



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

WAGNER LYU MIYADA

**Otimização topológica do suporte traseiro do feixe de molas fundido e proposição de um
modelo estampado**

Guaratinguetá - SP
2023

Wagner Lyu Miyada

Otimização topológica do suporte traseiro do feixe de molas fundido e proposição de um modelo estampado

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho

Coorientador: Me. Raphael Barbosa C. de Lima

Guaratinguetá – SP
2023

M685o	Miyada, Wagner Lyu Otimização topológica do suporte traseiro do feixe de molas fundido e proposição de um modelo estampado / Wagner Lyu Miyada – Guaratinguetá, 2023. 48 f : il. Bibliografia: f. 46-48 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho Coorientador: Me. Raphael Barbosa C. de Lima 1. Otimização estrutural. 2. Análise de elementos finitos. 3. Estampagem (Metais). 4. Fundição. I. Título. CDU 621.98.043
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

WAGNER LYU MIYADA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO(A) EM ENGENHARIA MECÂNICA"

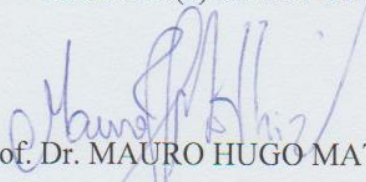
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA
Coordenador

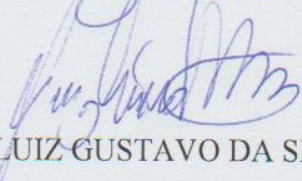
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. ÂNGELO CAPORALLI FILHO
Orientador(a)/UNESP-FEG



Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
UNESP-FEG



Eng. LUIZ GUSTAVO DA SILVA BRAZ
Membro Externo (IOCHPE MAXION S.A.)

Janeiro/2023

Dedico este trabalho
de modo especial, à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais *Gilberto e Marcia*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos. Me apoiaram e deram suporte todos os dias, além de serem grande fonte de inspiração para mim. Ao meu irmão, que apesar das divergências, sempre me ajudou e segurou as pontas em casa.

Ao meu orientador desde minha entrada na Equipe Piratas do Vale BAJA, *Prof. Dr. Ângelo Caporalli Filho* e ao meu coorientador, *Me. Raphael Barbosa C. de Lima* pela orientação, dedicação e auxílio no estudo aqui apresentado. Um agradecimento à orientação, apoio e suporte do meu supervisor de estágio *Eng. Luiz Gustavo da Silva Braz* nas simulações realizadas.

Agradecimento especial à República O.NU que me acolheu e me permitiu ter experiências inestimáveis e inesquecíveis. Dos moradores que me receberam aos que foram se juntando e fazendo parte dessa família aos longos desses anos, muito obrigado meus amigos, nada disso seria tão especial sem vocês.

Fica meus agradecimentos também às professoras e aos professores pelos ensinamentos e capacitação dentro e fora da sala de aula e aos funcionários da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Schopenhauer, Arthur

RESUMO

A Otimização Estrutural Topológica é um método que busca uma geometria otimizada pela melhor distribuição de material dentro de um espaço definido. Esta monografia busca seguir um método para substituição de um suporte fundido da suspensão de feixe de molas por um componente estampado, sugerindo uma geometria otimizada através da Otimização Topológica realizada no software *Altair Inspire* que atenda aos requisitos da aplicação. Após a definição da peça estampada mantendo suas propriedades físicas, mecânicas e estruturais, foram realizadas simulações dos componentes utilizando Método dos Elementos Finitos para efeito comparativo e de validação da substituição do componente.

PALAVRAS-CHAVE: Otimização Estrutural; Otimização Topológica; Método dos Elementos Finitos; Estampagem; Fundição.

ABSTRACT

Topological Structural Optimization is a method that looks for an optimized geometry by the best material distribution within a defined space. This monograph seeks to follow a method for replacing a cast support of a leaf spring suspension by a stamped component, suggesting an optimized geometry through Topological Optimization developed in the software Altair Inspire that meets the requirements of the application. After the definition of the stamped part preserving its physical, mechanical, and structural properties, simulations of the components were performed using the Finite Element Method for comparison and validation of the replaced component.

