Mapa de Ashby módulo-densidade, o Mapa de Ashby módulo-resistência e o Mapa de Ashby tenacidade-módulo, entre outros. Cada mapa se concentra em diferentes combinações de propriedades e tem o objetivo de auxiliar engenheiros e projetistas na seleção de materiais adequados para diferentes aplicações. Portanto, não há um número fixo de mapas de Ashby, pois eles podem ser adaptados e personalizados para atender às necessidades específicas de cada área de estudo ou projeto.

### 3 METODOLOGIA

O presente estudo sugere que possa se enquadrar tanto na pesquisa descritiva como na explicativa, indicando uma abertura para ambas as abordagens. No entanto, é crucial ressaltar que uma avaliação mais aprofundada é necessária para uma conclusão definitiva. Isso se deve à importância de caracterizar o fenômeno para compreender as falhas no material, ao levantar dados e variáveis relacionadas ao problema de causa e efeito. Nesse processo, a pesquisa explicativa torna-se relevante, pois entender como um fenômeno ocorre exige aprofundamento no assunto. Isso não se limita a descobrir apenas como ocorre o evento, mas também a compreender o porquê de tal fenômeno acontecer.

Ao caracterizar se a pesquisa se enquadra como quantitativa ou qualitativa, destaca-se o foco principal em uma abordagem qualitativa. A coleta de dados do mandril será realizada pelo autor, e os resultados obtidos serão interpretados pelo pesquisador. As técnicas, que incluem a troca de material, inserem características complexas à pesquisa, especialmente considerando a natureza específica do serviço que a peça propõe desempenhar. No entanto, não se pode descartar o papel da pesquisa quantitativa, uma vez que a aplicação de técnicas e ferramentas estatísticas terá uma participação significativa no trabalho proposto, especialmente aquelas referenciadas pelo autor.

Referente às variáveis envolvidas no estudo, estas são amplas. A melhoria de uma peça não se limita apenas ao material específico, mas também considera como é feita a peça e onde ela será utilizada. Portanto, a estrutura do material é apenas uma das variáveis no aprimoramento da peça. Para isso, o pesquisador deve aprofundar sua compreensão sobre como e onde o equipamento é utilizado, buscando melhorar seu desempenho no local de atuação. Além disso, é crucial realizar uma análise do material utilizado e compreender o processo de fabricação desse material.

Em relação às técnicas e procedimentos adotados, é fundamental determinar o método de fabricação, no caso da carcaça, orientando-se para a usinagem. Os

testes serão conduzidos por meio de uma peça recriada no SolidWorks, visando aumentar sua resistência mecânica, sendo posteriormente analisados por simulações de elementos finitos. Diferentemente dos ensaios baseados em horas de trabalho até a falha, a abordagem envolverá a avaliação detalhada das características estruturais e de resistência da peça. A realização dos testes compreenderá a programação de um código CNC para a fabricação, permitindo a execução do processo sem a necessidade do uso físico do torno.

No que diz respeito às ferramentas necessárias, na elaboração do projeto, será utilizado o software SolidWorks para modelagem e simulação, além de materiais didáticos para a criação do código CNC e recursos educativos na escolha do material. Para futuros estudos sobre a carcaça de mandril modificada, será necessário o emprego do torno CNC, juntamente com ferramentas como brocas e pastilhas, além dos tarugos do material escolhido. Essa abordagem, focada em recursos tecnológicos e didáticos, estabelecerá uma base sólida para o desenvolvimento do projeto.

## 4. ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DA CARÇAÇA DE MANDRIL

### 4.1 Análise de rupturas: Carçaça de mandril sob estudo

Nesta investigação, direcionamos nosso foco para a análise de uma imagem que retrata a carçaça de um mandril com rupturas evidentes, ficando claro onde as mesmas ocorrem. A figura 16 atua como uma janela para a compreensão aprofundada das consequências das rupturas em componentes mecânicos, enfatizando a importância da análise crítica na engenharia e contribuindo para o corpo de conhecimento neste campo específico.

**Figura 16** - Carçaça de Mandril Defeituosa



Fonte: Própria (2023)

A Figura 17 apresenta, à esquerda, a posição da carcaça do mandril no trator cortador de grama. À direita, são destacados os componentes que se conectam diretamente a ela, incluindo o mandril, a garra de corte e o sistema de polias.

**Figura 17** - Localização carcaça de mandril no trator huskvarna TS 142



Fonte: Própria (2023)

#### **4.2 Descrição do processo de modificação da carcaça de mandril**

Para realizar a modificação do formato da carcaça de mandril o primeiro passo consistiu em obter a peça original em mãos, com isso, a obtenção das medidas originais foi obtida manualmente para que a mesma pudesse ser recriada através do software solidworks, a intenção de obter o desenho em formato original teve por objetivo fazer análises estruturais da peça e para isso o molde e material padrão seriam necessários.

Após a obtenção da análise, o próximo passo envolve a modificação do formato da peça. Considerando que a peça original apresenta falhas mecânicas em suas extremidades, a decisão de alterar o formato da base para uma configuração que distribua de maneira mais adequada as tensões foi baseada na análise dos resultados obtidos. O objetivo é evitar pontos críticos de tensão. A configuração escolhida visa proporcionar uma distribuição eficiente das forças ao submeter o material a tensão mecânica, evitando a concentração de tensão em pontos específicos, o que ocorria na peça original e levava a rupturas nas extremidades.

O terceiro procedimento consistiu na modificação da região chanfrada que conectava a base ao formato cilíndrico. Considerando a produção da peça por meio de CNC, as partes chanfradas introduzem complexidades detalhadas que podem dificultar a fabricação. Dessa forma, optou-se por remover os chanfros e reformular essa conexão com uma abordagem mais circular. Essa escolha visa simplificar o design, facilitando a produção. Além disso, uma redução na espessura da base foi implementada para otimizar os custos de fabricação.

### **4.3 Razão da troca do material de alumínio para aço 1020**

A escolha de materiais para componentes mecânicos desempenha um papel crucial no design e desempenho de equipamentos. A mudança de material é uma decisão estratégica que pode influenciar a resistência, durabilidade e eficiência operacional do componente.

O aço 1020 apresenta características mecânicas, como resistência e tenacidade, que podem ser superiores em comparação ao alumínio. Essas características são essenciais para enfrentar as cargas e impactos inerentes ao desempenho do mandril em um ambiente operacional desafiador. O limite de escoamento, resistência à tração, dureza e fragilidade desempenham um papel crucial na capacidade do mandril de suportar as condições adversas encontradas durante seu funcionamento. Ademais, o aço 1020 é conhecido por sua alta resistência à fadiga, o que é essencial para componentes sujeitos a ciclos repetitivos de carga e descarga, como a carcaça do mandril de um trator cortador de grama. Essa resistência contribui diretamente para a durabilidade do componente. A disponibilidade e custos relativamente baixos do aço 1020 em comparação com o alumínio podem influenciar positivamente os custos de fabricação. Além disso, a manutenção e reparos podem ser mais acessíveis, considerando a ampla utilização e conhecimento existente em relação ao aço.

A substituição do alumínio pelo aço 1020 na carcaça do mandril de um trator cortador de grama é fundamentada em uma análise meticulosa das propriedades dos materiais, desempenho estrutural, custos e conformidade normativa. Essa decisão busca aprimorar a durabilidade, resistência e eficiência operacional do componente, representando uma abordagem estratégica para otimizar o design e o desempenho do trator cortador de grama.

Para uma visão mais detalhada das características do alumínio e do aço 1020, apresentamos a seguir uma tabela comparativa:

**Tabela 1** - Comparação de Propriedades Mecânicas entre Alumínio e Aço 1020

	ALUMÍNIO	AÇO 1020
LIMITE DE ESCOAMENTO	15 a 70 (Mpa)	350 (Mpa)
RESISTÊNCIA A TRAÇÃO	55 a 95 (Mpa)	420 (Mpa)
DUREZA	15 a 150 (HB)	111 a 260 (HB)
FRAGILIDADE	QUEBRADIÇO	MACIO

Fonte: Própria (2023)

A tabela 1 compara propriedades específicas, como limite de escoamento, resistência à tração, dureza e fragilidade, entre o alumínio e o aço 1020, fornecendo uma visão mais detalhada para facilitar a escolha do material mais apropriado para a aplicação na carcaça do mandril.

#### **4.4 Corrosão do Aço 1020: Desafios, Mecanismos e Estratégias de Prevenção**

A definição abrangente de corrosão, conforme expressa por Vicente Gentil, destaca a universalidade e aceitação generalizada deste fenômeno na deterioração

de materiais, especialmente aqueles de natureza metálica. Sobre a corrosão, podemos afirmar que:

Em um aspecto muito difundido e aceito universalmente, pode-se definir corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. A deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o seu meio operacional representa alterações prejudiciais indesejáveis, sofridas pelo material, como desgaste, variações químicas ou modificações estruturais, tornando-o inadequado para o uso.

(GENTIL, 2022, p.1).

Segundo SILVA (2015), a oxidação indesejada, representada pelo surgimento da ferrugem, é um fenômeno desagradável comum no cotidiano humano. Embora a compreensão completa de seus mecanismos escape à maioria das pessoas, a consciência de que esse processo inevitavelmente conduzirá à necessidade de reparo ou substituição de materiais metálicos está presente. Esse evento ocorre de maneira predominante em ferro e em diversas ligas ferrosas, como os aços-carbono, quando expostos à atmosfera ou imersos em águas naturais. Dado que esses aços são amplamente empregados nas indústrias metalomecânicas e na construção civil, seja na forma de chapas, placas, barras ou tubos, eles ilustram de maneira evidente o que se denomina genericamente como "corrosão".

No mundo da engenharia e da indústria, o aço 1020 é uma escolha popular devido à sua maleabilidade e facilidade de processamento. No entanto, uma preocupação constante que paira sobre as mentes dos engenheiros e fabricantes é a inevitável ameaça da oxidação. A corrosão pode comprometer não apenas a estética, mas também a integridade estrutural do aço. Diante desse desafio, é imperativo explorar estratégias eficazes para prevenir a oxidação do aço 1020.

