

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,  
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE DO SUL  
Campus Ibirubá**

**FELIPE PEGORARO DOLL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Projeto e análise de substituição de peça soldada por peça fundida - Suporte das hastes de um descompactador de solo rotativo.

**Ibirubá**

**2023**

FELIPE PEGORARO DOLL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Projeto e análise de substituição de peça soldada por peça fundida - Suporte das hastes de um descompactador de solo rotativo.

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projetos

Orientador: Eng. Me. Giancarlo Stefani Schleder

Ibirubá

2023

DOLL, Felipe P.

Projeto e análise de substituição de peça soldada por peça fundida  
– Suporte das hastes de um descompactador de solo rotativo / Felipe  
Pegoraro Doll; orientador: Giancarlo Stefani Schleder, 2023.

57 páginas, ilustrado

Monografia (graduação) – Instituto Federal de Educação, Ciência  
e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, curso de graduação  
em Engenharia Mecânica, Ibirubá, 2023.

1. Engenharia Mecânica. 2. Projeto peças fundidas. 3. Elementos  
finitos. I. Schleder, S. Giancarlo. II. Instituto Federal de Educação,  
Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, Campus Ibirubá, curso de  
graduação em Engenharia Mecânica

Projeto e análise de substituição de peça soldada por peça fundida - Suporte das hastes de um descompactador de solo rotativo.

**Felipe Pegoraro Doll**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Banca Examinadora designada pelo Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, Campus Ibirubá, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Ibirubá, 6 de dezembro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Me. Giancarlo Stefani Schleder  
IFRS campus Ibirubá

Prof. Dr. Adão Felipe Oliveira Skonieski  
IFRS campus Ibirubá

Prof. Me Flávio Roberto Andara  
IFRS campus Ibirubá

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família e minha namorada e companheira de vida Liziane Dessbesel, por todo apoio, ajuda e incentivo durante esse período.

Agradeço ao IFRS - Campus Ibirubá por proporcionar um ensino gratuito e de qualidade.

Agradeço ao meu orientador Giancarlo Stefani Schleder pelas dicas e suporte durante a elaboração deste trabalho, e a todos os professores do IFRS por todo o conhecimento adquirido durante o curso.

Agradeço a empresa Agross do Brasil por me permitir colocar em prática os ensinamentos adquiridos no curso e todos meus colegas de empresa pela parceria durante o trabalho.

*“Nunca encare o estudo como uma obrigação,  
mas como oportunidade para entrar no belo e  
maravilhoso mundo do conhecimento.”*

*Albert Einstein*

## RESUMO

As máquinas subsoladoras são essenciais para melhorar a qualidade do solo, facilitando a penetração de água e nutrientes. A engenharia desempenha um papel fundamental no desenvolvimento dessas máquinas, buscando soluções que atendam às necessidades dos agricultores. Este estudo propõe a análise para substituição de um componente soldado por um componente fundido. A pesquisa é classificada como científica aplicada, com metodologia quali-quantitativa. O projeto do novo componente fundido foi desenvolvido em três etapas: definição de critérios de projeto e análise de engenharia; análise estática/dinâmica; atualização do modelo. Os resultados iniciais da otimização topológica mostraram uma redução de peso de 20% em relação ao componente soldado. As análises realizadas para validar a nova geometria confirmaram a melhoria da resistência do componente. O projeto final foi apresentado por meio de um modelo 3D. Com base nos resultados obtidos, a substituição do componente soldado por um componente fundido é uma alternativa eficaz para melhorar a qualidade, a durabilidade e a eficiência das máquinas subsoladoras. A simulação mostrou resultados promissores, mas ainda é necessário testar o componente em condições reais para confirmar sua eficácia.

**Palavras-chave:** Subsolador. Simulação. Componente soldado.

## **ABSTRACT**

Subsoilers are essential machines for improving soil quality by facilitating water and nutrient penetration. Engineering plays a crucial role in the development of these machines, seeking solutions that meet the needs of farmers. This study proposes the replacement of a welded component with a cast component. The research is classified as applied scientific, using a qualitative-quantitative methodology. The design of the new cast component was developed in three stages: design criteria definition and engineering analysis, static/dynamic analysis, and model update. Initial results from topological optimization showed a 20% weight reduction compared to the welded component. The analyses conducted to validate the new geometry confirmed the component's improved strength. The final design was presented through a 3D model. Based on the results obtained, replacing the welded component with a cast component is an effective alternative to enhance the quality, durability, and efficiency of subsoilers. The simulation showed promising results, but real-world testing is still required to confirm its effectiveness.

**Key words:** Subsoiler. Simulation. Welded component.

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

CAD - Computer Aided Design

CAE - Computer Aided Engineering

FEA - Finite Element Analysis

3D - Tridimensional

ASTM - American Society for Testing and Materials

SAE - Society of Automotive Engineers

AISI - American Iron and Steel Institute

## LISTA DE SÍMBOLOS

cm - centímetro

Kg - quilograma

P - Força peso

m - Massa

g - Gravidade

N - Newtons

KN - Quilo newtons

% - porcentagem

Mpa - Mega pascal

N.m - Newton metro

mm - milímetros

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Grade aradora pesada.....	18
Figura 2 - Arado subsolador .....	19
Figura 3 - Descompactador de solo rotativo Vollverini .....	20
Figura 4 - Fluxograma produção de peça fundida.....	21
Figura 5 - Classificação dos processos de fundição .....	22
Figura 6 - Comparação peça soldada x fundida .....	23
Figura 7 - Seções mínimas recomendadas em peças fundidas .....	24
Figura 8 - Vantagens da aplicação CAE/CAD .....	25
Figura 9- Método geral para análise de sistemas discretos - sistema discreto padrão.....	28
Figura 10 - Sequência lógica de análise de elementos finitos .....	29
Figura 11 - Exemplo de otimização topológica.....	30
Figura 12- Atividades principais da análise estrutural .....	31
Figura 13 - Conjunto atual soldado .....	32
Figura 14 - Componentes do conjunto soldado atual .....	33
Figura 15 - Variação dimensional .....	34
Figura 16- Trincas na solda .....	34
Figura 17 - Desgaste das hastes .....	34
Figura 18 - Porcas frouxas.....	34
Figura 19 - Projeto parcial do novo componente .....	36
Figura 20 - Diagrama de forças .....	37
Figura 21 - Propriedades do material SCL 084 .....	39
Figura 22 - Aplicação do suporte .....	40
Figura 23 - Aplicação da força .....	40
Figura 24 - Malha gerada.....	41
Figura 25 - Tensão máxima .....	42
Figura 26 - Aplicação otimização topológica.....	43
Figura 27 - Região excluída da otimização .....	44
Figura 28 - Resultado da otimização topológica .....	45
Figura 29 - Evolução da geometria do componente .....	46
Figura 30 - Resultado da análise da geometria final .....	47

Figura 31 – Determinação fator de segurança .....	48
Figura 32 - Montagem final do conjunto de hastes .....	49
Figura 33 - Vista explodida do conjunto de hastes.....	49
Figura 34 - Conjunto soldado atual .....	50
Figura 35 - Conjunto montado atual.....	50
Figura 36 - Conjunto soldado novo .....	50
Figura 37 - Conjunto montado novo .....	50
Figura 38 - Comparação de itens conjunto soldado atual x conjunto soldado novo .....	52
Figura 39 - Comparação de itens conjunto montado atual x conjunto montado novo .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de requisitos do novo suporte das hastes.....	35
Tabela 2 - Pesos do equipamento .....	37
Tabela 3 - Faixa de composição material .....	39
Tabela 4 - Redução de peso do componente .....	47
Tabela 5 - Tabela comparativa dos conjuntos .....	51
Tabela 6 – Ganhos na substituição de 32 hastes.....	51

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	16
1.2	OBJETIVOS .....	17
1.2.1	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>18</b>
2.1	DESCOMPACTADORES DE SOLO .....	18
2.2	DESCOMPACTADOR DE SOLO ROTATIVO .....	19
2.3	PROCESSO DE FUNDIÇÃO .....	20
2.3.1	<b>Projeto de peças fundidas .....</b>	<b>23</b>
2.4	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS .....	24
2.4.1	<b>Tipos de análises por elementos finitos.....</b>	<b>26</b>
2.4.1.1	Análise linear estática.....	26
2.4.1.2	Análise dinâmica.....	26
2.4.1.3	Análise não linear .....	27
2.4.1.4	Análise de fadiga.....	27
2.4.2	Sistemas discretos .....	27
2.4.3	<b>Aplicação dos elementos finitos no software .....</b>	<b>28</b>
2.5	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA .....	29
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
3.1	DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS DE PROJETO E ANÁLISE DE ENGENHARIA ..	32
3.1.1	<b>Falhas apresentadas no componente atual.....</b>	<b>33</b>
3.1.2	<b>Requisitos do projeto.....</b>	<b>35</b>
3.2	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS .....	36
3.2.1	<b>Projeto parcial do novo componente fundido .....</b>	<b>36</b>

3.2.2	Determinação dos carregamentos .....	36
3.2.3	Definição do material .....	38
3.2.4	Condições de contorno .....	40
3.2.5	Geração da malha.....	41
3.2.6	Resultado parcial da análise estática .....	41
3.3	OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA .....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
4.1	OTIMIZAÇÃO TOPOLOGICA DO SUPORTE DAS HASTES.....	45
4.2	VALIDAÇÃO DO COMPONENTE OTIMIZADO.....	46
4.3	AVALIAÇÕES COMPARATIVAS .....	49
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	54
	REFERÊNCIAS .....	55

## 1 INTRODUÇÃO

O tráfego constante de máquinas, o pisoteio de animais em áreas de integração agricultura/pecuária e as condições climáticas, promovem a compactação do solo em camadas superficiais e subsuperficiais, prejudicando sua capacidade produtiva. Essa compactação altera as propriedades físicas do solo, dificultando a infiltração de água e o crescimento das raízes das culturas, o que pode resultar em aumento da erosão e impactar negativamente o crescimento das plantas (FURINI, 2018).

Portanto, é essencial empregar máquinas subsoladoras que possam aprimorar a qualidade do solo, facilitando a penetração de água e nutrientes. Nesse contexto, a engenharia desempenha um papel fundamental, desenvolvendo máquinas que auxiliam os agricultores em suas atividades no campo.

Para que um produto seja bem recebido pelos consumidores no mercado, não basta apenas ter um projeto bem elaborado que leve em consideração dimensionamento, análise de esforços, desgaste e vida útil, é importante planejar e prever as fases subsequentes que incluem: a necessidade de garantir que as diferentes partes que compõem o produto possam ser substituídas entre si é importante; é igualmente crucial manter uma qualidade consistente do produto ao longo de todos os lotes de produção; além disso, é essencial buscar a redução do custo final do produto sempre que possível (AGOSTINHO; et al., 2004).

O objetivo da fundição é fabricar peças metálicas, quando falamos em peças fundidas temos moldes com formas basicamente definidas, sendo ocasionalmente necessário pequenos ajustes no processo de acabamento (PINTO, 2021).

O presente estudo visa apresentar a substituição de um componente soldado, por um componente fundido, buscando demonstrar a eficácia do segundo em comparação ao primeiro, evitar falhas do componente e reduzir dificuldades durante o processo de solda.

Com este trabalho espera-se que este produto minimize as falhas ao longo do processo de produção e de utilização, resultando em um tempo de produção menor, diminuindo assim os custos de produção.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

A otimização estrutural de componentes mecânicos não apenas proporciona a redução de custos sem comprometer o desempenho mecânico para sua aplicação específica, mas

também pode ter impactos positivos em toda a cadeia de produção. A resolução de problemas de otimização permite a consideração de várias características de diferentes disciplinas, tornando-se um campo de estudo de grande interesse para os engenheiros.

Este trabalho integra conhecimentos adquiridos em diversas áreas da Engenharia Mecânica, como mecânica geral, projeto de máquinas, mecânica dos sólidos, mecanismos e métodos numéricos. Em particular, a área da mecânica estrutural, com foco na otimização de mecanismos já existentes, apresenta oportunidades de crescimento significativas. Isso se deve ao fato de que empresas nesse setor estão cada vez mais adotando programas computacionais em seus projetos para realizar análises de tensão e otimização de produtos, com o objetivo de reduzir custos.

Em nosso atual cenário industrial, que está inserido na chamada "era das indústrias 4.0", a busca pelo máximo lucro, rendimento ótimo e eficiência financeira é a norma. O conceito de desperdício é imediatamente associado a prejuízos e à diminuição do rendimento. Portanto, a fabricação de peças leves e ao mesmo tempo robustas é uma exigência crescente no processo de desenvolvimento de projetos.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é desenvolver o estudo e elaboração do projeto de um componente fundido para substituir um componente soldado, que está apresentando dificuldades no seu processo de fabricação e falhas em campo durante a operação do implemento descompactador de solo rotativo.

### 1.2.1 Objetivos específicos

- Realizar o estudo bibliográfico;
- Realizar o modelamento 3D do novo componente fundido;
- Realizar simulação estrutural do componente e sua otimização;
- Avaliar se houve ganhos com a modificação em termos de custos, peso, tempos de processo e resistência estrutural do componente.

## 2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### 2.1 DESCOMPACTADORES DE SOLO

A descompactação do solo é um processo que visa melhorar suas características, como porosidade e permeabilidade, beneficiando o crescimento das plantas e prevenindo erosão. Dois tipos de implementos são utilizados: Implementos com discos (figura 1) e com hastes. As hastes são preferidas devido ao menor impacto nos agregados do solo e área de contato reduzida com o solo. (DENARDIN, et al. 2012).