KEYWORDS: Structural Optimization; Topology Optimization; Finite Element Method; Stamping; Casting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de fundidos (composição de liga).	17
Figura 2 – Classificação dos principais processos de fundição.	20
Figura 3 – Representação esquemática da sequência de operações na fundição em areia.	21
Figura 4 – Representação esquemática das operações básicas de estampagem.	23
Figura 5 – Operações de corte.	23
Figura 6 – Operações de deformação.	24
Figura 7 – Malha de elementos finitos.	26
Figura 8 – Três categorias de otimização estrutural.	28
Figura 9 – Problema generalizado de design de forma para encontrar a distribuição ideal de material em um domínio bidimensional	30
Figura 10 – Caminhão Constellation 26.260.	33
Figura 11 – Feixe de molas traseiro.	34
Figura 12 – Suporte no software <i>Siemens NX</i>	35
Figura 13 – Fluxograma de projeto.	36
Figura 14 – Carregamentos e restrições aplicadas.	37
Figura 15 – Deslocamento máximo (Fundido).	37
Figura 16 – Tensão principal máxima (Fundido).	38
Figura 17 – Domínio de design e não-design.	39
Figura 18 – Modelo otimizado orgânico.	39
Figura 19 – Modelo otimizado viável.	40
Figura 20 – Deslocamento máximo (Estampado).	42
Figura 21 – Tensão principal máxima (Estampado).	42
Figura 22 – Tensão principal máxima acima do limite de resistência à tração (Fundido).	43
Figura 23 – Tensão principal máxima acima do limite de resistência à tração (Estampado)...	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Investimento das empresas.	13
Tabela 2 – Síntese da Produção Siderúrgica Brasileira. (Unidade: 10 ³ t.)	14
Tabela 3 – Projeção da composição típica de um carro (em %).	14
Tabela 4 – Comparação de alguns processos de fundição.....	20
Tabela 5 – Pesos (kg).	33
Tabela 6 – Componentes estampados.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abipeças	Associação Brasileira da Indústria de Autopeças
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CAD	<i>Computer Aided Engineering</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
PD&I	Pesquisa, desenvolvimento e Inovação
PLM	<i>Product Lifecycle Management</i>
SIMP	<i>Solid Material Isotropic with Penalization</i>
Sindipeças	Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω^{mat}	Domínio design com presença de material
E_{ijkl}	Tensor de rigidez
E_{ijkl}^0	Tensor de rigidez de um material isotrópico
ϕ_j	Função de forma
p	Índice de penalização
V	Volume
Π	Funcional
Ω	Domínio design de referência
ρ	Densidade
v	Função aproximadora

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVO.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVO ESPECÍFICO	16
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO.....	17
3.1.1	Fundição	17
3.1.1.1	Fundamentos da fundição	17
3.1.1.2	Principais processos de fundição	19
3.1.2	Estampagem	22
3.1.2.1	Operações básicas de estampagem	23
3.1.3.1	Critérios de estampabilidade de chapas metálicas.....	24
3.2	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	25
3.2.1	Otimização Estrutural.....	28
3.2.1.1	Formulação geral	29
3.2.2	Homogeneização	30
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	MODELO UTILIZADO.....	34
4.2	SOFTWARES UTILIZADOS.....	34
4.3	METODOLOGIA DE CONVERSÃO	36
4.3.1	Modelo fundido (CAD).....	36
4.3.2	Análise estática e de fadiga	37
4.3.3	Otimização topológica	38
4.3.4	Geometria pós-otimização.....	40
4.3.5	Análise do modelo otimizado	42
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1	VALIDAÇÃO: FUNDIDO x ESTAMPADO	43
6.	CONCLUSÕES.....	45
	REFERÊNCIAS	46

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, na indústria automotiva, a busca por processos de fabricação de componentes mais eficientes e de menor custo traz grande impacto em um mercado de forte concorrência. Em um contexto global de crescente exigência de qualidade e inovação, desenvolvimento tecnológico e busca constante por sistemas confiáveis mais leves e com custos menores são as principais preocupações no projeto de componentes.