Para solucionar o problema da oxidação algumas técnicas podem ser utilizadas, vamos citar três práticas que podem ajudar a prevenir esse fenômeno:

**Oxidação Negra:** De acordo com Zempulski, L. N., & Zempulski, M. F. S. (2008), a oxidação negra, também designada como bluing devido à sua tonalidade preto-azulada resultante do revestimento final, e por vezes chamada de browning ao se referir a processos históricos do século 18, representa uma técnica ancestral de

passivação usada predominantemente na cobertura de superfícies de ferro e aço. Esse método implica a formação de uma camada de conversão resultante da reação química de oxidação com o ferro na superfície, resultando seletivamente em magnetita,  $Fe_3O_4$ , que é o óxido negro de ferro preenchendo o mesmo volume do metal reduzido.

Apesar de o óxido negro, por si só, conferir uma proteção mínima contra a corrosão, seu tratamento adicional com soluções oleosas reduz as ações galvânicas e de umidade, aumentando assim a resistência do material aos processos corrosivos. Em contraste, o óxido vermelho de ferro ( $Fe_2O_3$ ), comumente conhecido como "ferrugem" e observado na corrosão vermelha generalizada do metal, não se expande no mesmo volume do metal ferro, causando danos consequentes.

**Pintura:** A pintura é uma das estratégias mais comuns e eficazes para proteger metais contra a corrosão. A corrosão é um processo natural que ocorre quando metais reagem com elementos presentes no ambiente, como oxigênio e umidade, levando à formação de óxidos indesejados. A pintura cria uma barreira física entre o metal e o ambiente, proporcionando diversos benefícios na prevenção da corrosão.

De acordo com LOPES (2019), a barreira mecânica consiste na aplicação de tintas com elevada impermeabilidade, cuja eficácia está relacionada ao tipo e à espessura do filme. Essas tintas atuam como uma barreira mecânica simples, independentemente do número de demãos, impedindo principalmente a entrada de oxigênio e água até a superfície da pintura. No entanto, a proteção desse tipo depende da perfeição do filme, sem apresentar ranhuras, bolhas, áreas com menor espessura, entre outros. Em locais que demandam proteção extrema, como porões de navios e fundos de tanques, são comumente utilizadas tintas epóxi e alcatrão/epóxi devido ao seu notável poder de impermeabilização.

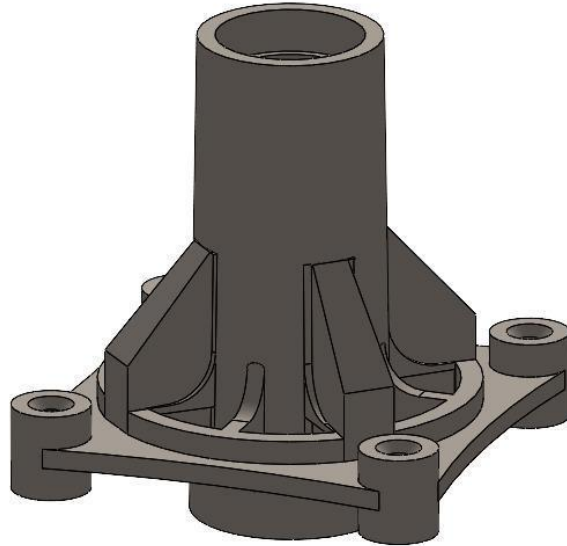
**Galvanização:** A galvanização é um processo de revestimento de metais com uma camada de zinco para protegê-los da corrosão. Esse método é amplamente utilizado na indústria para preservar materiais metálicos, especialmente o ferro e o aço. Segundo PANNONI (2008), a galvanização a fogo é um processo no qual um componente metálico é submerso em zinco líquido após cuidadosa limpeza e

preparação. A rápida interação entre a superfície do componente e o zinco líquido resulta na formação de uma camada composta por ligas zinco/ferro conhecidas como intermetálicos, que estabelecem uma sólida "ligação metalúrgica". Após a remoção do componente do banho, uma camada de zinco puro cobre a superfície e as camadas de intermetálicos, proporcionando uma coloração brilhante. A camada de intermetálicos oferece uma barreira protetora e proteção galvânica eficiente contra corrosão, enquanto a camada externa de zinco mais macia protege contra abrasão e impacto durante o uso do componente. Este processo visa garantir a durabilidade e resistência do material tratado.

#### **4.5 Comparação entre a estrutura original e a modificada**

O formato original se baseia em chanfros conectados à estrutura cilíndrica principal do corpo, vale ressaltar que a base é ligada diretamente nos chanfros e apresenta formato que interliga quatro pinos nas extremidades. Os defeitos de trincas acontecem na base com mais intensidade nas extremidades, isso se deve ao fato que o material de alumínio não tem a resistência mecânica adequada ao tipo de serviço executado, além disso, como já dito anteriormente ao longo do estudo, formatos com cantos vivos favorecem o aumento de tensão quando uma força é aplicada. A seguir uma ilustração do formato original da carcaça de mandril.

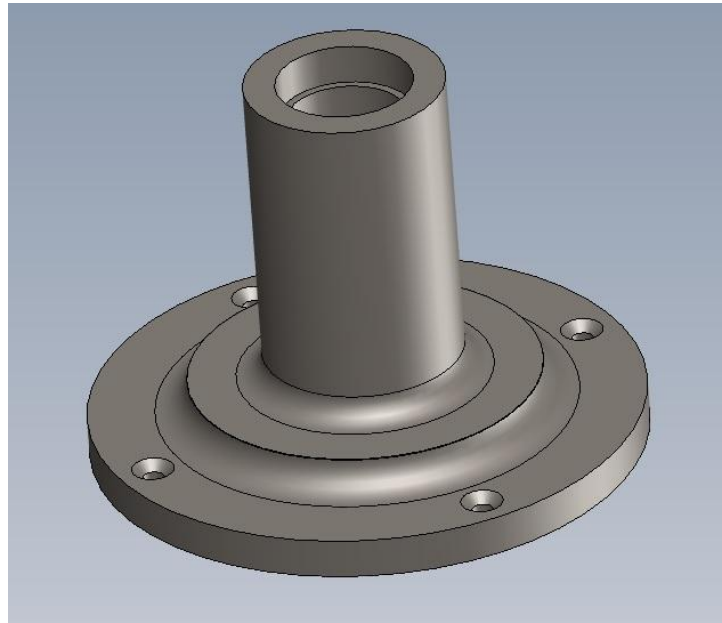
**Figura 18** - Modelo original da carcaça de mandril



Fonte: Própria (2023)

O modelo modificado apresenta uma modificação clara na base e na ligação que conecta ao corpo cilíndrico central, sendo que, a base agora é circular e no lugar dos chanfros a modificação passa a ser uma estrutura que se conecta através de círculos sobrepostos com ângulos de 10 e 8 graus.

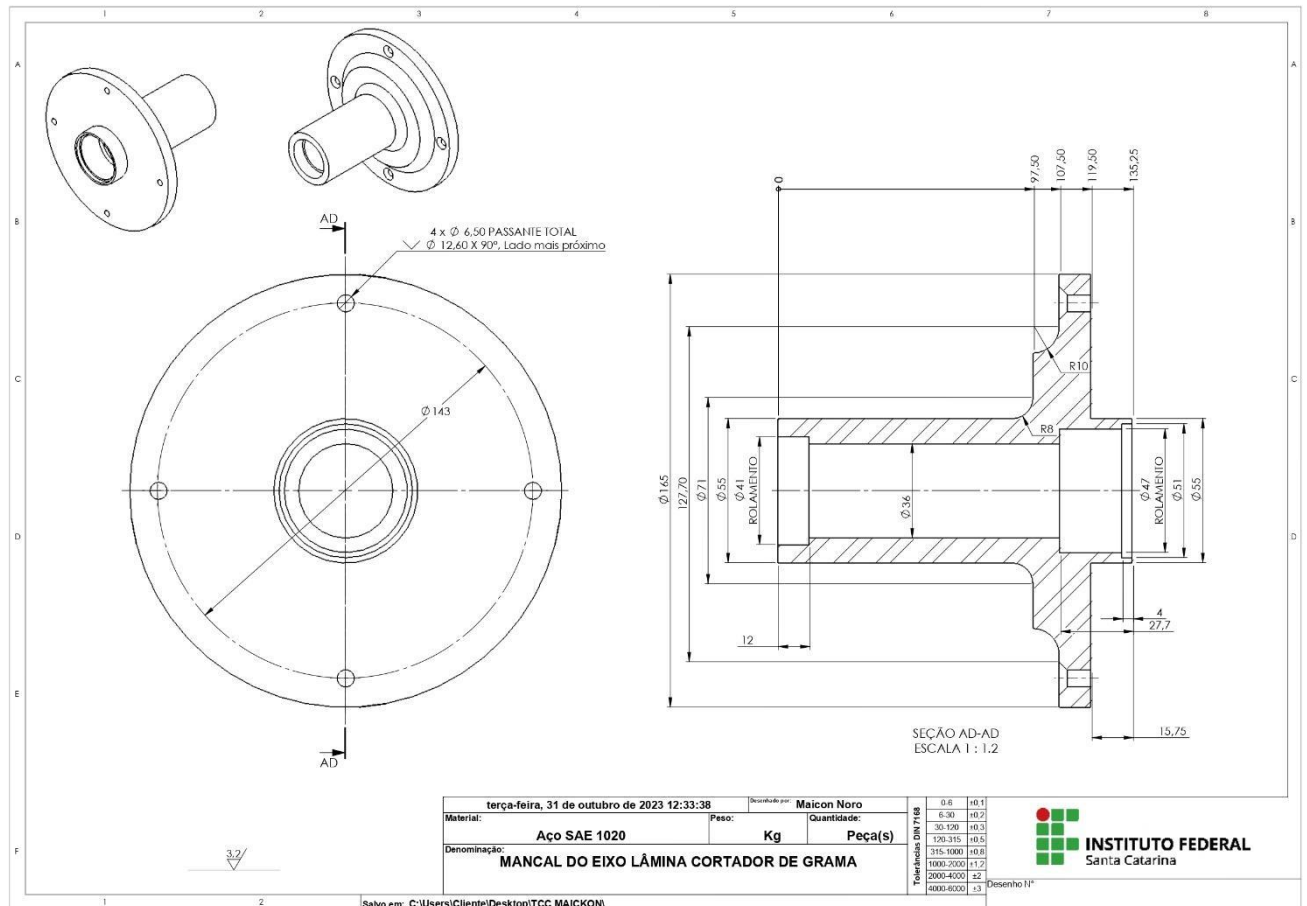
**Figura 19** - Modelo modificado da carcaça de mandril



Fonte: Própria (2023)

## 4.6 Desenho Técnico da Carça de Mandril modificada

Figura 20 - Desenho técnico carça de mandril



Fonte: Própria (2023)

## 4.7 Vantagens e desvantagens das modificações

A tabela a seguir discute as mudanças implementadas na carça do mandril do cortador de grama, focalizando na alteração do formato da base e na substituição do alumínio por aço 1020. Destacando aspectos como redução de tensões, resistência mecânica aprimorada, e considerações gerais, a análise visa oferecer uma visão concisa dos impactos dessas modificações na eficácia e durabilidade do equipamento. A tabela 2 apresenta uma síntese organizada dessas discussões, abordando pontos cruciais e ressaltando áreas de atenção para futuros trabalhos.