Figura 1 - Grade aradora pesada



Fonte: BALDAN, 2023

Segundo Kochhann et al. (2000) a descompactação do solo é realizada por equipamentos que operam em profundidades maiores do que o preparo normal do solo, qualquer implemento agrícola, como discos ou hastes, que possa trabalhar em profundidades maiores que a camada compactada pode ser usado para descompactar o solo, os descompactadores mais eficazes são aqueles com hastes (figura 2) inclinadas para frente e ponteiros de até 8 cm, formando um ângulo de 20° a 25° com o solo durante a operação, isso permite uma melhor penetração e economia de energia.

Figura 2 - Arado subsolador



Fonte: PICCIN, 2023

De acordo com Biulchi (2016) os subsoladores são implementos agrícolas que desestruturam camadas compactadas do solo até 50 cm de profundidade. Eles podem realizar escarificação leve (5-15 cm), escarificação pesada (15-30 cm) e subsolagem (acima de 30 cm). Essa técnica oferece vantagens como perturbação mínima da superfície do solo, ausência de inversão da camada superior, redução da erosão, melhor retenção de água e facilitação do crescimento das raízes das plantas.

## 2.2 DESCOMPACTADOR DE SOLO ROTATIVO

A empresa Agross do Brasil desenvolveu um novo implemento que será usado na descompactação do solo, chamado descompactador de solo rotativo denominado Vollverini. Este equipamento tem como características estruturais, um chassi tubular, rodados laterais para transporte e regulagem de profundidade, dois cilindros hidráulicos de levante do equipamento, quatro eixos contendo neles 32 garras curvadas, desencontradas e parafusadas no eixo central, com penetração no solo de até 45 cm (Figura 3), que farão a descompactação, duas caixas de reservatório de areia servindo para dar peso extra ao implemento, a fim de facilitar a penetração

das hastes no solo e um rolo faca traseiro oscilante, para a quebra de torrões, derrubada da palhada, bem como nivelamento do terreno. O tamanho do implemento varia de 2m até 4,5m de área de trabalho. As informações citadas acima foram fornecidas pela empresa Agross do Brasil (2023).

Figura 3 - Descompactador de solo rotativo Vollverini

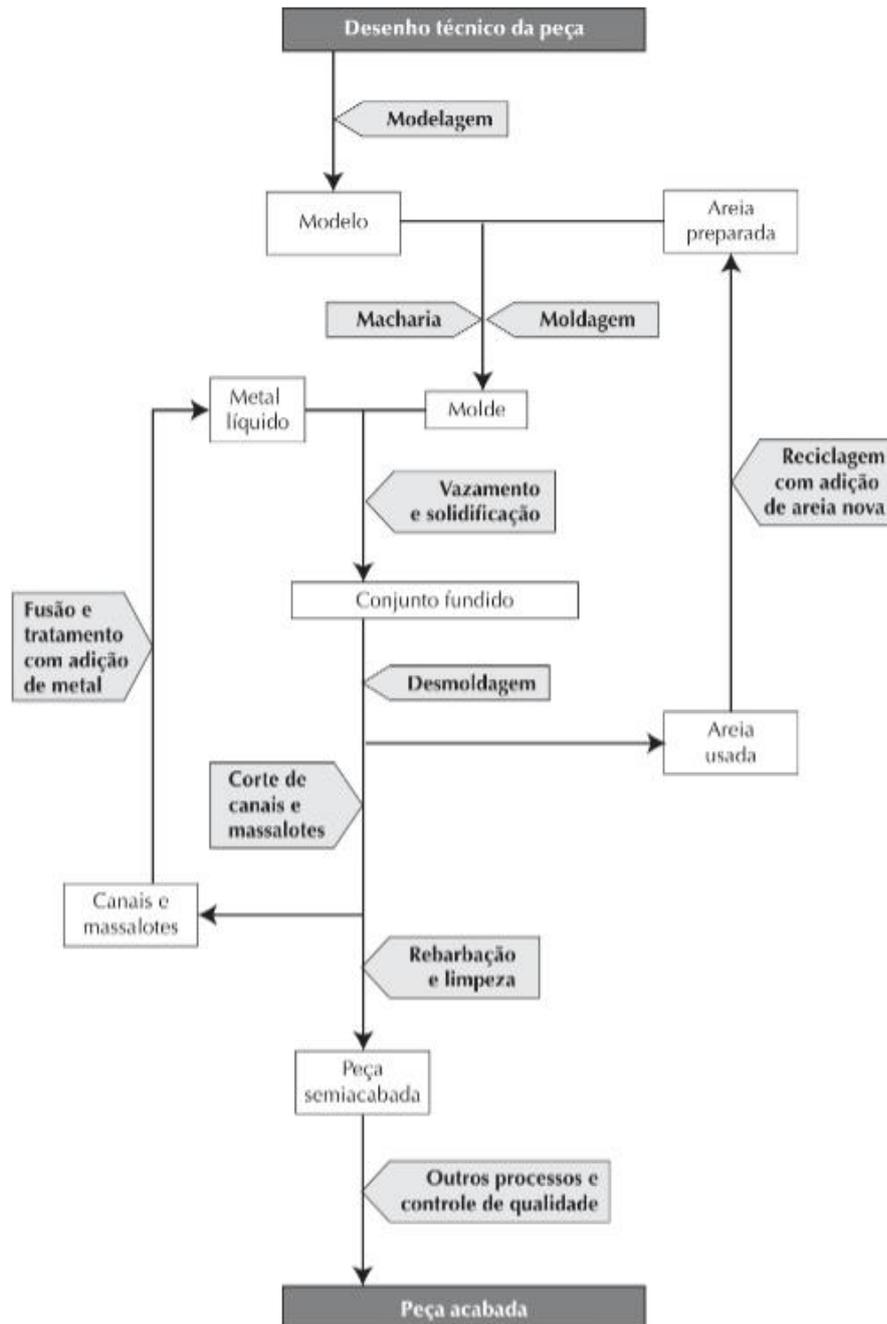


Fonte: Agross do Brasil, 2023

### 2.3 PROCESSO DE FUNDIÇÃO

A fundição é um processo de fabricação no qual o metal líquido é moldado de acordo com a forma de um molde, utilizando a gravidade ou outras forças. Isso permite criar peças de geometrias complexas, tanto internas quanto externas, incluindo algumas com formas finais prontas, a figura 4 mostra o fluxograma de produção de uma peça fundida. Além disso, a fundição é versátil, adequada para peças grandes ou pequenas, e é eficaz na produção em massa. Um benefício adicional é o uso eficiente de sucata metálica, contribuindo para a reciclagem de recursos naturais (KIMINAMI, 2019).

Figura 4 - Fluxograma produção de peça fundida



Fonte: KIMINAMI, 2019.

Conforme Baldam (2014) às fases fundamentais de um processo de fundição comumente são divididas em: projeto e fabricação do modelo, fabricação do molde e machos,

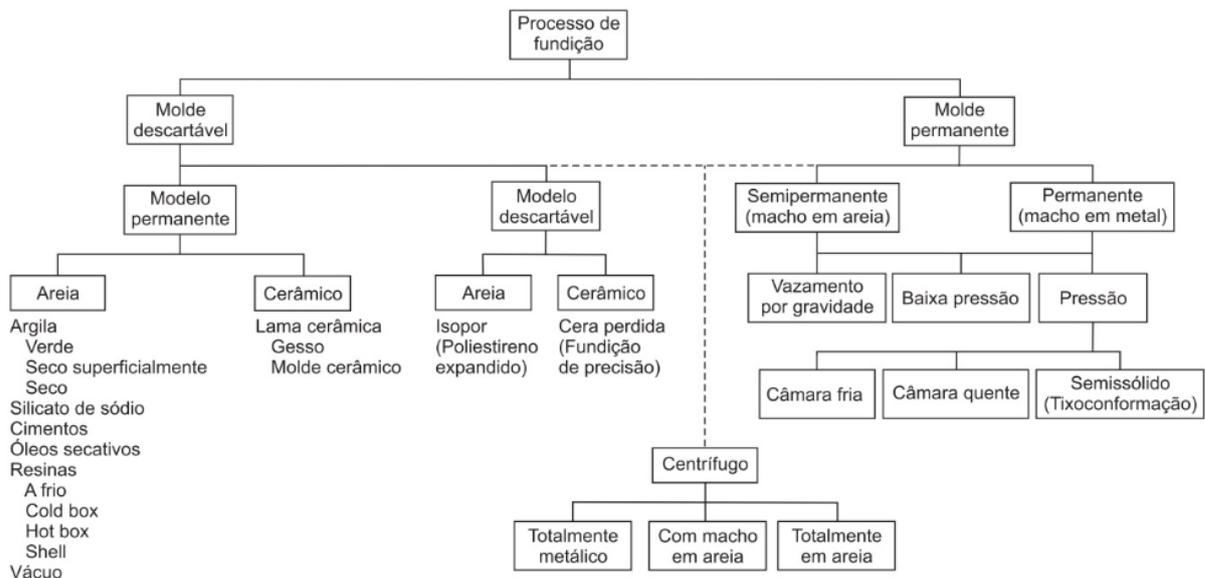
vazamento do metal fundido, desmoldagem e acabamento. Em diversos cenários industriais, a fundição é amplamente reconhecida como um processo de fabricação de componentes metálicos, proporcionando a maneira mais eficaz de transformar matéria-prima metálica líquida em peças semiacabadas prontas para uso imediato.

De acordo com Chiaverini (2005), sob a perspectiva das propriedades mecânicas, é comum considerar que o aço fundido seja de qualidade inferior em comparação ao aço trabalhado, é frequente que peças fundidas apresentem defeitos superficiais ou internos, que são características típicas dos processos de fundição. As peças de aço fundido devem atender a determinados requisitos, sendo os mais significativos:

- homogeneidade;
- granulação fina;
- isenção de tensões internas.

Segundo Baldam (2014), os principais métodos de fundição incluem a moldagem em areia, moldagem em casca, sob pressão, shell molding, cold box, fundição de precisão, centrífuga e alta precisão conforme mostra a figura 5. Essas diversas técnicas são empregadas no processo de fundição de metais. A seleção do método apropriado é influenciada pelo tamanho e geometria da peça, o tipo de liga a ser fundido, a quantidade de peças a serem produzidas e a qualidade superficial desejada, entre outros parâmetros.

Figura 5 - Classificação dos processos de fundição



Fonte: BALDAM, 2014

### 2.3.1 Projeto de peças fundidas

Conforme Baldam (2014) ao projetar uma peça a ser fundida, é essencial considerar os fenômenos que ocorrem durante o processo de solidificação do metal líquido no interior do molde, evitando defeitos no produto, deve-se prestar atenção a vários fatores, como estrutura cristalina que se forma durante a solidificação inicial do metal, as tensões geradas pelo resfriamento e a espessura das paredes da peça, pois a negligência desses aspectos pode resultar em produtos defeituosos.

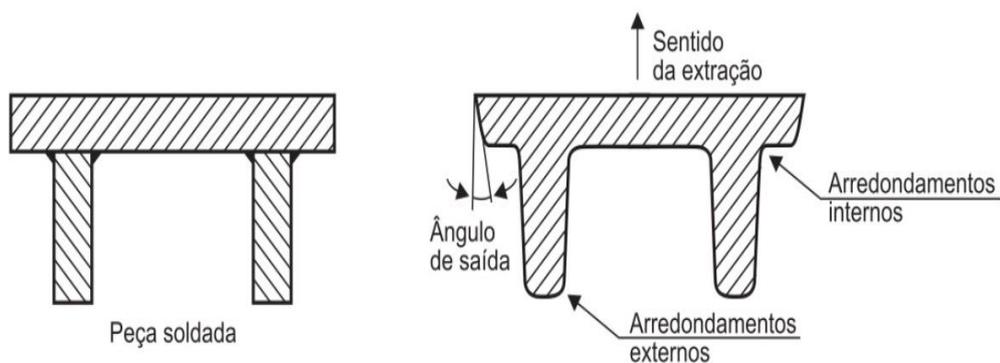
De acordo com Kiminami (2019), o projeto do modelo deve levar em consideração alguns fatores:

A confecção do modelo tem que levar em conta os seguintes fatores:

- O material depende do número de moldes a serem confeccionados (madeira, metal, gesso, polímeros).
- As dimensões devem considerar a contração do metal quando esfriar.
- O desenho deve considerar aspectos que facilitam a moldagem (por exemplo, conicidade) e que minimizem os defeitos de solidificação (por exemplo, cantos vivos, variações bruscas de seções, espessura mínima de parede, etc.)
- Se há uso de macho, é preciso prever as cavidades para o respectivo encaixe.
- Projetar o sistema de canais de vazamento e massalotes.

As características comuns em peças fundidas incluem os ângulos de saída e arredondamentos. Os ângulos de saída são essenciais para permitir a fácil remoção do modelo do molde. A Figura 6 mostra um modelo de peça soldada sem ângulos de saída e uma peça fundida com ângulos de saída (BALDAM, 2014).

Figura 6 - Comparação peça soldada x fundida



Fonte: BALDAM, 2014.

Ainda de acordo com Baldam (2014), é fundamental realizar um dimensionamento com proporções harmônicas em todas as seções da peça, garantindo uma transição suave e gradual nas espessuras. Isso implica na eliminação de cantos vivos e mudanças bruscas de direção, a figura 7 mostra as seções mínimas recomendadas para peças o projeto de peças fundidas.