**Tabela 2** - Discussão sobre a Eficácia das Mudanças Realizadas no Cortador de Grama

<b>Tópico</b>	<b>Discussão</b>
<b>Alteração no Formato da Base</b>	A modificação na carcaça do mandril, que envolveu a alteração do formato da base e a substituição do material de alumínio por aço 1020, tem potencial para impactar a eficácia e durabilidade do cortador de grama.
	- Redução de Tensões: A mudança para uma base circular e a eliminação dos chanfros podem reduzir a concentração de tensões nas extremidades, especialmente onde ocorriam trincas no modelo original.
	- Distribuição Uniforme de Forças: A nova estrutura com círculos sobrepostos pode proporcionar uma distribuição mais uniforme das forças, minimizando pontos de concentração de tensão.
	- Resistência Mecânica Aprimorada: O formato modificado pode melhorar a resistência mecânica, especialmente se os círculos sobrepostos dissiparem melhor as forças ao longo da estrutura.
<b>Substituição do Material</b>	- Resistência Mecânica Aumentada: O aço 1020 possui resistência mecânica superior ao alumínio, beneficiando a capacidade de suportar cargas e forças, aumentando a durabilidade e reduzindo a propensão a trincas.
	- Resistência à Fadiga: Dependendo da especificação, o aço pode ter melhor resistência à fadiga em comparação com o alumínio, crucial para equipamentos sujeitos a ciclos repetidos de carga e descarga, como o cortador de grama.
<b>Considerações Gerais</b>	- Peso Adicional: O aço é mais denso que o alumínio, resultando em um aumento no peso total do mandril, o que pode impactar a manobrabilidade e eficiência do cortador de grama,

	dependendo da configuração geral do equipamento.
	- Custos e Processabilidade: A substituição do material pode afetar o custo de produção do mandril, sendo crucial considerar também a processabilidade do aço em comparação com o alumínio durante a fabricação.
<b>Trabalhos Futuros</b>	- Testes Práticos: É crucial realizar testes de resistência, durabilidade e desempenho em condições simuladas de uso para validar as mudanças propostas na carcaça do mandril.
	- Feedback dos Usuários: Coletar feedback dos usuários após a implementação é essencial para avaliar a eficácia real das mudanças, proporcionando insights valiosos sobre o desempenho em situações do mundo real.
<b>Conclusão</b>	Em resumo, a modificação na carcaça do mandril parece ter potencial para melhorar a resistência e durabilidade do cortador de grama, mas é fundamental realizar testes práticos para validar as mudanças e considerar fatores como peso adicional e custo de produção.

Fonte: Própria (2023)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Apresentação dos dados obtidos durante a análise técnica

A análise técnica da carcaça do mandril do cortador de grama revelou modificações significativas, nas quais o material original de alumínio foi substituído por aço 1020, e o formato foi alterado. Os dados obtidos para ambas as peças, a original e a modificada, são os seguintes:

Peça Original:

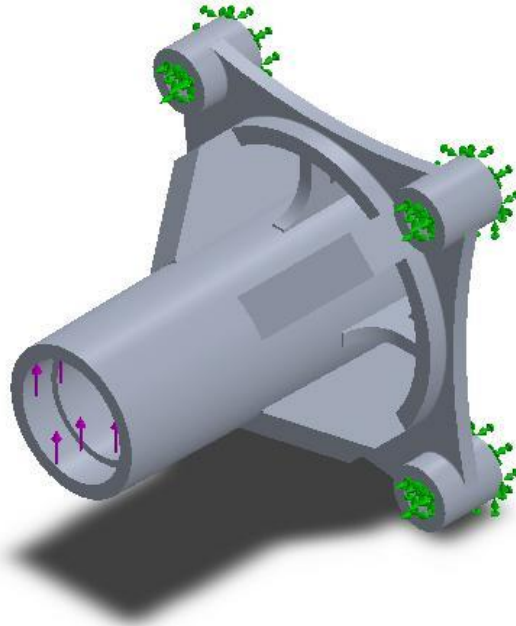
Massa: 0.679907 kg; Volume: 0.000251817 m<sup>3</sup>; Densidade: 2700 kg/m<sup>3</sup>; Peso: 6.66309 N

Peça Modificada:

Massa: 4.98962 kg; Volume: 0.000634005 m<sup>3</sup>; Densidade: 7870 kg/m<sup>3</sup>; Peso: 48.8983 N

As tabelas 3 e 4 apresentam dados obtidos da carcaça original e modificada durante a análise de elementos finitos utilizando o Solidworks.

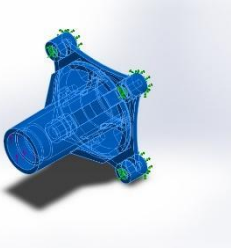
**Tabela 3 - Informações Carcaça de Mandril Original**



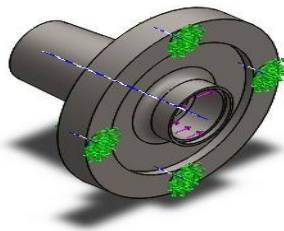
Nome do modelo: PADRÃO

Configuração atual: Default

**Corpos sólidos**

Nome e referência do documento	Tratado como	Propriedades volumétricas	Caminho/Data do documento modificado
<p><b>Importado1</b></p> 	<p><b>Corpo sólido</b></p>	<p><b>Massa:0.679907 kg</b>  <b>Volume:0.000251817 m<sup>3</sup></b>  <b>Densidade:2700 kg/m<sup>3</sup></b>  <b>Peso:6.66309 N</b></p>	

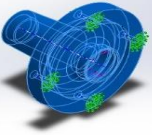
Fonte: Própria (2023)

**Tabela 4 - Informações Carcaça de Mandril Modificada**

Nome do modelo: Modificado

Configuração atual: Default

**Corpos sólidos**

Nome e referência do documento	Tratado como	Propriedades volumétricas	Caminho/Data do documento modificado
<p><b>Importado1</b></p> 	<p><b>Corpo sólido</b></p>	<p><b>Massa:4.98962 kg</b>  <b>Volume:0.000634005 m<sup>3</sup></b>  <b>Densidade:7870 kg/m<sup>3</sup></b>  <b>Peso:48.8983 N</b></p>	

Fonte: Própria (2023)

Esses dados destacam claramente as mudanças substanciais na massa, volume, densidade e peso após as modificações. A peça modificada, mais pesada e densa, sugere potenciais alterações nas propriedades estruturais e de desempenho. Essa comparação será fundamental para avaliar a eficácia das alterações no contexto do funcionamento do mandril do cortador de grama.

### **Propriedades do Material**

Para conduzir uma avaliação abrangente, destacamos informações cruciais relacionadas ao material empregado, ao limite de escoamento e à resistência à tração de ambas as carcaças.

**Carcaça do Modelo Original (Alumínio):** A carcaça do modelo original foi inicialmente concebida em alumínio, um material conhecido por sua leveza e boa condutividade térmica. Detalhes sobre o limite de escoamento e resistência à tração deste material fornecerão insights fundamentais para compreender suas propriedades estruturais.

**Limite de Escoamento:** O limite de escoamento é uma medida crucial que indica a máxima tensão que o material pode suportar antes de começar a se deformar permanentemente. Esse parâmetro fornece insights valiosos sobre a capacidade da carcaça original de suportar cargas sem alterações irreversíveis.

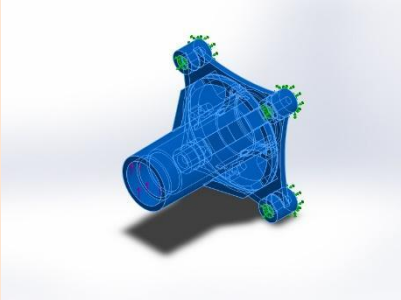
**Resistência à Tração:** A resistência à tração representa a capacidade do material resistir a forças de tração antes de atingir o ponto de ruptura. Este dado é de extrema importância para avaliar a robustez estrutural da carcaça original.

**Carcaça Modificada para Aprimorar Resistência Mecânica (Aço 1020):** A segunda carcaça, resultado de modificações, foi fabricada em aço 1020, um material reconhecido por sua resistência mecânica superior. Novamente, fornecemos informações sobre o limite de escoamento e a resistência à tração deste novo material.

A comparação desses parâmetros entre as duas carcaças proporcionará uma visão abrangente das melhorias alcançadas pela modificação, contribuindo para uma análise criteriosa do desempenho e durabilidade do mandril do cortador de grama.


As Tabelas 5 e 6 apresentam os limites de escoamento e resistência à tração tanto da carcaça original quanto da carcaça modificada obtidos durante a análise de elementos finitos via Solidworks.