Figura 7 - Seções mínimas recomendadas em peças fundidas

Tipo de liga	Seção mínima, em mm			
	Fundição em areia	Fundição em molde metálico	Fundição sob pressão com grandes áreas	Fundição sob pressão com pequenas áreas
Alumínio	3,175 a 4,76	3,175	1,905	1,143
Cobre	2,38	3,175	2,54	1,524
Ferro fundido cinzento	3,175 a 6,35	4,76	–	–
Chumbo	–	–	1,905	1,016
Magnésio	4,0	4,0 a 4,176	2,032	1,27
Ferro maleável	3,175	–	–	–
Aço	4,76	–	–	–
Estanho	–	–	1,524	0,762
Ferro fundido branco	3,175	–	–	–
Zinco	–	–	1,143	0,38

Fonte: BALDAM, 2014.

## 2.4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é uma ferramenta poderosa amplamente utilizada para resolver numericamente uma ampla gama de problemas de engenharia, suas aplicações englobam a análise de tensões e deformações em estruturas como veículos, aeronaves, edifícios e pontes, bem como a análise de transferência de calor, dinâmica de fluidos e fluxo magnético (CHANDRUPATLA & BLEGUNDU, 2014).

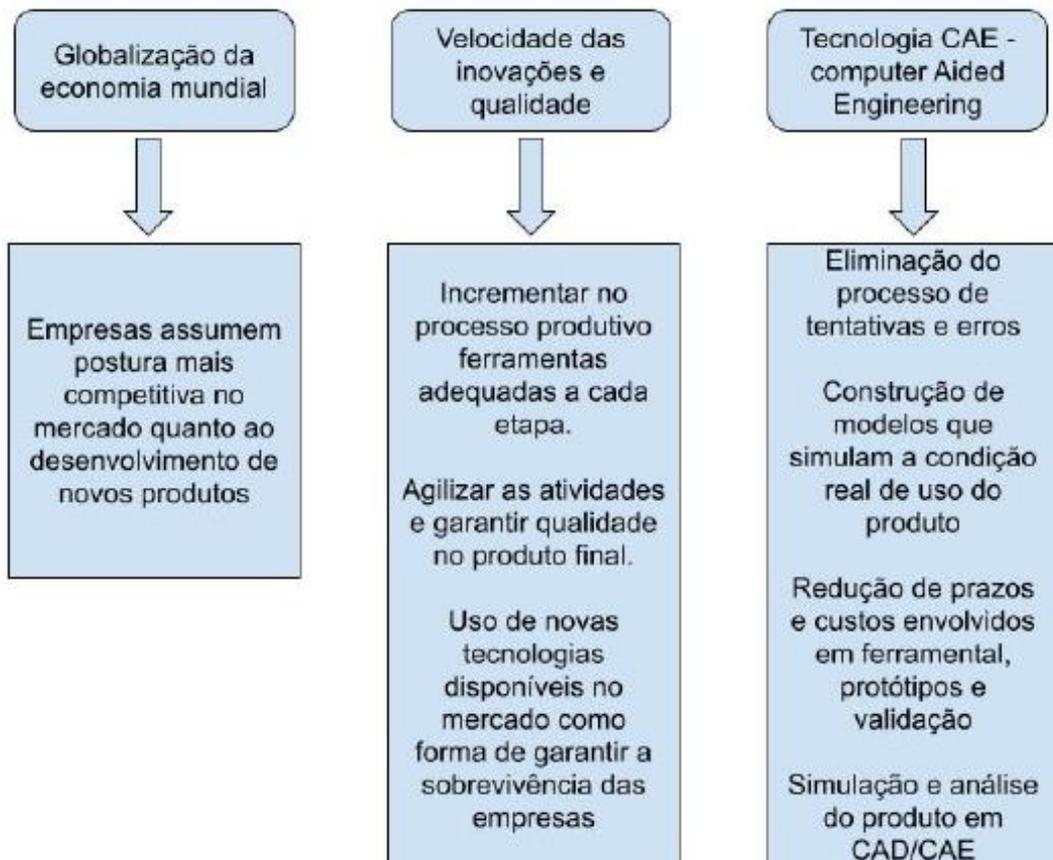
Segundo Norton (2013) o uso da Análise de Elementos Finitos (FEA) se tornou acessível graças à disponibilidade de *software* comercial de análise, muitos dos quais são compatíveis com programas de modelagem gráfica (CAD), embora esses softwares comerciais facilitem a obtenção de resultados de análises FEA, é importante ressaltar que resultados imprecisos podem ocorrer se o usuário não tiver um entendimento adequado de como utilizar essa ferramenta corretamente.

Conforme Chandrupatla & Blegundu, (2014) antes de construir o primeiro protótipo, é possível testar várias configurações alternativas em um computador. Nesse método de análise,

uma região complexa que representa um meio contínuo é dividida em formas simples e discretas chamadas elementos finitos. Através de um processo de montagem que leva em conta os carregamentos e as restrições, obtém-se um conjunto de equações. Resolver essas equações fornece uma aproximação do comportamento do meio contínuo.

A criação, simulação e análise em CAD/CAE desempenham um papel fundamental no processo de desenvolvimento de produtos, permitindo economizar tempo e recursos que seriam gastos em longos prazos e custos relacionados ao ferramental, protótipos e validação. Antes de avançar para a fabricação de protótipos, que podem ou não produzir resultados satisfatórios, o modelo ou protótipo virtual guia as decisões. Isso ajuda a determinar, dentre uma ou mais propostas, a configuração final ideal do produto que atende a todos os requisitos de qualidade e critérios de design, garantindo assim a competitividade da empresa, conforme mostrado na figura 8 (ALVES, et. al. 2022).

Figura 8 - Vantagens da aplicação CAE/CAD



Fonte: Adaptado de Alves, et. al. (2022)

## **2.4.1 Tipos de análises por elementos finitos**

A análise por elementos finitos, pode ser dividida em vários tipos dependendo das suas especificações, entre esses vários tipos, as que mais se destacam são a análise linear estática, análise dinâmica, análise não linear e análise de fadiga.

### **2.4.1.1 Análise linear estática**

As análises estáticas são baseadas na suposição de que os carregamentos não mudam com o tempo, ou de forma mais precisa, variam muito lentamente ao longo do tempo. Nessas análises, assume-se que as cargas aplicadas à estrutura não geram forças dinâmicas. (ALVES, et. al. 2022).

Em muitos cenários práticos, utiliza-se um carregamento estático como base para realizar uma análise estática correspondente. Isso é feito com base em dados de medições passadas e valores máximos de carga, obtidos a partir de experimentos ou de registros de situações reais já previamente analisadas.

### **2.4.1.2 Análise dinâmica**

A essência das análises dinâmicas reside no fato de que elas consideram a influência das forças inerciais, ou seja, movimentos rápidos que resultam em acelerações, ao invés de movimentos lentos. Essas análises levam em conta amplificações dinâmicas com base no entendimento das relações entre as frequências de excitação e as frequências naturais do sistema (ALVES, et. al. 2022).

Um problema é considerado dinâmico quando envolve a presença de forças de inércia, que são tratadas por meio da conhecida equação do princípio fundamental da dinâmica, representada como a segunda lei de Newton:  $F = M \cdot a$ . As forças de inércia se manifestam sempre que há movimentos rápidos que resultam em acelerações.

### **2.4.1.3 Análise não linear**

De acordo com Alves, et. al. (2022) a análise não linear pode ser definida de forma curta e direta como sendo aquela em que a rigidez varia com o carregamento, seja por grandes deflexões, grandes deformações, problemas de contatos entre partes do sistema, plasticidade.

### **2.4.1.4 Análise de fadiga**

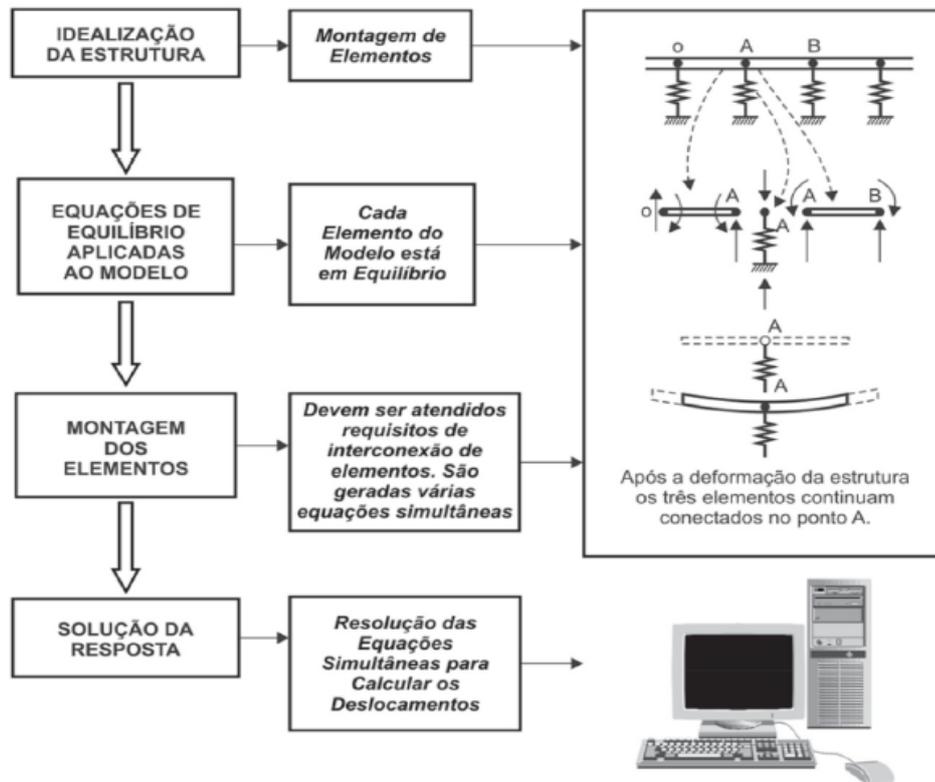
Segundo Alves, et. al. (2022) quando as tensões experimentam variações ao longo do tempo e criam ciclos de carregamento, estamos lidando com o fenômeno da fadiga. No entanto, se as tensões mudam de maneira lenta, não estamos tratando de um problema dinâmico, mas ainda assim a fadiga pode ser um aspecto a considerar.

Componentes mecânicos geralmente estão expostos a carregamentos que levam à fadiga. De fato, aproximadamente 80% a 90% de todas as falhas por fadiga ocorrem por esse motivo. Isso ocorre, em parte, porque as estruturas normalmente são projetadas para resistir à deformação plástica, em vez de serem especificamente projetadas para resistir à fadiga.

## **2.4.2 Sistemas discretos**

A estrutura, o componente mecânico, ou o corpo contínuo em geral, é dividido em um número finito de partes chamadas elementos, que são interligados por pontos discretos conhecidos como nós, representados na figura 9. Quando montamos um modelo, como por exemplo com 10 mil nós, não estamos calculando os deslocamentos de cada ponto contínuo infinito, mas apenas daqueles 10 mil nós (ALVES, et. al. 2022).

Figura 9- Método geral para análise de sistemas discretos - sistema discreto padrão

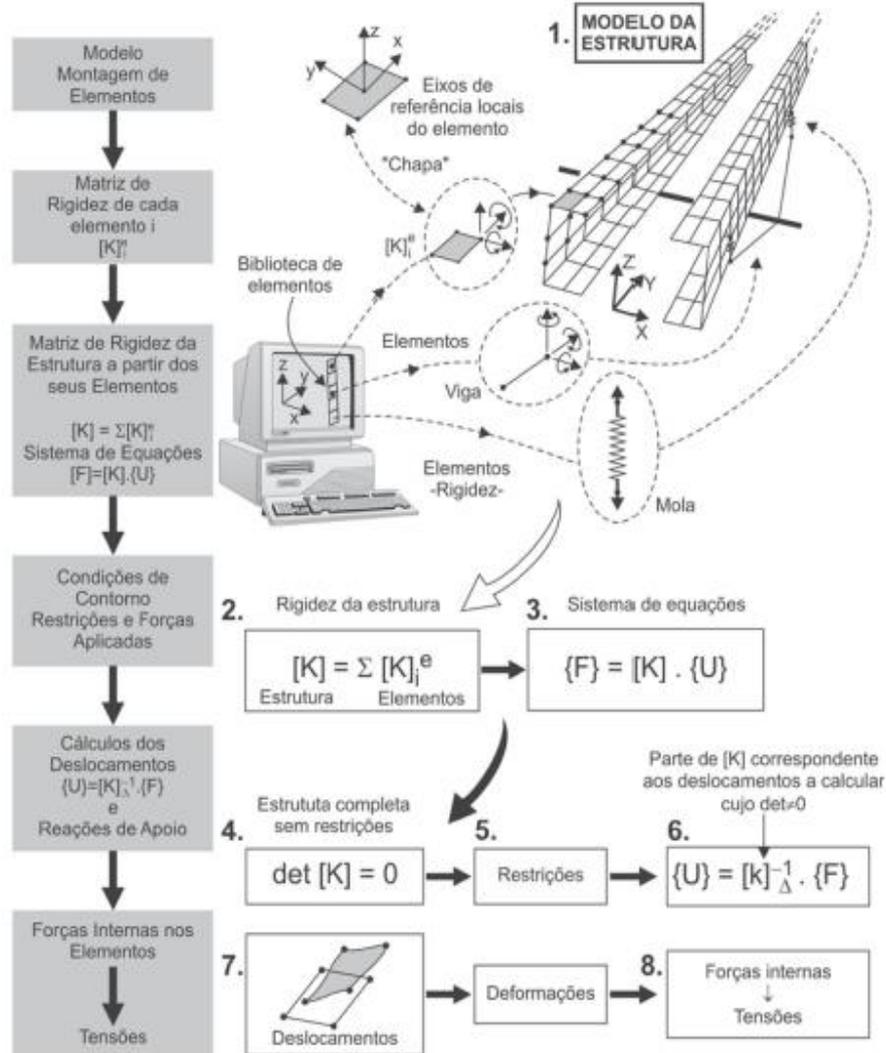


Fonte: Alves, et. al. (2022)

### 2.4.3 Aplicação dos elementos finitos no software

De acordo com Alves et al. (2022), o software de análise estrutural calcula a rigidez da estrutura usando notação matricial a partir de cada elemento, isso resulta em um sistema de equações. Para obter uma solução única, são aplicadas restrições ao sistema. As cargas causam deformações na estrutura, refletidas nos deslocamentos dos nós. Os elementos conectam os nós, e, com base nos deslocamentos nodais conhecidos, as deformações em cada elemento são determinadas através de técnicas de interpolação. A figura 10 mostra uma sequência lógica aplicada a análise de elementos finitos.