**Tabela 5** - Propriedades Carcaça de Mandril Original

Referência do modelo	Propriedades	Componentes
	<p><b>Nome:</b> Liga 1060</p> <p><b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico linear elástico</p> <p><b>Critério de falha predeterminado:</b> Tensão de von Mises máxima</p> <p><b>Limite de escoamento:</b> 2.75742e+07 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Resistência à tração:</b> 6.89356e+07 N/m<sup>2</sup></p>	<p><b>Corpo sólido</b></p>

Fonte: Própria (2023)

Tabela 6 - Propriedades Carcaça de Mandril Modificada

Referência do modelo	Propriedades	Componentes
	<p><b>Nome:</b> AISI 1020 Aço, laminado a frio</p> <p><b>Tipo de modelo:</b> Isotrópico linear elástico</p> <p><b>Critério de falha predeterminado:</b> Desconhecido</p> <p><b>Limite de escoamento:</b> 3.5e+08 N/m<sup>2</sup></p> <p><b>Resistência à tração:</b> 4.2e+08 N/m<sup>2</sup></p>	Corpo sólido

Fonte: Própria (2023)

### Comparação da resistência a tração

A resistência à tração é uma medida da capacidade de um material suportar forças de tração antes de se romper. Comparando os valores fornecidos para a resistência à tração dos materiais original e modificado:

**Material Original:** 6.89356e+07 N/m<sup>2</sup>

**Material Modificado:** 4.2e+08 N/m<sup>2</sup>

O material modificado, com uma resistência à tração de 4.2e+08 N/m<sup>2</sup>, apresenta uma resistência significativamente maior em comparação com o material original, que tem uma resistência à tração de 6.89356e+07 N/m<sup>2</sup>. Portanto, com base nesses valores, é correto afirmar que o material modificado possui uma resistência à tração superior.

Para calcular a porcentagem de aumento na resistência à tração do material modificado em relação ao material original, você pode usar a fórmula:

**Equação 10** - Fórmula da Porcentagem de Aumento

$$\text{Porcentagem de aumento} = \frac{\text{Novo Valor} - \text{Valor Inicial}}{\text{Valor Inicial}} \times 100$$

Fonte: Própria (2023)

Logo:

$$\text{Porcentagem de aumento} = \frac{\text{Nova Resistência} - \text{Resistência Original}}{\text{Resistência Original}} \times 100$$

Substituindo os valores:

$$\text{Porcentagem de aumento} = \frac{4.2e+08 - 6.89356e+07}{6.89356e+07} \times 100$$

Calculando isso resulta na porcentagem de aumento na resistência à tração do material modificado em relação ao material original.

$$\text{Porcentagem de aumento} = \frac{4.2e+08 - 6.89356e+07}{6.89356e+07} \times 100 = 65.61520723$$

Ou seja, com o novo formato e mudança de material houve um aumento de aproximadamente 65,61% na resistência à tração.

### **Comparação do limite de escoamento**

O limite de escoamento é uma propriedade mecânica de um material que indica a máxima tensão que o material pode suportar antes de começar a se deformar permanentemente, sem recuperação total. Em termos mais simples, é a tensão máxima que um material pode suportar antes de apresentar uma deformação plástica ou permanente, indicando o ponto onde o material começa a fluir ou "escoar" sob carga. Essa medida é crucial na engenharia para compreender o comportamento de

materiais sob estresse e é uma parte fundamental da caracterização das propriedades mecânicas de um material.

Comparando os valores fornecidos:

Carcaça de Mandril Original: Limite de Escoamento de  $2.75742e+07$  N/m<sup>2</sup>

Carcaça de Mandril Modificada: Limite de Escoamento de  $3.5e+08$  N/m<sup>2</sup>

A carcaça de mandril modificada, com um limite de escoamento de  $3.5e+08$  N/m<sup>2</sup>, apresenta um valor significativamente maior em comparação com o limite de escoamento da carcaça de mandril original, que é de  $2.75742e+07$  N/m<sup>2</sup>. Portanto, a carcaça de mandril modificada tem um limite de escoamento maior. Essa informação é indicativa da capacidade do material de suportar deformações permanentes sob carga, sendo um indicador importante de sua resistência mecânica.

Para calcular a porcentagem de aumento no limite de escoamento do material modificado em relação ao material original é dada por:

*Porcentagem de Aumento*

$$= \frac{\text{Limite de Escoamento Modificado} - \text{Limite de Escoamento Original}}{\text{Limite de Escoamento Original}} \times 100$$

Substituindo os valores dados:

$$\text{Porcentagem de Aumento} = \frac{3.5e + 08 - 2.75742e + 07}{2.75742e + 07} \times 100$$

Calculando isso fornecerá a porcentagem de aumento no limite de escoamento do material modificado em relação ao material original.

$$\text{Porcentagem de Aumento} = \frac{3.5e+08-2.75742e+07}{2.75742e+07} \times 100 = 242.0321822\%$$

Portanto, o aumento percentual no material modificado em relação ao material original é aproximadamente 242.03%. Isso indica uma considerável melhoria na resistência do material modificado em comparação com o material original.

## 5.2 Resultados obtidos com aplicação de carga

Este relatório apresenta os resultados de uma análise de elementos finitos (FEA) conduzida no software SolidWorks, visando avaliar o comportamento estrutural de um componente específico sob uma carga de 1000N. O escopo da análise inclui a determinação das tensões de Von Mises, deslocamentos resultantes e fator de segurança.

### 5.1.1 Tensão de Von Mises

A análise de elementos finitos (FEA) desempenha um papel crucial na engenharia moderna, permitindo a avaliação precisa e detalhada do comportamento estrutural de componentes sob diversas condições de carga. No âmbito deste estudo, empregamos o software SolidWorks para realizar uma análise FEA, focalizando nossa atenção na determinação da tensão de von Mises.

A tensão de von Mises é uma medida fundamental em análises estruturais, pois proporciona uma representação simplificada do estado de tensão em um material sujeito a cargas externas complexas. Nomeada em homenagem ao engenheiro Richard von Mises, esta forma de tensão combina tanto os componentes normais quanto os de cisalhamento em uma única magnitude equivalente. Essa abordagem é especialmente valiosa quando o material é suscetível a diferentes tipos de tensões simultaneamente, fornecendo uma medida unificada da capacidade de carga.

Ao utilizar o SolidWorks para conduzir nossa análise FEA, pudemos obter uma visão abrangente das distribuições de tensão ao longo do componente em estudo. Este método numérico nos permitiu simular virtualmente as condições operacionais e avaliar como o componente responde sob diversas cargas. O foco principal recaiu sobre a determinação da tensão de von Mises máxima, pois esta é frequentemente

utilizada como indicador crítico para avaliar a capacidade de carga e prever possíveis pontos de falha.

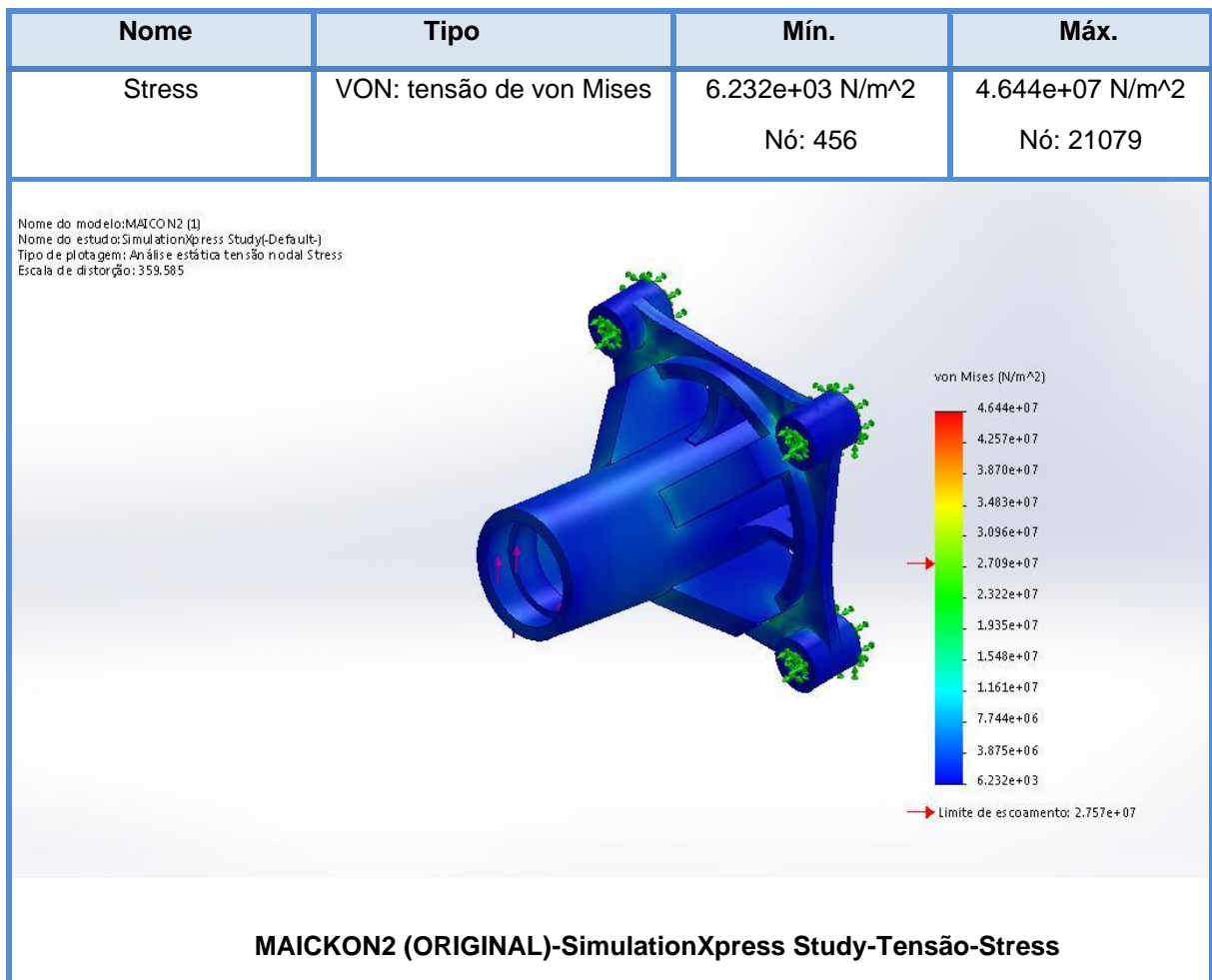
Os resultados obtidos oferecem uma visão aprofundada do desempenho estrutural do componente em questão. Esta análise da tensão de von Mises não apenas fornece informações sobre a segurança estrutural, mas também orienta potenciais otimizações de design para garantir que o componente atenda aos requisitos de carga com uma margem de segurança adequada. O presente trabalho busca, portanto, apresentar e interpretar de forma clara e concisa os resultados obtidos, destacando a relevância da tensão de von Mises como um indicador crucial na avaliação de desempenho estrutural.

Este critério de tensão é frequentemente utilizado para prever a deformação plástica de materiais dúcteis. Se a tensão de von Mises exceder a resistência à deformação do material, sugere-se que a deformação plástica pode ocorrer.

A tensão de von Mises é especialmente útil em casos em que os materiais podem estar sujeitos a estados de tensão complexos, como em análise e design estrutural. Ela simplifica a avaliação da falha do material, fornecendo um único valor de tensão que pode ser comparado com a resistência à deformação do material.

Abaixo serão apresentados em forma de tabela (tabela 7 e 8) resultados obtidos por análise de elementos finitos (FEA) para obter a tensão de von Mises mínima e máxima.

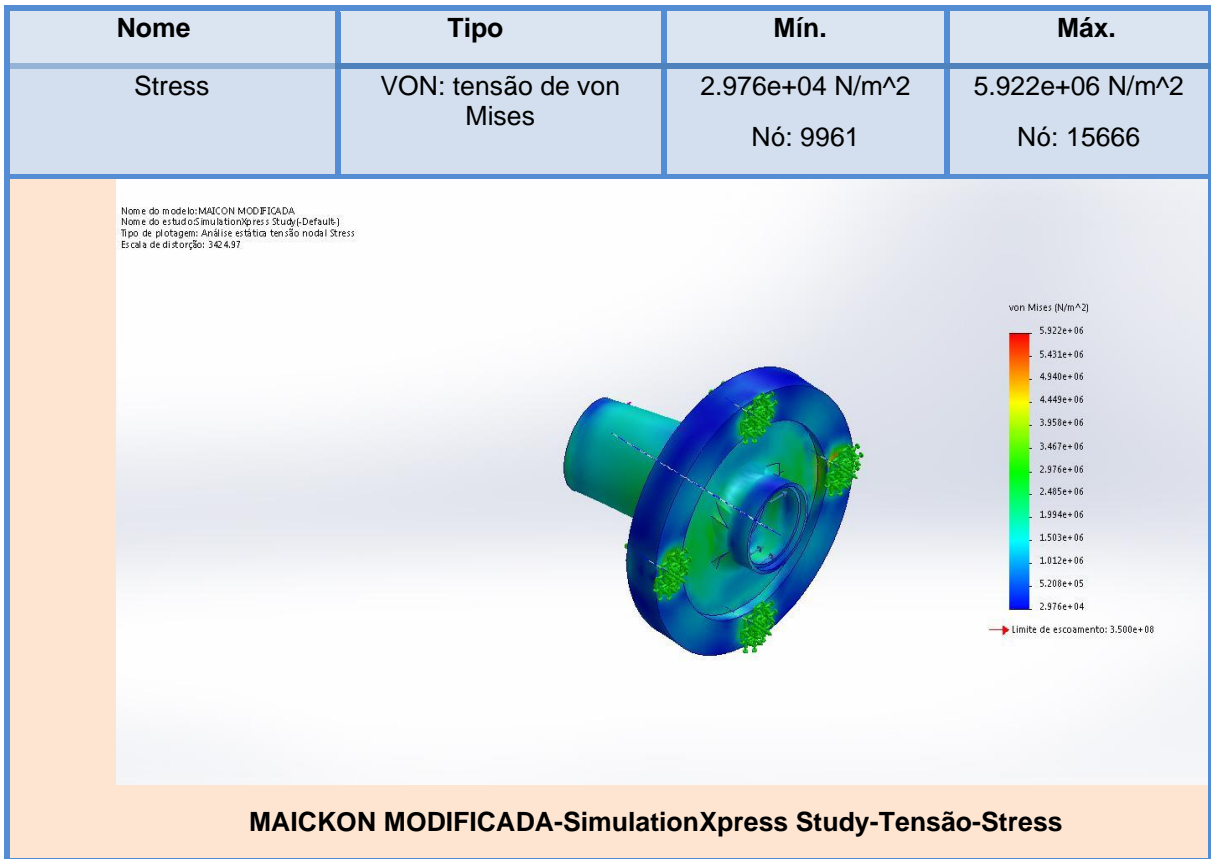
Tabela 7 - Limite de escoamento Carcaça de Mandril Original



Fonte: Própria (2023)

O resultado apresenta um limite de escoamento de  $2.757e+07$  N/m<sup>2</sup>, o limite de escoamento é um parâmetro importante em materiais de engenharia e é frequentemente usado para avaliar a capacidade de um material de suportar cargas sem sofrer deformações permanentes. De forma simples, o limite de escoamento é a tensão máxima que um material pode suportar antes de começar a se deformar de maneira plástica. Analisando a imagem percebe-se que a carcaça de mandril sofre uma tensão nos chanfros conectados, porém, fica claro que as extremidades da base apresentam a maior concentração de tensão. O que se pode tirar de conclusão é simplesmente reforçar algo que na prática estava claro, o local de maior concentração de tensão é exatamente onde ocorre as quebras do material.

**Tabela 8 - Limite de escoamento Carcaça de Mandril Modificada**



Fonte: Própria (2023)

A peça modificada apresentou um limite de escoamento de 3.500e+08 N/m<sup>2</sup>, a diferença observada em comparação a peça original é que enquanto na carcaça original as tensões se concentravam nas extremidades, na modificada as tensões são distribuídas por quase toda a peça, logo, não se observa nenhum ponto que o limite de escoamento é atingido, concluindo que a mudança no formato e material contribuem para evitar uma quebra precoce.

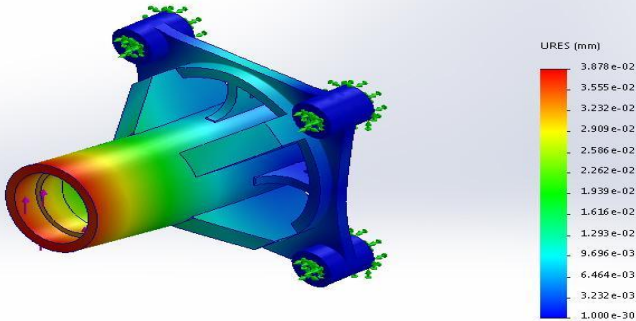
### 5.1.2 Deslocamento Resultante

A análise de deslocamento resultante é uma etapa fundamental na avaliação do comportamento estrutural de componentes submetidos a cargas externas. Este estudo, conduzido utilizando a plataforma SolidWorks, visa compreender o impacto de uma carga aplicada de 1000 Newtons sobre a estrutura em análise. A obtenção e interpretação dos deslocamentos resultantes são elementos cruciais para a compreensão das deformações que o componente pode experimentar sob condições operacionais específicas. As tabelas 9 e 10 apresentam os dados obtidos pela análise FEA.

**Tabela 9 - Deslocamento Resultante Carcaça de Mandril Original**

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Displacement	URES: Deslocamento resultante	0.000e+00 mm Nó: 90	3.878e-02 mm Nó: 727

Nome do modelo: MAICKON2 (1)  
Nome do estudo: SimulationXpress Study(Default)  
Tipo de plataforma: Deslocamento estático Displacement  
Escala de distorção: 359,985



**MAICKON2 (ORIGINAL)-SimulationXpress Study-Deslocamento-Displacement**

Fonte: Própria (2023)

Em relação ao deslocamento se observa que na extremidade do cilindro há um deslocamento máximo de 3.878e-02 mm, o que pode ser prejudicial a outras partes

do conjunto do trator, afinal, está extremidade é ligada por uma roldana que é conectada a um conjunto de outras roldanas através de correias que passam diretamente pelo motor do veículo.

**Tabela 10 - Deslocamento Resultante Carcaça de Mandril Modificada**

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Displacement	URES: Deslocamento resultante	0.000e+00 mm Nó: 42	4.988e-03 mm Nó: 488

Nome do modelo: MAICKON MODIFICADA  
 Nome do estudo: SimulationXpress Study (Default)  
 Tipo de plotagem: Deslocamento estático Displacement  
 Escala de distorção: 342.437

**MAICKON MODIFICADA-SimulationXpress Study-Deslocamento-Displacement**

Fonte: Própria (2023)

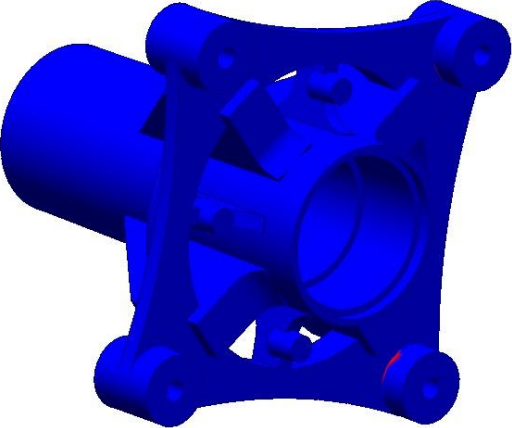
Na carcaça modificada se observa um comportamento semelhante, porém, o deslocamento máximo é de 4.988e-03 mm, ou seja, a diferença em relação a peça original é de aproximadamente 0.033792 mm, mostrando ter uma diferença menor no deslocamento quando sofre uma força externa.

### 5.1.3 Fator de segurança

Mediante a realização de uma análise de elementos finitos no SolidWorks, foram obtidos resultados significativos para a avaliação estrutural de uma carcaça de mandril de cortador de grama. Na configuração original, utilizando alumínio como material, o fator de segurança registrado foi de 0,581807. Após a implementação de modificações, incluindo alterações no formato e a troca do material para aço 1020, observou-se uma notável melhoria no fator de segurança, atingindo o valor de 30,6659. Nas Tabelas 11 e 12, e Figuras 21 e 22, são apresentados os resultados do fator de segurança da carcaça original e modificada, obtidos pela análise FEA via Solidworks. Essa análise fornecerá informações cruciais sobre o desempenho e a segurança da carcaça do mandril.