Figura 10 - Sequência lógica de análise de elementos finitos



Fonte: Alves filho, 2013

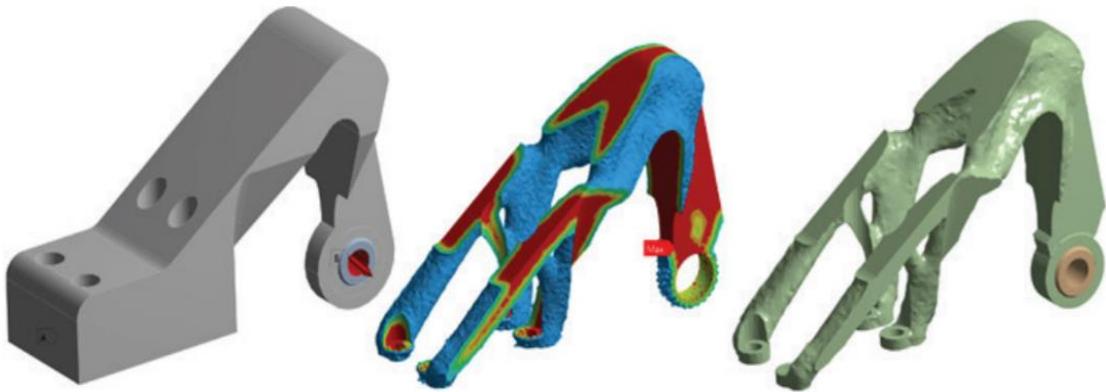
## 2.5 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

A otimização topológica é uma subdivisão da otimização estrutural que se concentra em ajudar na criação de estruturas que maximizem sua rigidez, permitindo que suportem cargas externas sem experimentar grandes deslocamentos ou deformações, ao mesmo tempo em que atendem a requisitos específicos (VITORINO, 2019).

Conforme Morishita (2015) esse processo tem como objetivo identificar a distribuição mais eficiente de material dentro de uma região delimitada pela geometria do componente, na engenharia mecânica, seu foco é preservar ou aprimorar o desempenho estrutural, as propriedades térmicas, o fluxo de fluidos e as características biomecânicas.

Na otimização paramétrica, a abordagem envolve aprimorar um parâmetro específico de uma estrutura conhecida, como a espessura ou a área da seção transversal de uma viga, visando alcançar máxima rigidez ou mínima deflexão. Por outro lado, na otimização de forma, o foco é encontrar a configuração ideal para a estrutura, ajustando continuamente o seu contorno ao longo do processo (VITORINO, 2019), mostrado na figura 11.

Figura 11 - Exemplo de otimização topológica



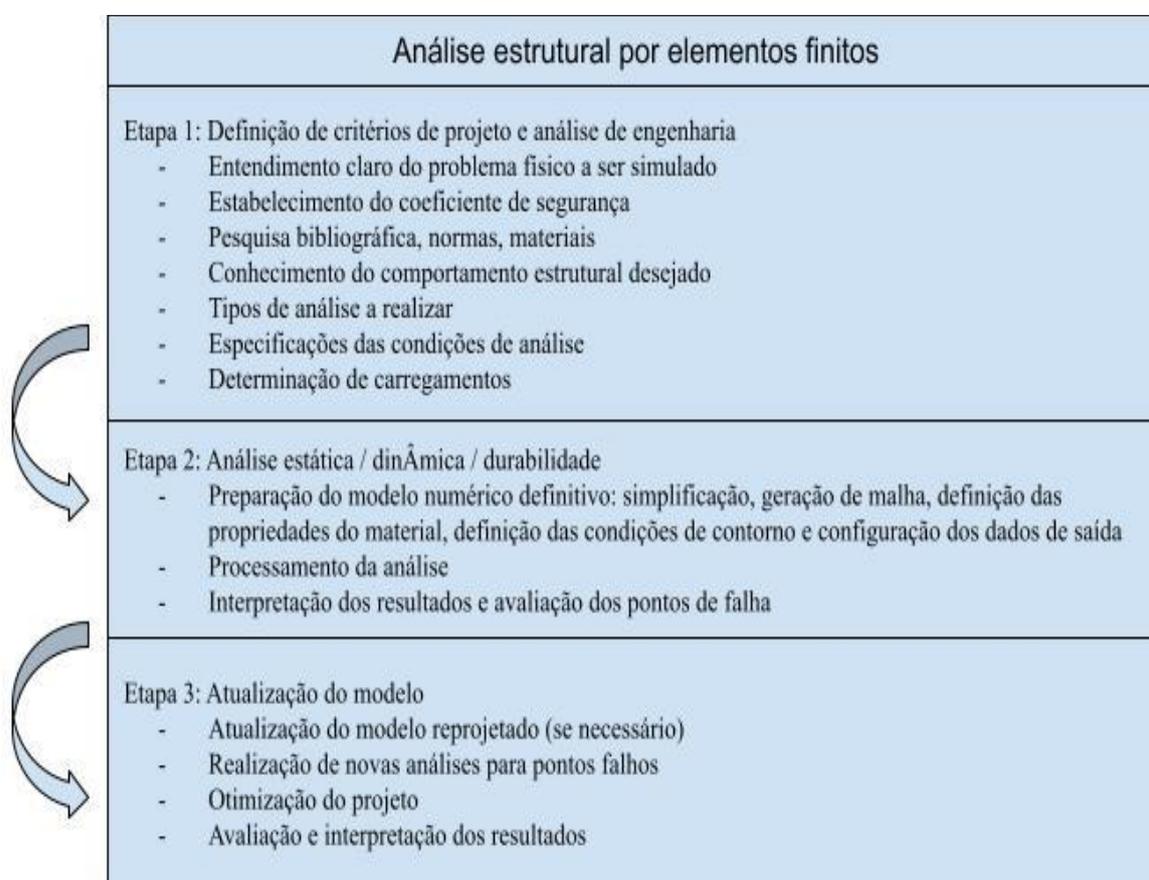
Fonte: EEES, 2023

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa é classificada como científica aplicada, conforme relata Zanella (2011) seu objetivo principal é encontrar respostas para os desafios enfrentados pela humanidade, buscando compreender como abordar esses problemas de maneira eficaz. A metodologia é quali-quantitativa, pois envolve coletar informações e especular sobre as possíveis razões por trás dos resultados que foram alcançados.

Para o desenvolvimento do projeto do novo componente fundido foram utilizadas três etapas conforme figura 12.

Figura 12- Atividades principais da análise estrutural



Fonte: Adaptado de Alves, et. al. (2022)

1ª etapa - definição de critérios de projeto e análise de engenharia - etapa onde é analisado o componente atual soldado, é feito uma verificação das principais falhas do componente e definido os critérios do novo componente fundido, nessa etapa é definido as

características do novo componente como coeficiente de segurança, massa, material do componente, intercambialidade, determinação de carregamentos

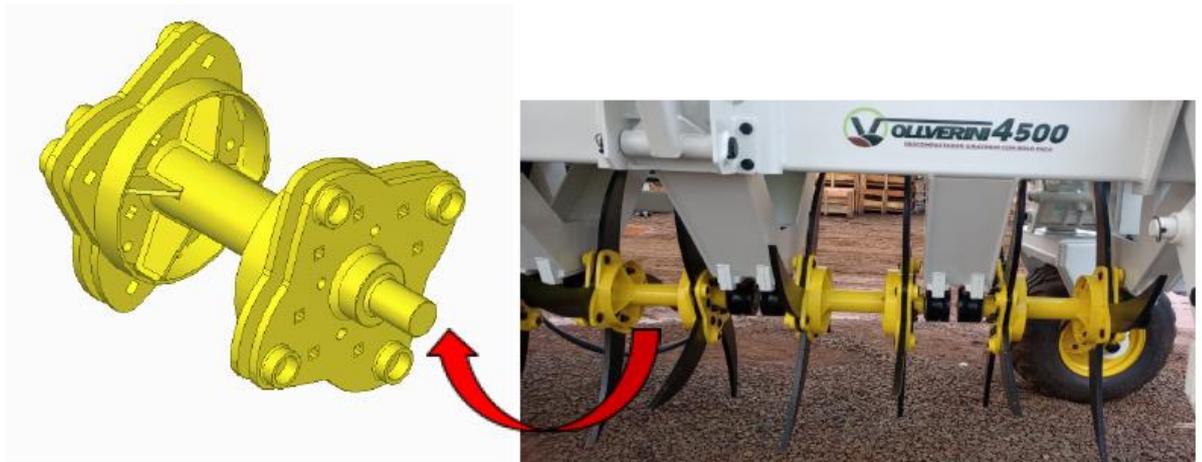
2ª etapa - Análise estática/dinâmica - Nessa etapa é feita a análise numérica, geração da malha e configuração dos tipos de elementos, definição das propriedades dos materiais, definição das condições de contorno. Após é feito o processamento da análise e a interpretação dos resultados e avaliação dos pontos de falha.

3ª etapa - Atualização do modelo - Nessa etapa é feita a atualização do modelo se necessário, realização de novas análises, otimização do modelo e avaliação e interpretação da otimização.

### 3.1 DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS DE PROJETO E ANÁLISE DE ENGENHARIA

O componente atual é denominado conjunto soldado do tubo central é montado na parte inferior do chassi do descompactador de solo rotativo Vollverini, ele serve como suporte para as hastes do descompactador, mostrado na figura 13. O componente vai montado em todas as versões do descompactador de solo rotativo, Vollverini 4500, Vollverini 3000, Vollverini 3000 pró e Vollverini 2000.

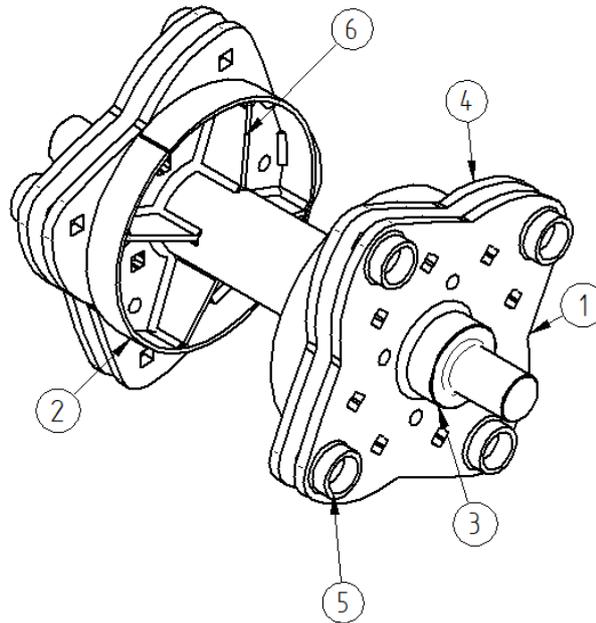
Figura 13 - Conjunto atual soldado



Fonte: Autor, 2023

As peças do componente atual são fabricadas com chapas de material ASTM A36, buchas de material AISI 1020 e o eixo de material SAE 1045 trefilado conforme mostra a figura 14. O componente atual possui peso de 46,5 Kg.

Figura 14 - Componentes do conjunto soldado atual



ITEM	REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	SUB010804	FLANGE EIXO HASTE	2
2	SUB010803	PROTETOR PARAFUSO	2
3	SUB010805	EIXO BASE SUPORTE HASTES	1
4	SUB010808	FLANGE EIXO HASTE	2
5	SUB010809	BUCHA PROTEÇÃO PORCA	8
6	SUB010810	REFORÇO FLANGE DAS HASTES	8

Fonte: Autor, 2023

### 3.1.1 Falhas apresentadas no componente atual

O componente em estudo apresentou algumas falhas, tanto no seu processo de fabricação, quanto durante a sua operação, as principais falhas foram: Variação dimensional do processo de soldagem, impossibilitando a montagem das hastes (figura 15), trincas na região da solda (figura 16), desgaste excessivo das hastes após curto período de operação (figura 17) e porcas das hastes se soltando durante a operação do implemento (figura 18).