**Tabela 11 - Fator de Segurança Carcaça de Mandril Original**

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Factor of Safety	Tensão de von Mises máxima	5.938e-01 Nó: 21079	4.424e+03 Nó: 456



**MAICKON-SimulationXpress Study-Fator de segurança-Factor of Safety**

Fonte: Própria (2023)

**Figura 21** - Fator de Segurança obtido durante análise FEA da carcaça de mandril original

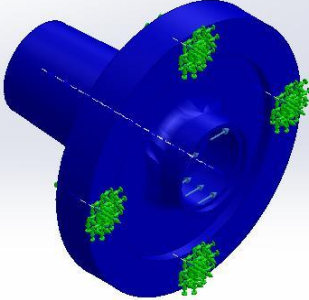
Com base nos parâmetros especificados, o fator de segurança (FOS) mais baixo encontrado no seu projeto é 0.581807

Fonte: Própria (2023)

**Tabela 12** - Fator de Segurança Carcaça de Mandril Modificada

Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Factor of Safety	Tensão de von Mises máxima	5.910e+01 Nó: 15666	1.176e+04 Nó: 9961

Nome do modelo: MAICKON MODIFICADA  
Nome do estudo: SimulationXpress Study(-Default-)  
Tipo de plotagem: Fator de segurança Factor of Safety  
Critério: Tensão de Max von Mises  
Vermelho < FOS = 1 < Azul



**MAICKON MODIFICADA-SimulationXpress Study-Fator de segurança-Factor of Safety**

Fonte: Própria (2023)

**Figura 22** - Fator de Segurança obtido durante análise FEA da carcaça de mandril modificada

Com base nos parâmetros especificados, o fator de segurança (FOS) mais baixo encontrado no seu projeto é 30.6659

Fonte: Própria (2023)

Embora os resultados tenham indicado níveis de segurança satisfatórios, uma abordagem mais minuciosa é essencial para assegurar uma compreensão abrangente do desempenho estrutural sob diversas condições operacionais. De maneira geral considerar fatores como, considerar as possíveis variações nas condições de carregamento durante a operação do trator, é imperativo avaliar cenários além daqueles considerados na análise inicial. A inclusão de cargas dinâmicas, cíclicas e extremas proporcionará uma visão mais realista do comportamento das carcaças sob diferentes situações.

Uma análise mais detalhada permitirá uma avaliação mais completa das incertezas associadas ao modelo, incluindo propriedades do material, condições de contorno e características geométricas. Isso contribuirá para a mitigação de potenciais erros de modelagem.

A realização de testes experimentais é crucial para validar os resultados da análise de elementos finitos. A correlação entre dados experimentais e simulações numéricas oferece uma base sólida para a confiabilidade dos resultados e a representatividade do modelo.

## 6 PROGRAMAÇÃO CNC COMANDO FANUC

Ao concluir a modificação do formato da peça, o processo foi estendido para a geração de um código CNC, utilizando a linguagem de programação Fanuc, de maneira manual. Este código CNC foi elaborado com o intuito de viabilizar a fabricação da peça otimizada em um torno Logic 195. As figuras 23 e 25 apresentam o código numérico comando fanuc desenvolvido manualmente usando como base o desenho técnico da carcaça de mandril modificada (figura 20), enquanto a figura 24 e 26 representa o caminho que o torneamento externo e interno percorre para desenhar a peça desejada.

**Figura 23** – Código CNC representando o Lado 1 da Carcaça de Mandril

```
LADO 1 – COMANDO FANUC 0I - MÁQUINA LOGIC-195
O0200;
N10 G21 G40 G90 G95;
N20 G0 X200 Z200;
N30 T0808(SUPORTE TNMG2020 R0,8MM);
N40 G54;
N50 G96 S200 M8;
N60 G92 S3500 M3;
N70 G0 X180 Z0;
N80 G1 X-1,5 F0,2;
N90 G0 X170 Z5;
N100 G71 U1,5 R0,5;
N110 G71 P120 Q190 U1 W0,2 F0,2;
N120 G0 X55;
N130 G42;
N140 G1 Z-89,5;
N150 G02 X71 Z-97,5 R8;
N160 G1 X105;
N170 G02 X125 Z-107,5 R10;
N180 G1 X180;
N190 G40;
N200 G70 P120 Q190;
N210 G0 X200 Z200;
N220 T0404 (BROCA TMAX Ø30MM);
N230 G54;
N240 G97 S848 M3; (CALCULAR RPM – VC80M/MIN);
N250 G0 X0 Z20;
N260 G74 R10;
N270 G74 Z-140 Q10000 F0,1;
N280 G0 X200 Z200;
N290 T0606 (TORNEAR INTERNO TNMG16);
N300 G96 S180 M8;
N310 G92 S3000 M3;
N320 G0 X30 Z10;
N330 G71 U1 R01;
N340 G71 P350 Q380 U1 R0,1 F0,2;
N350 G0 X41;
N360 G1 Z-12;
N370 G1 X36;
N380 G1 Z-110;
N390 G70 P350 Q380;
N400 G0 X200 Z200;
N410 M30;
```

Para ficar mais didático a seguir será explicado o passo do código para facilitar a interpretação da programação desenvolvida, vale ressaltar que o código foi feito em duas etapas.

O0200; - Início do programa.

N10 G21 G40 G90 G95; - Estabelece unidades métricas (G21), cancela o raio de compensação (G40), define coordenadas absolutas (G90) e avanço por revolução (G95).

N20 G0 X200 Z200; - Posiciona a ferramenta no ponto inicial (X200, Z200) rapidamente.

N30 T0808(SUPORTE TNMG2020 R0,8MM); - Seleciona a ferramenta (T0808) e define informações sobre ela (SUPORTE TNMG2020 R0,8MM).

N40 G54; - Define o sistema de coordenadas de trabalho.

N50 G96 S200 M8; - Ativa o controle de velocidade constante (G96), define a velocidade de corte (S200) e liga o refrigerante (M8).

N60 G92 S3500 M3; - Define a velocidade de rotação da árvore (S3500) e inicia o mandril no sentido horário (M3).

N70 G0 X180 Z0; - Move a ferramenta rapidamente para as coordenadas (X180, Z0).

N80 G1 X-1,5 F0,2; - Move a ferramenta para (X-1,5) com avanço de 0,2 unidades por minuto.

N90 G0 X170 Z5; - Move rapidamente a ferramenta para (X170, Z5).

N100 G71 U1,5 R0,5; - Define um ciclo de usinagem para torneamento externo com compensação de raio (U1,5 R0,5).

N110 G71 P120 Q190 U1 W0,2 F0,2; - Define os parâmetros do ciclo de usinagem, incluindo a posição final (P120 Q190), avanço (F0,2) e profundidade de corte (W0,2).

N120 G0 X55; - Move rapidamente a ferramenta para (X55).

N130 G42; - Ativa a compensação de ferramenta à direita.

N140 G1 Z-89,5; - Move a ferramenta para Z-89,5.

N150 G02 X71 Z-97,5 R8; - Realiza um movimento circular no sentido horário até as coordenadas (X71, Z-97,5) com um raio de 8 unidades.

N160 G1 X105; - Move a ferramenta para (X105).

N170 G02 X125 Z-107,5 R10; - Realiza um movimento circular no sentido horário até as coordenadas (X125, Z-107,5) com um raio de 10 unidades.

N180 G1 X180; - Move a ferramenta para (X180).

N190 G40; - Desativa a compensação de ferramenta.

N200 G70 P120 Q190; - Encerra o ciclo de usinagem para torneamento externo.

N210 G0 X200 Z200; - Move rapidamente a ferramenta de volta para a posição inicial.

N220 T0404 (BROCA TMAX Ø30MM); - Seleciona uma nova ferramenta (T0404) e define suas características.

N230 G54; - Define novamente o sistema de coordenadas de trabalho.

N240 G97 S848 M3; - Ativa o controle de velocidade constante (G97) com uma velocidade de corte específica (S848) e inicia o mandril no sentido horário (M3).

N250 G0 X0 Z20; - Move rapidamente a ferramenta para (X0, Z20).

N260 G74 R10; - Define um ciclo de furação com avanço rápido para perfuração (R10).

N270 G74 Z-140 Q10000 F0,1; - Executa o ciclo de furação, perfurando até Z-140 com um avanço de 0,1 unidades por minuto.

N280 G0 X200 Z200; - Move rapidamente a ferramenta de volta para a posição inicial.

N290 T0606 (TORNEAR INTERNO TNMG16); - Seleciona outra ferramenta (T0606) para operações de torneamento interno.

N300 G96 S180 M8; - Ativa o controle de velocidade constante (G96) com uma nova velocidade de corte (S180) e inicia o mandril no sentido horário (M8).

N310 G92 S3000 M3; - Define a velocidade de rotação da árvore (S3000) e inicia o mandril no sentido horário (M3).

N320 G0 X30 Z10; - Move rapidamente a ferramenta para (X30, Z10).

N330 G71 U1 R01; - Define um ciclo de usinagem para torneamento interno com compensação de raio (U1 R01).

N340 G71 P350 Q380 U1 R0,1 F0,2; - Define os parâmetros do ciclo de usinagem para torneamento interno.

N350 G0 X41; - Move rapidamente a ferramenta para (X41).

N360 G1 Z-12; - Move a ferramenta para Z-12 com um avanço de corte.

N370 G1 X36; - Move a ferramenta para (X36).