Figura 15 - Variação dimensional



Fonte: Autor, 2023

Figura 16- Trincas na solda



Fonte: Autor, 2023

Figura 17 - Desgaste das hastes



Fonte: Autor, 2023

Figura 18 - Porcas frouxas



Fonte: Autor, 2023

### 3.1.2 Requisitos do projeto

A tabela 1, adaptado de Alves, et. al. (2022) apresenta a lista de requisitos do projeto, estes requisitos foram obtidos, principalmente para mitigar as falhas apresentadas no item anterior e facilitar os processos internos de fabricação. Na esquerda do quadro são apresentadas as principais características a serem consideradas para a elaboração do novo projeto. Os requisitos são classificados da seguinte forma: **O** = Obrigatório, deve ser cumprido obrigatoriamente; **D** = Desejável, não é obrigatório, mas é desejado que seja cumprido.

Tabela 1 - Lista de requisitos do novo suporte das hastes

Lista de requisitos novo suporte das hastes fundido		
Características	Descrição	Classificação
1 - Geometria	Deve possuir geometria próxima do conjunto soldado (intercambialidade)	O
	Manter espessura do conjunto soldado	D
2 - Forças (carregamentos)	Suportar os carregamentos	O
3 - Massa	Possuir massa menor ou igual do conjunto soldado	D
4 - Processo de fabricação	Ser fabricado por processo de fundição	O
5 - Montagem	Deve ser de fácil montagem e sem interferências	O
	Deve ser intercambiável com o conjunto soldado (substituição de máquinas a campo)	O
6 - Custos	Conjunto montado novo deve ser mais barato que o conjunto montado atual	D
	Substituição das hastes deve ser mais barata que a atual	
7 - Material	Utilizar aço fundido, aço deve ter boa soldabilidade, para que possa ser soldado no eixo	O

Fonte: Autor, 2023

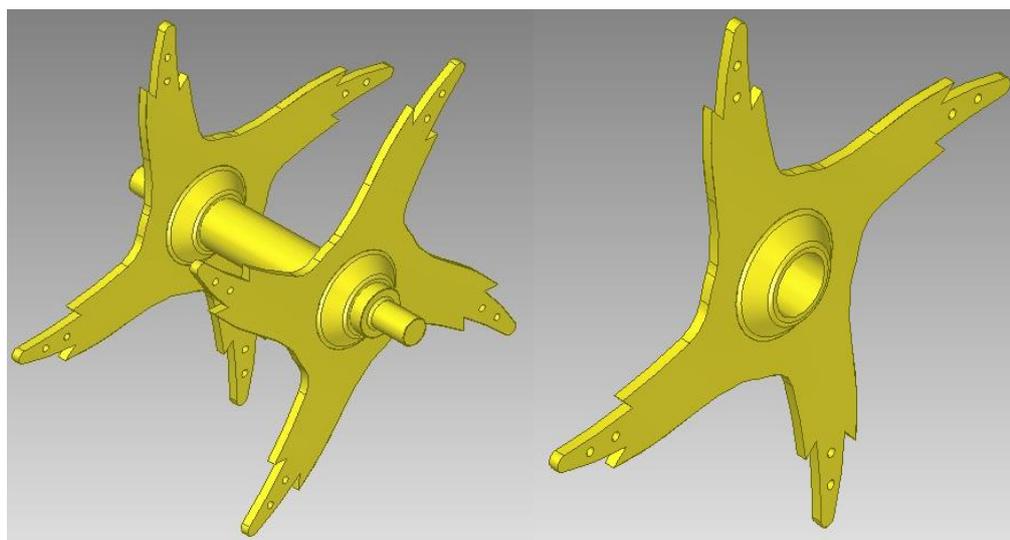
## 3.2 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

Para a realização desta etapa, foi utilizado para o projeto parcial do novo componente fundido o *software* de modelamento 3D Solid Edge da empresa Siemens e para a análise de elementos finitos e otimização do componente o *software* Ansys versão estudantil da empresa Ansys Inc, nesta etapa foi realizada a análise estática do componente.

### 3.2.1 Projeto parcial do novo componente fundido

Para elaborar o componente parcial foi utilizado a tabela 1, seguindo a lista de requisitos necessários, o mesmo foi elaborado com sobra de material, para posteriormente ser otimizado. O novo modelo segue como base as medidas do componente soldado. Optou-se em fazer o suporte das hastes fundido para posteriormente ser soldado no eixo conforme imagem da figura 19.

Figura 19 - Projeto parcial do novo componente



Fonte: Autor, 2023

### 3.2.2 Determinação dos carregamentos

Para definir o carregamento foi utilizado o peso total do equipamento mais a carga total dos reservatórios carregados com areia demonstrados na tabela 2.

Tabela 2 - Pesos do equipamento

TIPO	PESO
EQUIPAMENTO	5000 Kg
AREIA DO RESERVATÓRIO	3000 Kg
TOTAL	8000 Kg

Fonte: Autor, 2023

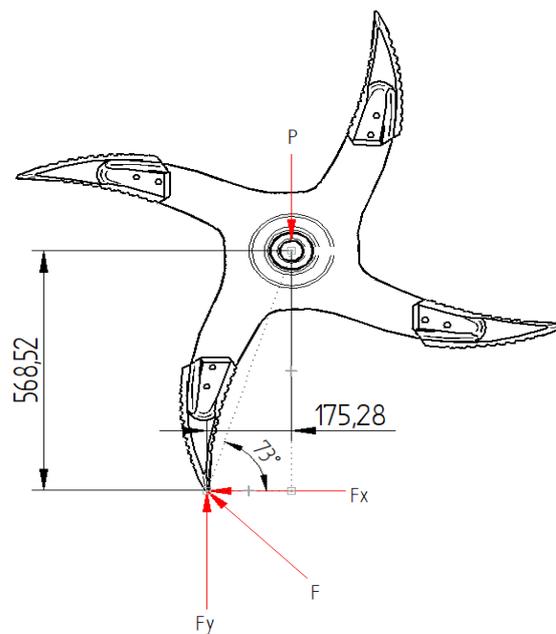
Para a determinação da força, foi considerado quando as primeiras hastes entram em contato com o solo conforme diagrama de corpo livre apresentado na figura 20, também foi considerado que 4 hastes tocam o solo ao mesmo tempo, então o peso de ver ser dividido entre elas. A força que age sobre a haste pode ser definida pelas seguintes fórmulas:

$$P = m \times g$$

$$P = 8000 \text{ Kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$P = 78480 \text{ N}$$

Figura 20 - Diagrama de forças



Fonte: Autor, 2023

$$\Sigma Fy = 0$$

$$Fy \cdot \text{sen}(73^\circ) - 78480 \text{ N} = 0$$

$$Fy = \frac{78480}{\text{sen}(73^\circ)}$$

$$Fy = 82066 \text{ N}$$

$$\Sigma Ma = 0$$

$$Fx \cdot \cos(73^\circ) \cdot (0,570\text{m}) + 82066 \text{ N} \cdot \text{sen}(73^\circ) \cdot (0,176\text{m}) = 0$$

$$Fx \cdot (0,570\text{m}) + 13812 \text{ N} \cdot \text{m} = 0$$

$$Fx = \frac{-13812 \text{ N} \cdot \text{m}}{0,570}$$

$$Fx = -24232 \text{ N}$$

$$FR = \sqrt{(Fx)^2 + (Fy)^2}$$

$$FR = \sqrt{(-24232 \text{ N})^2 + (82066 \text{ N})^2}$$

$$FR = \sqrt{587189824 + 6734828356}$$

$$FR = 85568 \text{ N}$$

$$FR \cong 86 \text{ KN}$$

$$F_{hastes} = \frac{86 \text{ KN}}{4} = 21,5 \text{ KN}$$

### 3.2.3 Definição do material

O material escolhido para a fabricação do novo modelo é o aço ao cromo - molibdênio, segundo Chiaverini (2005), esse material possui as características desejadas no projeto, tais como um limite de escoamento elevado e uma excelente resistência ao desgaste. Em geral, a inclusão de molibdênio em aços com teor de cromo amplia todas as propriedades mecânicas, com ênfase especial na ductilidade e resistência ao impacto. Além disso, o molibdênio tem a capacidade de mitigar a tendência à fragilidade do revenido observada em certos aços com teor de cromo. Devido à sua elevada resistência, esse material tem encontrado aplicação em situações que envolvem temperaturas moderadamente elevadas. A Tabela 3 mostra a faixa típica de composição desse material.

Tabela 3 - Faixa de composição material

Elemento	Porcentagem (%)
Carbono	0,20 - 1
Cromo	0,75 - 1,7
Molibdênio	0,2 - 0,6

Fonte: Chiaverini, 2005

Devido a essas características, foi escolhido como referência para simulação os dados do aço fundido SCL 084 da empresa SICAL, este material possui um limite mínimo de escoamento de 412 MPa e alongamento mínimo de 20%. A figura 21 mostra as propriedades do material inseridas no software Ansys.

Figura 21 - Propriedades do material SCL 084



SCL 084

Composição Química / Composición Química / Chemical Composition (%)							
C	Mn	Si	P máx	S máx	Cr	Ni	Mo
0,17	0,45	0,30	0,035	0,035	0,40	1,65	0,20
0,23	0,65	0,60			0,65	2,00	0,30
Propriedades Mecânicas / Propiedades Mecánicas / Mechanical Properties							
Limite de Resistência / Límite de Resistencia / Tensile Strength				64 kgf/mm <sup>2</sup>			
Limite de Escoamento / Límite Elástico / Yield Strength				42 kgf/mm <sup>2</sup>			
Alongamento / Alargamiento / Elongation				20 %			
Redução de Área / Reducción de Area / Reduction of Area				30 %			
Dureza / Dureza / Hardness				180-220 HB			
Tratamento Térmico / Tratamiento Térmico / Heat Treatment							
Normalizado a 900 °C							
Normalizado a 900 °C							
Normalizing at 900 °C (1,652 °F)							
Soldabilidade / Soldabilidad / Weldability							
■ □ □							
Eletrodo Electrode				Pré-aquecimento Pre-calentamiento Preheating			
AWS E 11018-M.				250 - 300 °C (482 - 572 °F)			
Aplicações / Aplicaciones / Applications							
Aceita cementação. Usado em peças de alta resistência mecânica e resistência ao desgaste. Engrenagens, eixos, pinhões, elos, etc.							
Acero para cementación. Se usa en piezas de alta resistencia mecánica y resistencia al desgaste. Engranajes, ejes, piñones, eslabones, etc.							
Appropriate steel to carburizing process. To be used to parts that high mechanical and wear resistance are needed. Gears, axles, pinions, links, etc.							
Equivalência / Equivalencia / Equivalent							
SAE 4320.							

Fonte: SICAL, 2023

### 3.2.4 Condições de contorno

Após o material ser definido, foram selecionadas as condições de contorno, primeiramente foi criado um suporte fixo no furo central da peça simulando onde será soldado o eixo, conforme mostra a figura 22.

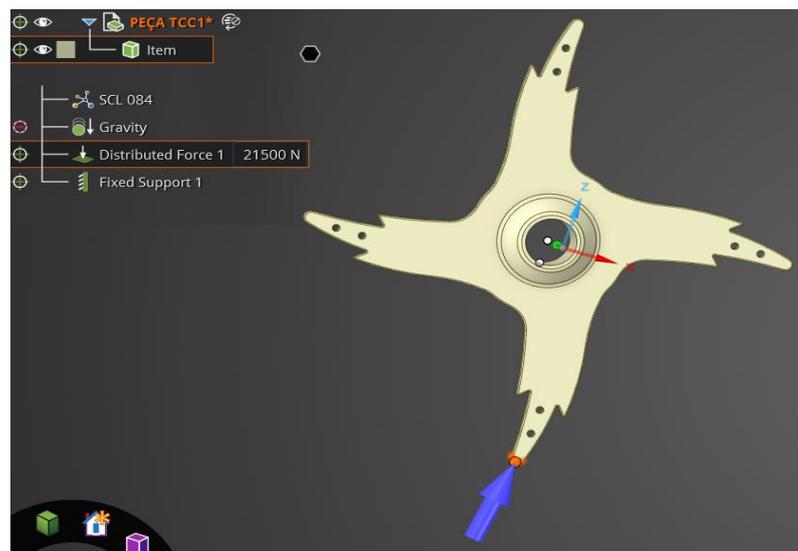
Figura 22 - Aplicação do suporte



Fonte: Autor, 2023

Após fixar o contato, foi adicionado na ponta do suporte das hastes a força de 21.500 N simulando o contato da haste com o solo calculado anteriormente, conforme mostra a figura 23.