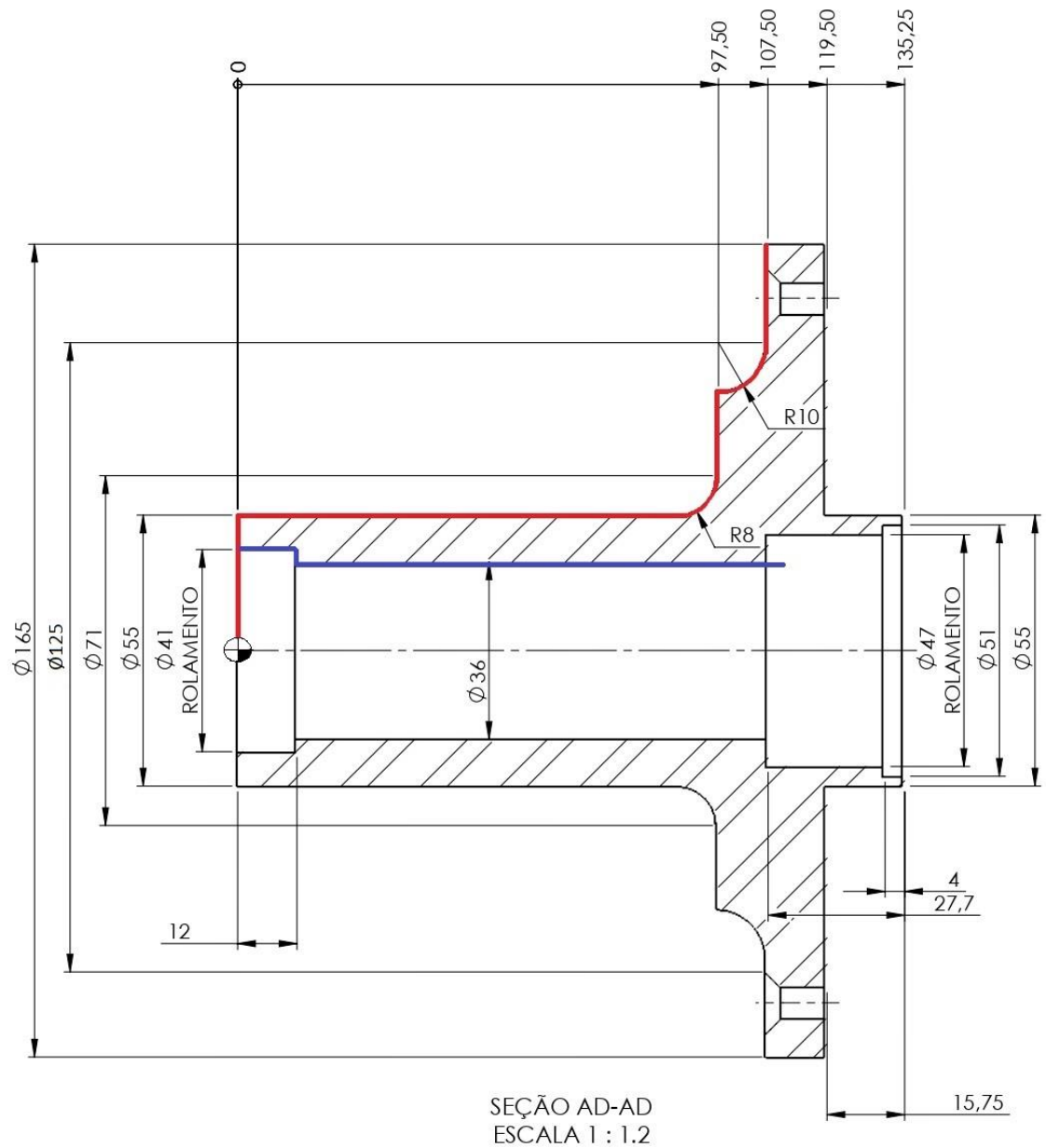
N380 G1 Z-110; - Move a ferramenta para Z-110 com um avanço de corte.

N390 G70 P350 Q380; - Encerra o ciclo de usinagem para torneamento interno.

N400 G0 X200 Z200; - Move rapidamente a ferramenta de volta para a posição inicial.

N410 M30; - Fim do programa.

**Figura 24 - Representação do Lado 1 do código CNC**



Fonte: Própria (2023)

Em vermelho, é apresentada a representação referente ao torneamento externo, enquanto em azul é exposta a reprodução do torneamento interno. Essa diferenciação visa otimizar a compreensão do código, além de facilitar a visualização do comportamento da usinagem.

**Figura 25** - Código CNC representando o Lado 2 da Carcaça de Mandril

```
LADO 2 – COMANDO FANUC 0I - MÁQUINA LOGIC-195
O0201;
N10 G21 G40 G90 G95;
N20 G0 X200 Z200;
N30 T0808(SUPORTE TNMG2020 R0,8MM);
N40 G54;
N50 G96 S200 M8;
N60 G92 S3500 M3;
N70 G0 X180 Z0;
N80 G1 X-1,5 F0,2;
N90 G0 X170 Z5;
N100 G71 U1,5 R0,5;
N110 G71 P120 Q170 U1 W0,2 F0,2;
N120 G0 X55;
N130 G42;
N140 G1 Z-16;
N150 G1 X165;
N160 G1 Z-30
N170 G40;
N180 G70 P120 Q170;
N190 G0 X200 Z200;
N200 T0606 (TORNEAR INTERNO TNMG16);
N210 G96 S180 M8;
N220 G92 S3000 M3;
N230 G0 X30 Z10;
N240 G71 U1 R01;
N250 G71 P260 Q300 U1 R0,1 F0,2;
N260 G0 X51;
N270 G1 Z-4;
N280 G1 X47;
N290 G1 Z27,7;
N300 G1 X34;
N310 G70 P260 Q300;
N320 G0 X200 Z200;
N330 M30;
```

O0201; - Início do programa.

N10 G21 G40 G90 G95; - Configurações iniciais, estabelecendo unidades métricas (G21), cancelando a compensação de raio (G40), definindo coordenadas absolutas (G90) e avanço por revolução (G95).

N20 G0 X200 Z200; - Movimento rápido para as coordenadas iniciais (X200, Z200).

N30 T0808(SUPORTE TNMG2020 R0,8MM); - Seleciona a ferramenta e define suas características.

N40 G54; - Define o sistema de coordenadas de trabalho.

N50 G96 S200 M8; - Ativa o controle de velocidade constante, define a velocidade de corte e liga o refrigerante.

N60 G92 S3500 M3; - Define a velocidade de rotação da árvore e inicia o mandril no sentido horário.

N70 G0 X180 Z0; - Movimento rápido para (X180, Z0).

N80 G1 X-1,5 F0,2; - Movimento de corte para (X-1,5) com avanço de 0,2 unidades por minuto.

N90 G0 X170 Z5; - Movimento rápido para (X170, Z5).

N100 G71 U1,5 R0,5; - Ciclo de usinagem para torneamento externo com compensação de raio.

N110 G71 P120 Q170 U1 W0,2 F0,2; - Parâmetros do ciclo de usinagem, incluindo posição final, avanço e profundidade de corte.

N120 G0 X55; - Movimento rápido para (X55).

N130 G42; - Ativa a compensação de ferramenta à direita.

N140 G1 Z-16; - Movimento de corte para Z-15,75.

N150 G1 X165; - Movimento de corte para X165.

N160 G1 Z-30; - Movimento de corte para Z-30.

N170 G40; - Desativa a compensação de ferramenta.

N180 G70 P120 Q170; - Encerra o ciclo de usinagem para torneamento externo.

N190 G0 X200 Z200; - Movimento rápido de retorno para a posição inicial.

N200 T0606 (TORNEAR INTERNO TNMG16); - Seleciona uma nova ferramenta para torneamento interno.

N210 G96 S180 M8; - Ativa o controle de velocidade constante com uma nova velocidade de corte e liga o refrigerante.

N220 G92 S3000 M3; - Define a velocidade de rotação da árvore e inicia o mandril no sentido horário.

N230 G0 X30 Z10; - Movimento rápido para (X30, Z10).

N240 G71 U1 R01; - Ciclo de usinagem para torneamento interno com compensação de raio.

N250 G71 P260 Q300 U1 R0,1 F0,2; - Parâmetros do ciclo de usinagem para torneamento interno.

N260 G0 X51; - Movimento rápido para (X51).

N270 G1 Z-4; - Movimento de corte para Z-4.

N280 G1 X47; - Movimento de corte para X47.

N290 G1 Z27,7; - Movimento de corte para Z27,7.

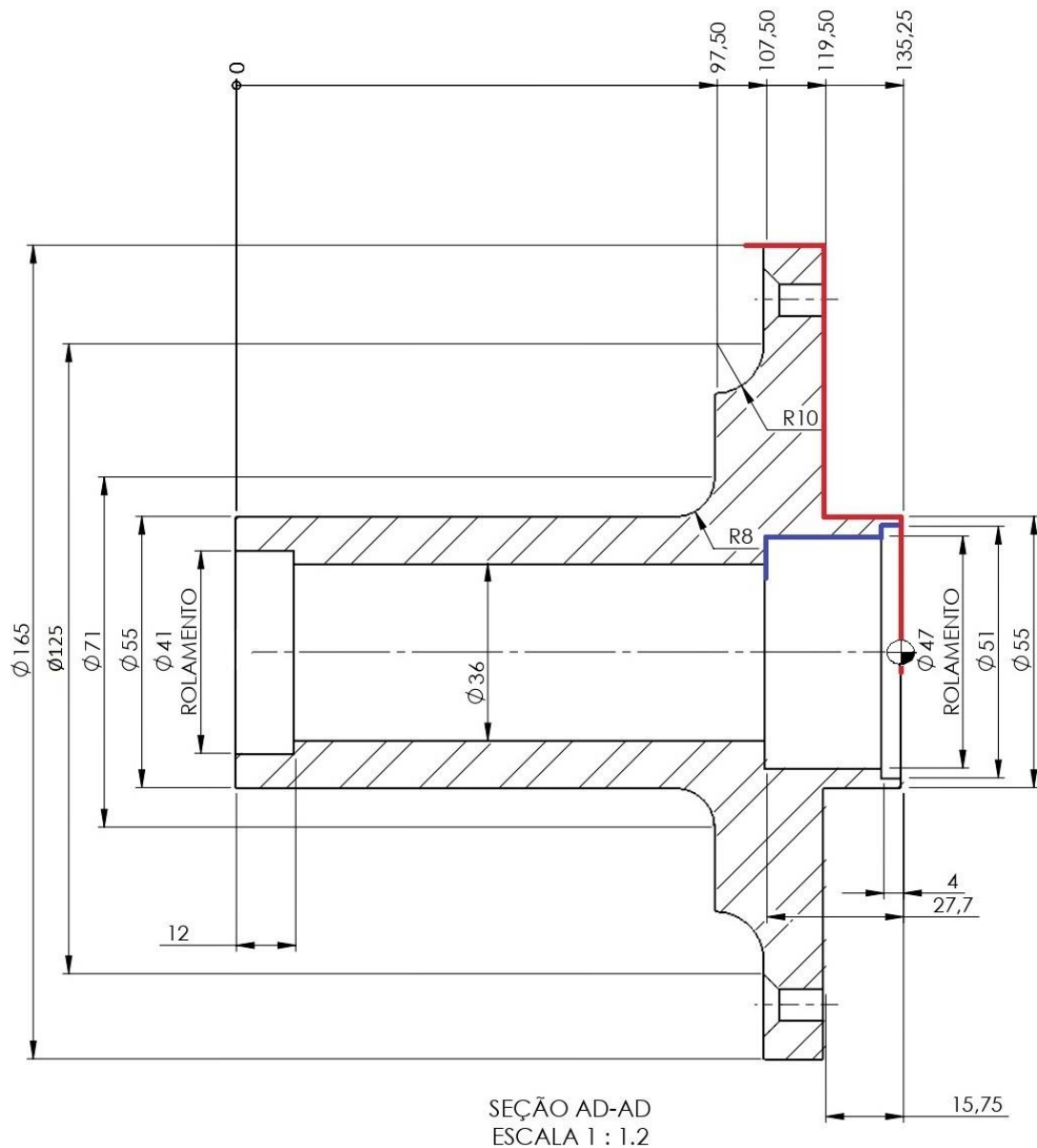
N300 G1 X34; - Movimento de corte para X34.