Figura 23 - Aplicação da força

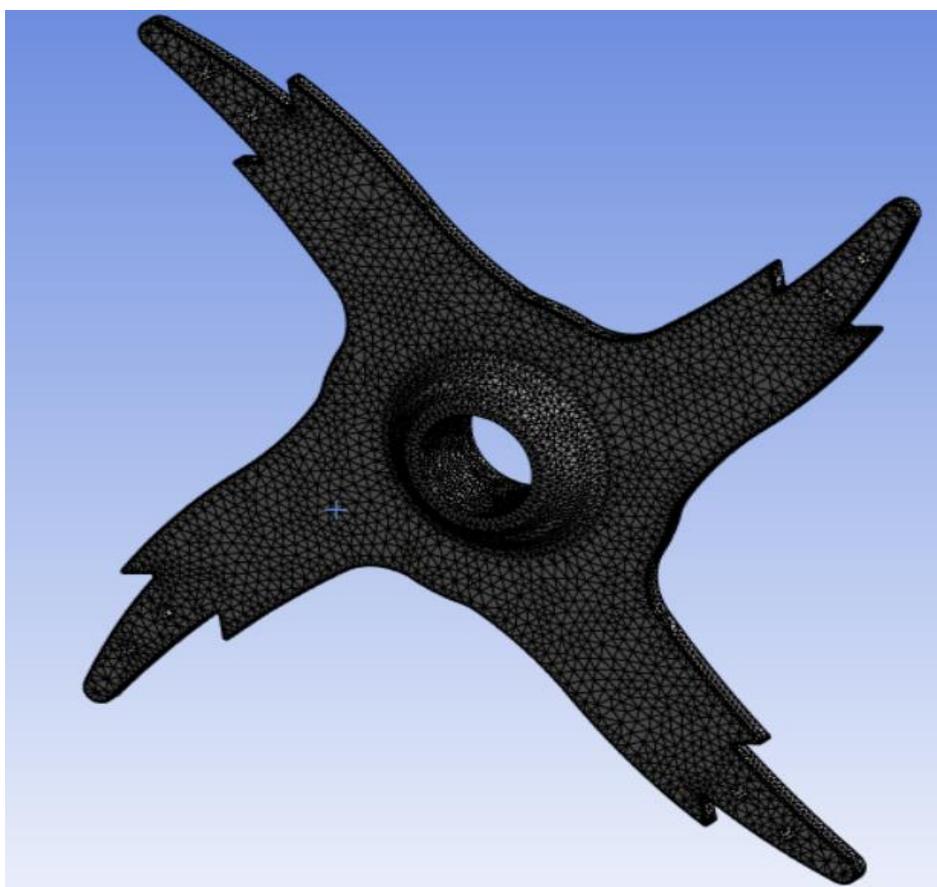


Fonte: Autor, 2023

### 3.2.5 Geração da malha

Em seguida, após os contatos serem definidos e aplicado o carregamento, foi gerada a malha do componente, sendo esta gerada utilizando um elemento de ordem linear com tamanho de 5 mm, o que gerou no componente um total de 47.228 elementos e 85.410 nós. A definição do elemento com tamanho 5 mm se dá em razão de ser uma análise preliminar, com isso, a malha não necessita ser tão refinada. A Figura 24 mostra a malha gerada no suporte das hastes.

Figura 24 - Malha gerada



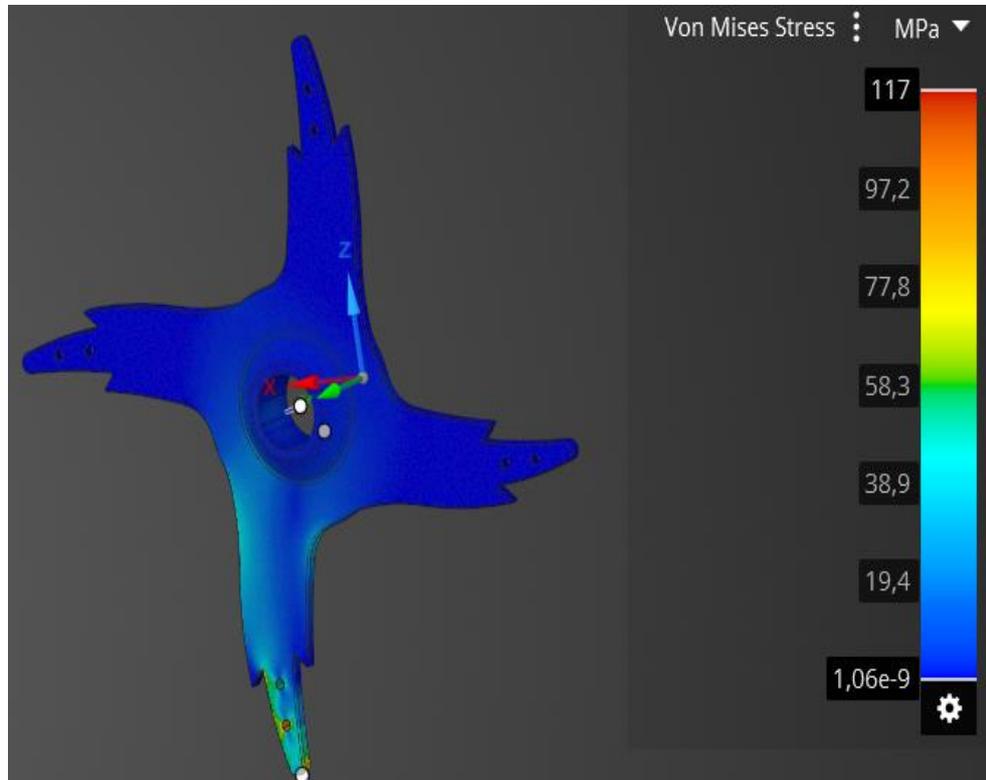
Fonte: Autor, 2023

### 3.2.6 Resultado parcial da análise estática

Após concluída a análise estática do componente, o valor de tensão máximo atingido foi de 119 MPa conforme mostrado na figura 25. Essa tensão máxima servirá como

referência para a otimização topológica. Com base no limite de escoamento do aço SCL 084, que é de 412 MPa, o valor obtido de coeficiente de segurança foi de 3,46

Figura 25 - Tensão máxima

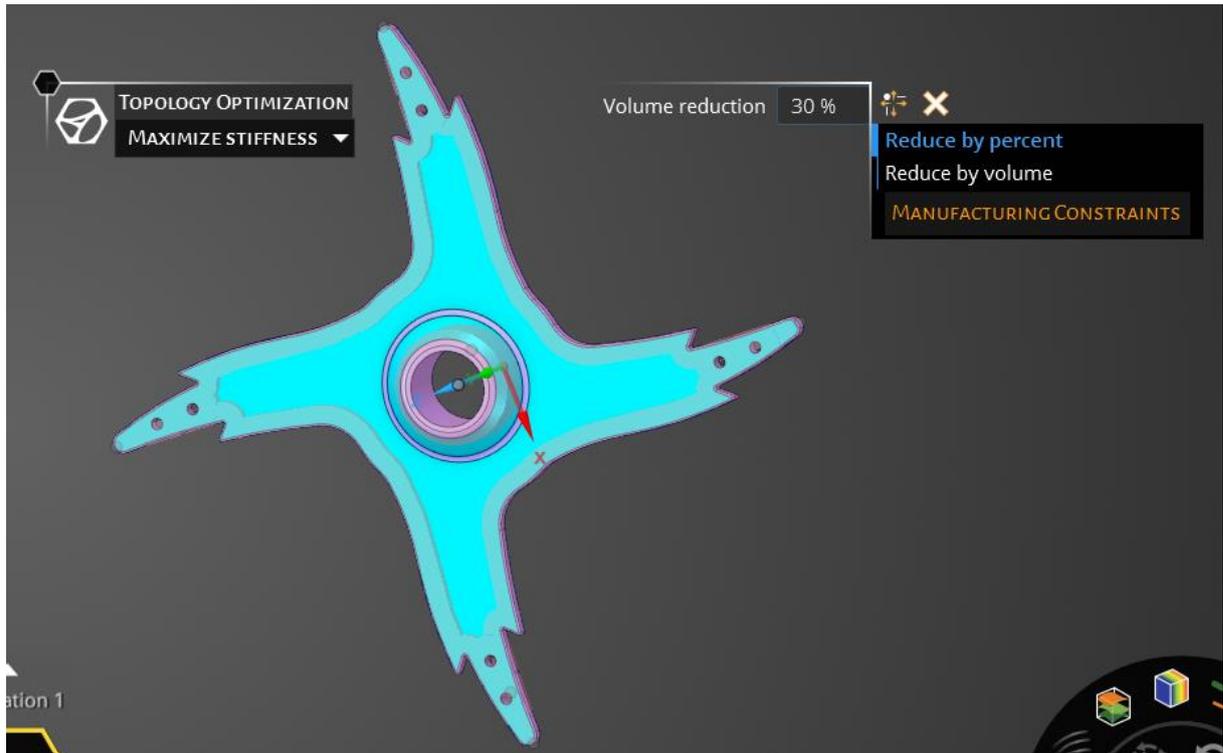


Fonte: Autor, 2023

### 3.3 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Para realizar a otimização, algumas condições precisam ser observadas, como por exemplo máxima tensão admissível, regiões onde o projeto necessita que se tenha material e regiões onde está livre para a otimização e porcentagem de redução de volume do componente. Tendo como referência a tensão máxima de 119 MPa, foi aplicado uma redução de volume de 30% do componente conforme mostra a figura 26.

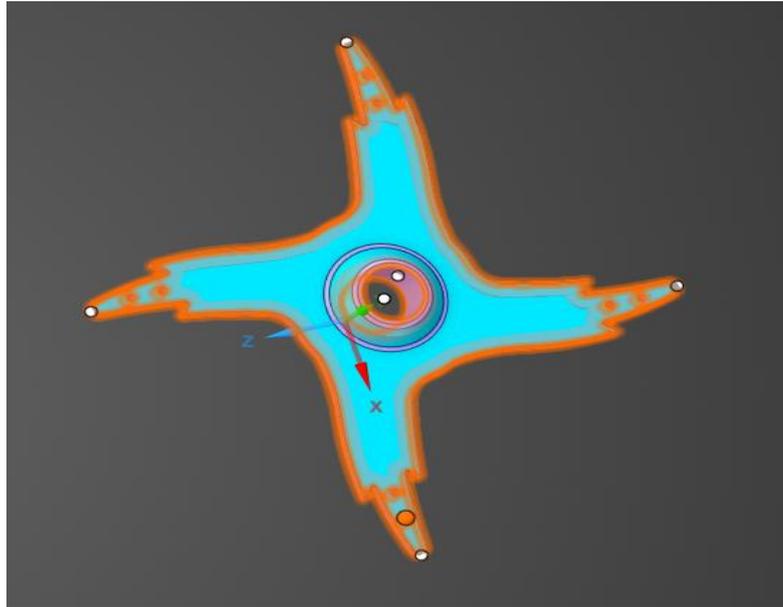
Figura 26 - Aplicação otimização topológica



Fonte: Autor, 2023

A definição da região onde deve ser mantido o material levou em consideração a soldagem e montagem do conjunto; a parte externa onde será fixada a ponteira sulcadora e o furo central onde será soldado o eixo; com isso, conforme visto na Figura 27, a região em laranja estará excluída da otimização, já o bloco na cor azul está livre para uma mudança de forma, decorrente da otimização.

Figura 27 - Região excluída da otimização



Fonte: Autor, 2023

Após aplicado às condições da otimização foi iniciado o *solver* do *software*. A geometria resultante da otimização topológica será apresentada nos resultados.

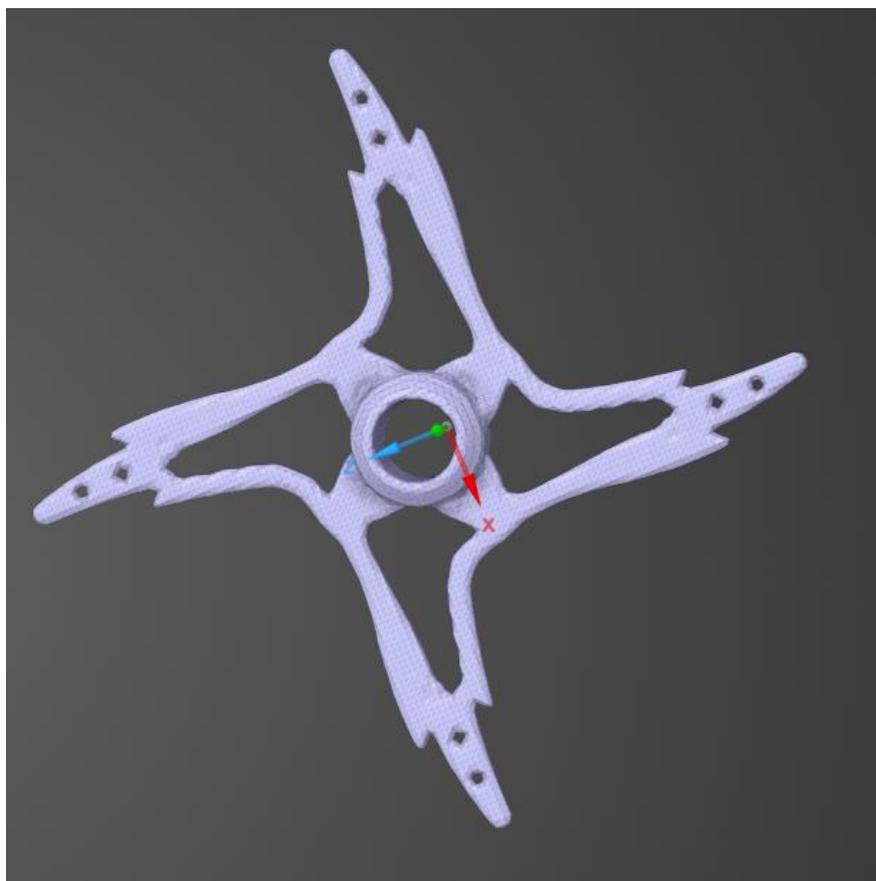
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão expostos os resultados iniciais provenientes da otimização topológica, juntamente com as análises realizadas para validar a nova geometria. Além disso, será apresentado o projeto final por meio de um modelo 3D. Para concluir, uma análise comparativa será elaborada, contemplando os custos, os tempos de processo e o peso de duas situações: o projeto atual do suporte das hastes e o novo projeto do suporte das hastes.

### 4.1 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DO SUPORTE DAS HASTES

Após a conclusão bem-sucedida do processo de otimização no *software*, foi obtido a geometria otimizada, a qual é ilustrada na Figura 28. Observa-se na imagem a presença de alguns contornos sem material, no entanto, será necessário corrigir essa questão durante a etapa final de modelagem da peça.

Figura 28 - Resultado da otimização topológica



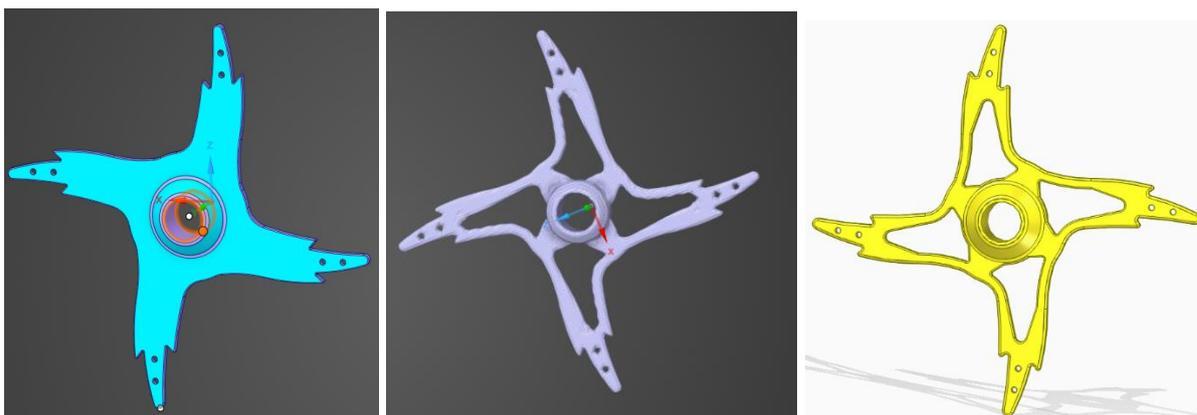
Fonte: Autor, 2023

O resultado consiste em uma geometria em que a distribuição de material foi aprimorada, levando em consideração os parâmetros definidos na configuração dos dados de saída. A tensão no articulador foi mantida abaixo do limite de 117 MPa, e a massa da peça otimizada atingiu aproximadamente 16,0 kg. No entanto, é evidente que algumas áreas da peça requerem um refinamento no modelo. A massa final da peça será determinada somente durante a etapa de detalhamento final do articulador. Em resumo, a otimização fornece ao projetista uma aproximação da geometria final, que ainda precisa de ajustes.

#### 4.2 VALIDAÇÃO DO COMPONENTE OTIMIZADO

Para a validação final, foi procedido da seguinte forma: foi exportada a geometria resultante da otimização no *software* Ansys e, com o *software* de modelagem Solidedge, foi realizado o projeto definitivo do articulador com base na nova geometria. Foi utilizado como ponto de partida o projeto parcial do componente e a geometria gerada durante a otimização, a partir das quais foi realizado a modelagem da geometria final do articulador, como ilustrado na figura 29. Após a modelagem o componente ficou com uma massa de 16,8 Kg.

Figura 29 - Evolução da geometria do componente



Fonte: Autor, 2023

A tabela 4 mostra a redução de peso do componente fundido, desde a sua concepção inicial no *software* de modelamento, passando pela otimização topológica e o seu modelamento final para refinamento de geometria.

Tabela 4 - Redução de peso do componente

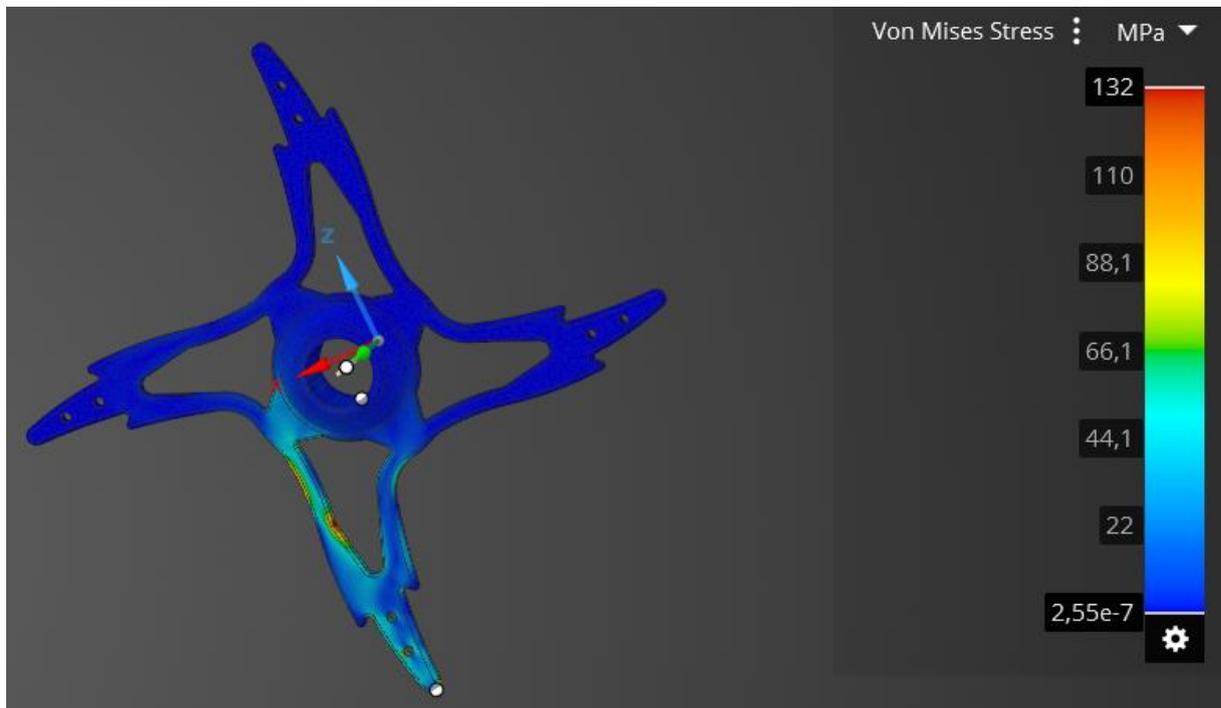
	Geometria inicial	Geometria otimizada	Geometria final
Peso	22,8 Kg	16,0 Kg	16,8 Kg

Fonte: Autor, 2023

Com esses dados foi notado, que após a otimização topológica e modelamento da geometria final houve uma redução de 26,32% da massa inicial do componente, chegando próximo do valor estabelecido de 30%.

Para realizar a validação da resistência estrutural da nova geometria, foi conduzido uma análise estática adicional, considerando a geometria modelada recentemente. Os parâmetros, condições de contorno, restrições e forças empregados nesta análise permaneceram iguais com os utilizados nas análises anteriores. A figura 30 exhibe os resultados das tensões encontradas no novo componente.

Figura 30 - Resultado da análise da geometria final



Fonte: Autor, 2023

Analisando o resultado da análise estática, notamos que o resultado da tensão ficou abaixo do limite mínimo de escoamento do material SCL 084 de 412 Mpa, chegando a tensão máxima de 132 Mpa, por se tratar de uma análise preliminar, optou-se em realizar primeiramente somente uma análise estática do componente para posteriormente, realizar testes práticos a campo, assim demonstrando que a geometria da otimização suporta os esforços exigidos. A figura 2 apresenta uma série de critérios para materiais dúcteis, os quais podem ser selecionados em cada uma das três categorias listadas, com base no discernimento ou julgamento do projetista em relação a qualidade das informações utilizadas, assim o fator de segurança é definido como o maior entre os três escolhidos (Norton, 2013).

Com as informações do projeto, foi definido o fator de segurança do componente mostrados na figura 31, obtendo-se o fator de segurança para o projeto igual a 3. O fator de segurança do componente após a análise é igual a 3,12, isso mostra um resultado satisfatório na análise estática do componente.

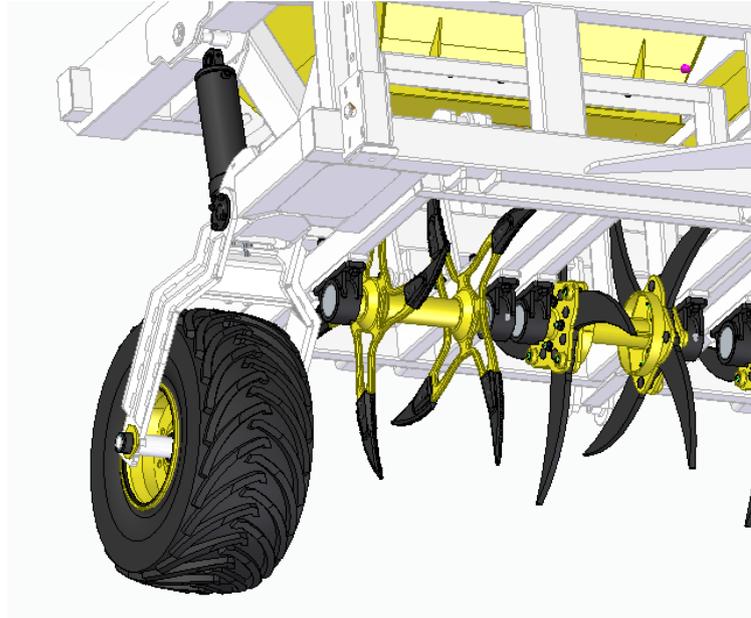
Figura 31 – Determinação fator de segurança

<b>Tabela 1-3 Fatores utilizados para determinar um coeficiente de segurança para materiais dúcteis</b>		
<b>Informações</b>	<b>Qualidade das informações</b>	<b>Fator</b>
		<b><i>F1</i></b>
Dados das propriedades dos materiais disponíveis a partir de testes	O material realmente utilizado foi testado	1,3
	Dados representativos de testes do material estão disponíveis	2
	<u>Dados razoavelmente representativos de testes do material estão disponíveis</u>	<u>3</u>
	Dados insuficientemente representativos de testes do material estão disponíveis	5+
		<b><i>F2</i></b>
Condições ambientais nos quais será utilizado	São idênticas às condições dos testes de materiais	1,3
	Essencialmente igual ao ambiente de um laboratório comum	2
	<u>Ambiente moderadamente desafiador</u>	<u>3</u>
	Ambiente extremamente desafiador	5+
		<b><i>F3</i></b>
Modelos analíticos para forças e tensões	Os modelos foram testados em experimentos	1,3
	Os modelos representam precisamente o sistema	2
	<u>Os modelos representam aproximadamente o sistema</u>	<u>3</u>
	Os modelos são aproximações grosseiras	5+

Fonte: Norton, 2013

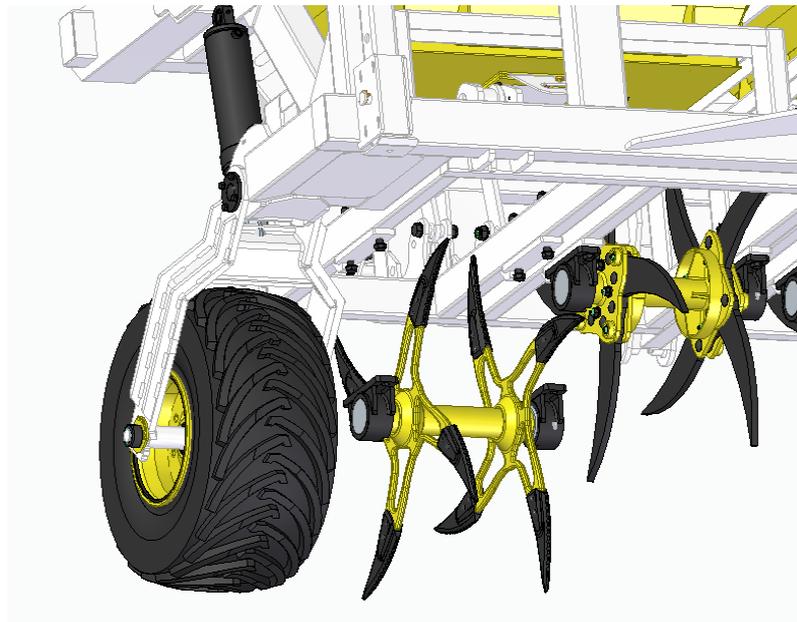
Para a validação final do projeto do componente, ele foi montado no implemento através do software de modelagem conforme mostram as figuras 32 e 33, mostrando que não haverá interferências durante o seu processo de montagem.