N310 G70 P260 Q300; - Encerra o ciclo de usinagem para torneamento interno.

N320 G0 X200 Z200; - Movimento rápido de retorno para a posição inicial.

N330 M30; - Fim do programa.

**Figura 26** - Representação do Lado 2 do código CNC



Fonte: Própria (2023)

Em vermelho, evidenciamos a representação relativa a uma nova imagem, mantendo a coerência de cores para destacar o torneamento externo. Simultaneamente, em azul, promovemos a reprodução correspondente ao torneamento interno. Essa abordagem uniforme proporciona uma clareza visual

consistente, contribuindo para uma compreensão efetiva do código e do comportamento subsequente da operação de usinagem.

## 7 ORÇAMENTO

A tabela 13 apresenta uma estrutura financeira da pesquisa, abrangendo aspectos cruciais como mão de obra operacional com CNC, licença do SolidWorks, tarugos de alumínio e aço 1020, juntamente com os custos associados à produção da peça, está análise proporciona uma visão transparente dos investimentos necessários para a realização eficaz do projeto. Vale ressaltar que os custos relacionados à mão de obra com utilização do CNC, assim como os preços dos tarugos de alumínio e aço 1020, foram meticulosamente obtidos a partir de dados específicos da cidade de Lages, Santa Catarina. Esta abordagem regionalizada fortalece a precisão e relevância dos valores apresentados, alinhando-se de maneira direta com a realidade econômica do contexto local para uma avaliação mais contextualizada e fundamentada.

**Tabela 13** - Tabela de orçamento

<b>Elemento de Despesa</b>	<b>Custo / min (R\$)</b>	<b>Custo / hora (R\$)</b>	<b>Valor Geral (R\$)</b>
Mão de obra do operador + Utilização CNC	R\$ 4,85	R\$ 291,00	R\$ 291,00
Solidworks	Gratuito (Instituição provê)	Gratuito (Instituição provê)	Gratuito (Instituição provê)
Tarugo Alumínio 177.80mm x 150mm			R\$ 970,51
Tarugo Aço 1020 177.80 x 150 mm			R\$ 792,00
Mão de obra para produzir a análise técnica	R\$ 0,11666	R\$ 7,00	R\$ 840,00 (carga horária de 120h)

<b>Valor Total Utilizando Alumínio</b>			<b>R\$ 2101,51</b>
<b>Valor Total Utilizando Aço 1020</b>			<b>R\$ 1923,00</b>

Fonte: Própria (2023)

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao concluir a análise técnica da carcaça de mandril que apresenta falhas mecânicas de rupturas e trincas, espera-se que este projeto possa fornecer insights valiosos sobre as causas subjacentes dessas falhas e identificar as melhores abordagens para mitigar esses problemas.

Os objetivos estabelecidos para este projeto são de extrema importância, pois visam compreender as falhas mecânicas que ocorrem na carcaça do mandril e, por consequência, contribuir para o aprimoramento da sua resistência e confiabilidade. Essa análise técnica tem como finalidade proporcionar uma base sólida para a implementação de medidas efetivas.

Este trabalho empreendeu uma análise técnica abrangente da carcaça de mandril de um cortador de grama, notavelmente afetada por rupturas. Inicialmente, recriamos a estrutura no software SolidWorks, mantendo o formato original em alumínio. A análise de elementos finitos revelou um preocupante fator de segurança de 0.581807, indicando uma vulnerabilidade significativa na estrutura original.

Para mitigar essas falhas, implementamos mudanças substanciais, modificando o formato da peça e optando pelo aço 1020 como material. As simulações subsequentes no SolidWorks exibiram uma distribuição mais eficiente das forças, notadamente em contraste com a concentração problemática nas áreas propensas a rupturas na carcaça original. O fator de segurança resultante na carcaça modificada impressionantemente aumentou para 30.6659, evidenciando uma melhoria substancial na resistência mecânica.

A validação dessas melhorias avançou para a etapa final, envolvendo a geração de um código CNC para a fabricação da peça otimizada. Utilizando a linguagem de programação Fanuc, o código foi elaborado manualmente, possibilitando a produção eficiente da estrutura otimizada em um torno Logic 195.

Esses resultados coletivos reforçam a eficácia do nosso processo de otimização, destacando não apenas a importância de considerações estruturais na

engenharia de componentes mecânicos, mas também a aplicação prática de simulações e análises de elementos finitos para aprimorar a durabilidade e desempenho de peças cruciais. O sucesso deste estudo não apenas resolveu os problemas iniciais de rupturas, mas também forneceu uma base sólida para futuras investigações e otimizações no campo da engenharia mecânica.

## REFERÊNCIAS

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018. 882 p. ISBN 9788521631033.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL (São Paulo). **Soldagem**. São Paulo: SENAI/SP, 2019. 719 p. (Série Informações Tecnológicas). ISBN 9788565418683.

IRWIN, G. R. **Fracturing of Metals, American Society for Metals**. Cleveland, p.147-166, 1948.

Griffith, A. A. (1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 221(582-593), 163-198.

COSTA, E. S.; SANTOS, Denis Júnio. Disciplina: **Processo de Usinagem**. Divinópolis, MG, p. 6, 2006.

ALMEIDA, Paulo Samuel de. **Processos de Usinagem - Utilização e Aplicações das Principais Máquinas Operatrizes**. [Bela Vista, São Paulo - SP]: Editora Saraiva, 2015. E-book. ISBN 9788536520070. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#!/books/9788536520070/>. Acesso em: 27 mai. 2023.

FITZPATRICK, Michael. **Introdução à usinagem com CNC (Tekne)**. Porto Alegre - RS]: Grupo A, 2013. *E-book*. ISBN 9788580552522. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580552522/>. Acesso em: 29 mai. 2023.

SILVA, Sidnei Domingues da. **Processos de programação, preparação e operação de torno cnc** - 1ª edição - 2015. [Bela Vista, São Paulo - SP]: Editora Saraiva, 2015. *E-book*. ISBN 9788536531090. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536531090/>. Acesso em: 29 mai. 2023.

LAGE, Isaac Nelson Carvalho; PROCÓPIO, Keiler Coelho Lage; GUERRA, Gustavo Andrade. **Usinagem do aço 1045 no torno convêncional**. 2022. Disponível em:

Usinagem do aço 1045 no torno convêncional.pdf (animaeducacao.com.br)

FREITAS, R. DE S. **Torneamento do aço SAE 4340 com diferentes sistemas de lubrificação (a seco, jorro e mínima quantidade de lubrificante)**, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Automotiva) – Faculdade do Gama, Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/19792>. Acesso em: 29 mai. 2023.

ifsc.edu.br. Sem autor: **Parâmetros de corte** - IFSC. Disponível em:

<[https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/Processos%20de%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o%20l/Usinagem/Aula%205/Parametros\\_de\\_corte.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/gianpaulo.medeiros/MaterialDidatico/Processos%20de%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o%20l/Usinagem/Aula%205/Parametros_de_corte.pdf)>  
. Acesso em: 29 mai. 2023.

MACHADO, Álisson R.; COELHO, Reginaldo T.; ABRÃO, Alexandre M. **Teoria da usinagem dos materiais**. [São Paulo, SP]: Editora Blucher, 2015. E-book. ISBN 9788521208440. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521208440/>. Acesso em: 30 mai. 2023.

ASHBY, Michael. **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. [RJ, SP]: Grupo GEN, 2018. E-book. ISBN 9788595153394. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595153394/>. Acesso em: 13 jun. 2023.

GENTIL, Vicente. **Corrosão**. [RJ, SP]: Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 9788521637998. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637998/>. Acesso em: 03 dez. 2023.

ZEMPULSKI, Ladislau Nelson; ZEMPULSKI, Marina Fernanda Stocco. **Oxidação negra**.

LOPES, Pamella Hayana Lima. **Desempenho de tintas anticorrosivas em revestimento de aço-carbono SAE 1020**. 2019.

PANNONI, Fabio Domingos. **Princípios da galvanização a fogo**. Centro Brasileiro da Construção em aço. São Paulo, 2008.

FIALHO, Arivelto B. **SolidWorks Premium 2013 - Plataforma CAD/CAE/CAM para Projeto, Desenvolvimento e Validação de Produtos Industriais**. [Bela Vista, São

Paulo – SP]: Editora Saraiva, 2013. E-book. ISBN 9788536519555. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536519555/>. Acesso em: 06 dez. 2023.