Figura 32 - Montagem final do conjunto de hastes



Fonte: Autor, 2023

Figura 33 - Vista explodida do conjunto de hastes



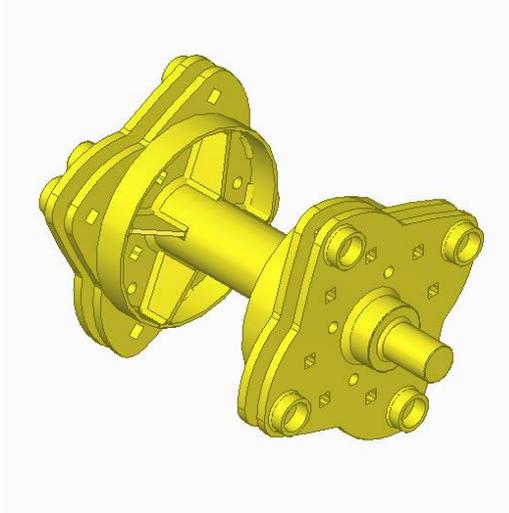
Fonte: Autor, 2023

### 4.3 AVALIAÇÕES COMPARATIVAS

Nesta etapa são feitas as comparações entre o componente soldado atual (figura 34), montado atual (figura 35) e o componente soldado novo (figura 36) e montado novo (figura 37)

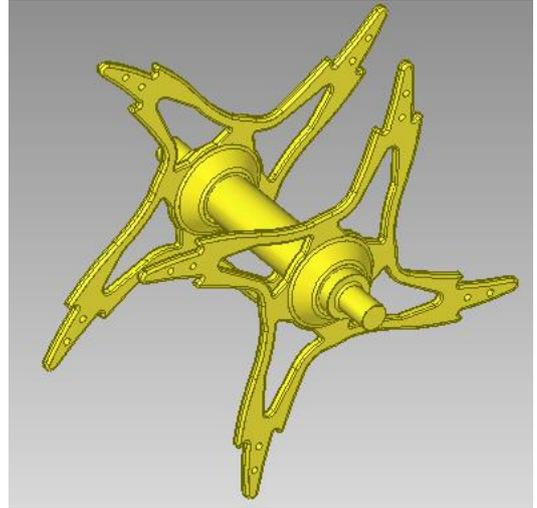
que possui o suporte das hastes feitas em aço fundido. A tabela 4 mostra os custos, peso e tempos de processos de cada componente.

Figura 34 - Conjunto soldado atual



Fonte: Autor, 2023

Figura 36 - Conjunto soldado novo



Fonte: Autor, 2023

Figura 35 - Conjunto montado atual



Fonte: Autor, 2023

Figura 37 - Conjunto montado novo



Fonte: Autor, 2023

A tabela 5 mostra a comparação entre os custos, peso e tempos de processos de cada componente.

Tabela 5 - Tabela comparativa dos conjuntos

Item	Peso (Kg)	Tempo de processo (min)	Custo (R\$)
Conjunto soldado atual	46,5	40	683
Conjunto soldado novo	58,3	20	1032
<b>Redução conjunto soldado</b>	-	<b>20</b>	-
Conjunto montado atual	120	30	3314
Conjunto montado novo	98,3	15	2606
<b>Redução conjunto montado</b>	<b>21,7</b>	<b>15</b>	<b>708</b>

Fonte: Autor, 2023

Nota-se que o conjunto soldado novo ficou com um peso e custo maiores que o conjunto soldado atual, isso se deve ao fato que o novo componente fundido que é soldado ao conjunto novo tem a função de substituir parte das hastes que são montadas no conjunto atual, assim gerando uma redução de custo no conjunto montado novo, isso representa uma redução de custo em torno de 21,36% e uma redução de peso em torno de 18%.

Outro ganho perceptível é na troca das hastes, as hastes possuem uma vida útil em torno de 150 hectares de uso do equipamento, elas são fabricadas em aço hardox 600 e possuem um custo elevado de R\$210,00 por peça, devendo serem substituídas devido ao desgaste, com o novo suporte fundido será necessário trocar somente as ponteiros fabricadas em aço fundido com custo de R\$ 84,00 por peça. Considerando que o implemento possui 32 hastes haverá uma redução de R\$4032,00 por conjunto de hastes trocados conforme tabela 6.

Tabela 6 – Ganhos na substituição de 32 hastes

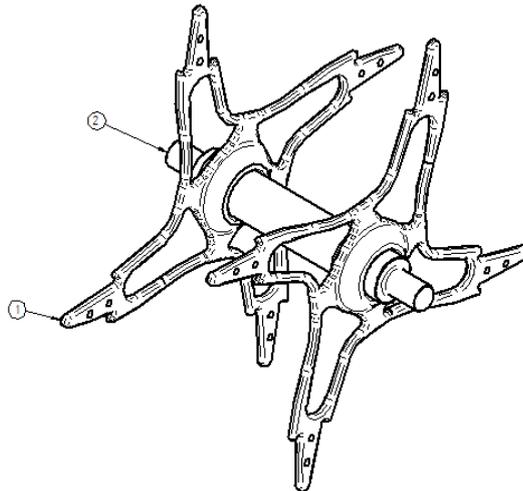
Item	Valor (R\$)	Tempo (min)
Haste em hardox 600	32 x 210 = 6720	240
Haste fundida	32 x 84 = 2688	120
<b>Ganho</b>	<b>4032</b>	<b>120</b>

Fonte: Autor, 2023

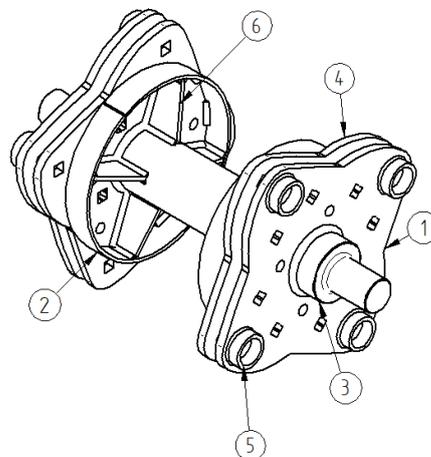
Outra análise é a redução do número de itens dos conjuntos novos para os conjuntos atuais, o conjunto soldado antigo possui seis itens diferente e o conjunto novo apenas dois

conforme mostra a figura 38, o conjunto montado antigo possui sete itens diferentes e o conjunto novo seis itens mostrado na figura 39, o que acaba gerando um tempo menor de separação de peças, espaço de armazenamento e tempo menor de produção.

Figura 38 - Comparação de itens conjunto soldado atual x conjunto soldado novo



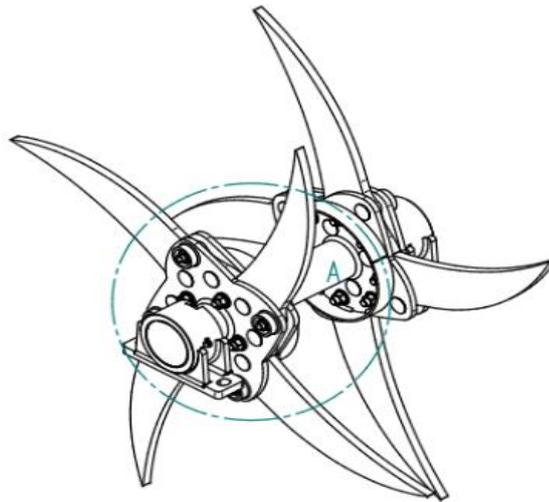
ITEM	REFERÊNCIA	REV.	DESCRIÇÃO	QTD.
1	PROTOTIPO101		SUPORTE HASTES FUNDIDO	2
2	PROTOTIPO102		EIXO BASE SUPORTE HASTES	1



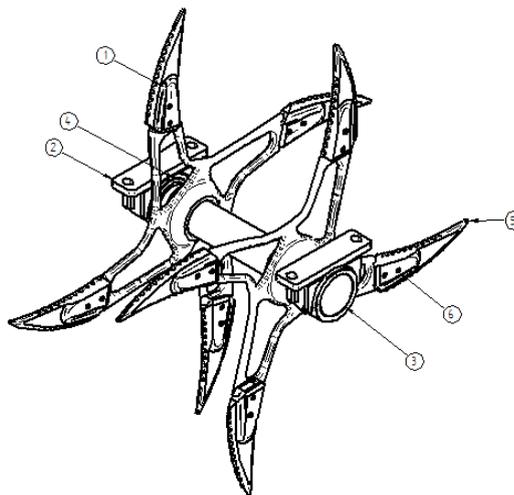
ITEM	REFERÊNCIA	DESCRIÇÃO	QTD.
1	SUB010804	FLANGE EIXO HASTE	2
2	SUB010803	PROTECTOR PARAFUSO	2
3	SUB010805	EIXO BASE SUPORTE HASTES	1
4	SUB010808	FLANGE EIXO HASTE	2
5	SUB010809	BUCHA PROTEÇÃO PORCA	8
6	SUB010810	REFORÇO FLANGE DAS HASTES	8

Fonte: Autor, 2023

Figura 39 - Comparação de itens conjunto montado atual x conjunto montado novo



ITEM	REFERÊNCIA	REV.	DESCRIÇÃO	QTD.
1*	SUB010800		CS TUBO CENTRAL	1
2	SUB010040		HASTE SUBSOLADOR ESTREITA	8
3	PFRT16070P		PARAFUSO FRANCÊS M16x70	32
4	SUB018000		CM MANCAL SUBSOLADOR	2
5*	POSEFLM16		PORCA M16SEXTAVADA	32
6*	RE11012		RETENTOR TAMPÃO 110X12	2
7*	SUB019001		ANEL NILOS UC210 AV	2



ITEM	REFERÊNCIA	REV.	DESCRIÇÃO	QTD.
1	PROTOTIPO100		CS PROTOTIPO SUPORTE DAS HASTES	1
2	SUB018000		CM MANCAL SUBSOLADOR	2
3	RE11012		RETENTOR TAMPÃO 110X12	2
4	SUB019001		ANEL NILOS UC210 AV	2
5	PONTEIRA 0040		HASTE SUBSOLADOR ESTREITA	8
6	PIELB.SX30		PINO ELASTICO B,SX40	16

Fonte: Autor, 2023

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo realizado foi bem-sucedido, onde os objetivos foram alcançados, mostrando que podemos utilizar ferramentas de simulação para otimizar peças, implementos, máquinas. Em relação ao objetivo de substituição do componente soldado pelo componente fundido, foi possível substituir em parte o componente, diminuindo seu tempo e complexidade de soldagem e montagem resultando assim em diminuição de custos no seu componente final montado. A simulação provou ser eficaz, embora ainda seja necessário testar o componente em campo para uma validação final.

Com base nas descobertas e desafios abordados neste estudo, surge a oportunidade de explorar diversas direções para pesquisas futuras, abrindo caminho para um campo promissor de investigações. Neste contexto, apresentamos a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros que podem se revelar relevantes e impactantes:

- A. Fabricar um conjunto protótipo para realizar testes de resistência, desgaste e eficiência durante seu funcionamento em campo;
- B. Realizar a instrumentação do implemento com *strain gauges* a fim de obter mais precisamente os esforços que o equipamento está sendo submetido, assim conseguindo obter uma simulação mais precisa.
- C. Realizar o projeto completo do molde de fundição, com canais, massalotes e machos para fundição.

## REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, O. L.; VILELLA, R. C.; BUTTON, S. T. **Processos de Fabricação e Planejamento de Processos**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

AGROSS DO BRASIL. **Descompactador rotativo com rolo faca vollverini**. Disponível em: <<https://agrossdobrasil.com.br/produtos/descompactador-rotativo-com-rolo-faca-vollverini/>>  
Acesso em: 25 de set. de 2023

ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos - a base da tecnologia CAE**. 6. São Paulo Erica 2013 1 recurso online ISBN 9788536519708.

ALVES, A. F.; WALBER, M.; MEIRA, A. J. **Desenvolvimento de produtos utilizando simulação virtual**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2022. ISBN 9786555206494

BALDAM, Roquemar de Lima. **Fundição processos e tecnologias correlatas**. São Paulo: Erica, 2014. ISBN 9788536519746.

BALDAN. **Grade aradora pesada controle remoto**. Disponível em: <<https://www.baldan.com.br/gtcr-cr-10-30-discos-grade-aradora-pesada-controle-remoto>>  
Acesso em: 25 de set. de 2023.

BIULCHI, P. V. **Máquinas e mecanização agrícola**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016. 236 p.

CHANDRUPATLA, T. R. & BELEGUNDU, A. D.. **Elementos finitos**. Editora Pearson, 2014. 538 p. ISBN 9788543005935.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos**. 7.ed. São Paulo: ABM, 2005. 599 p. ISBN 8586778486.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. A.; WIETHOLThER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Embrapa, Documento 141, 2012.

EEES. **Otimização topológica como reduzir custos com matéria prima e superar a crise.** Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/otimizacao-topologica-como-reduzir-custos-com-materia-prima-e-superar-a-crise/>>. Acesso em: 9 de out. de 2023.

FURINI, L. A. **Desempenho operacional de hastes e ponteiros na descompactação de solo.** 2018. 101 f. Dissertação (Mestrado em Projeto e Processos de Fabricação) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2018.

KIMINAMI, C. S. **Introdução aos processos de fabricação de produtos metálicos.** Editora Blucher 2019 237 p ISBN 9788521206835.

KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; BERTON, A.L. **Compactação e descompactação de solos.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 20p. (Embrapa Trigo. Documentos, 19).

MORISHITA, G. S. D. L. **Otimização Topológica de Mecanismo de Quatro Barras.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2015.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada.** Porto Alegre: Bookman, 2013.

PICCIN. **Subsolador SPCD.** Disponível em: <<https://piccin.com.br/equipamento/24/spcd>> Acesso em: 25 de set. 2023.

PINTO, L. M. **Projeto de um componente articulador para o sistema de barras de um pulverizador autopropelido.** Trabalho Final de Graduação (Engenheiro Mecânico). Curso de Engenharia Mecânica. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2021. 43 f.

SICAL. **Ligas.** Disponível em: <<https://www.sical.com.br/wp-content/pdf/ligas.pdf> > Acesso em: 08 de dez. 2023.

VITORINO, A. **Otimização Topológica de Estruturas Tridimensionais.** Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2019.

ZANELLA, L. C. H. **Metodologia de pesquisa**. 2. ed. rev. atual. – Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração/UFSC, 2011.