A inovação dos produtos pode trazer grandes benefícios para a empresa diferenciando-a no mercado e trazendo novos produtos para o portfólio, sendo chave para diversificação, maiores vendas e entrada em novos mercados.

Segundo dados (**Tabela 1**) do Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças) e da Associação Brasileira da Indústria de Autopeças (Abipeças) o investimento das empresas em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) de produtos e processos vem aumentando significativamente em relação aos últimos anos.

Tabela 1 – Investimento das empresas.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020 ^p
Total de investimento ¹ (US\$ milhões)	570,0	450,0	545,7	354,9	827,4	568,6
Investimento em máquinas e equipamentos ²	-	-	61,5%	61,8%	57,7%	55,9%
Investimento em outros tipos de ativo fixo ³	-	-	23,7%	25,2%	15,3%	16,5%
Investimento em PD&I ⁴	-	-	4,1%	4,2%	23,9%	26,6%
Outros investimentos ⁵	-	-	10,7%	8,8%	3,1%	1,0%

(p): Previsão.

Notas:

1. Soma de todos os investimentos realizados, cuja base de informação é a Pesquisa Econômico-Financeira do Sindipeças. As informações de 2017 foram revisadas.
2. Refere-se à aquisição de ativo fixo, exclusivamente voltado para máquinas e equipamentos.
3. Investimentos em outros tipos de ativo fixo que não são contemplados pelo item acima mencionado.
4. Contempla os dispêndios realizados em pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) de produtos e processos.
5. Qualquer outro gasto em investimento não considerado anteriormente.

Fonte: Sindipeças & Abipeças (2021).

Aço bruto é o material fundamental para peças fundidas. Peças estampadas provem de chapas laminadas. Como mostrado na **Tabela 2**, segundo Instituto Aço Brasil, cerca de 61,43% da produção siderúrgica nacional de 2021 foram destinados a serem empregados nos processos de fundição e estampagem, 35,68% e 25,75% respectivamente.

Tabela 2 – Síntese da Produção Siderúrgica Brasileira. (Unidade: 10³t.)

Produção	2017	2018	2019	2020	2021
Aço Bruto	34778	35407	32569	31415	36174
Laminados	22690	23696	22488	21807	26111
Planos	13687	14257	13246	12355	15358
Longos	9003	9349	9242	9452	10753
Semiacabados p/ Vendas	11639	11971	10900	9101	10575
Placas	10016	10454	9583	8551	9884
Lingotes, Blocos e Tarugos	1623	1517	1317	550	691
Ferro-Gusa	28572	28655	26280	24628	28530

Nota: Inclui a produção para vendas dentro do parque.

Fonte: INSTITUTO AÇO BRASIL (2022).

De acordo com a projeção de BARROS (2015), há uma tendência vertiginosa na substituição de materiais utilizados na composição típica de um veículo. Devido a busca na redução de peso dos veículos que podem levar a uma redução consumo de combustível, ferro e aço tradicional estão sendo substituídos por aços de alta resistência, ligas de magnésio, ligas de alumínio e por polímeros/compósitos, como evidenciado na **Tabela 3**. Cada vez mais a indústria automotiva enfatiza no aumento da eficiência do veículo com a redução de peso dos componentes, sem comprometer a qualidade.

Tabela 3 – Projeção da composição típica de um carro (em %)

	1977	2010	2035
Aço convencional	75	65	20
Aço alta/média resistência	4	10	20
Polímero/compósito	4	7	20
Alumínio	2	7	15
Magnésio	0	1	15
Outros	15	10	10

Fonte: BARROS (2015).

Com o aumento da capacidade computacional, a análise por Elementos Finitos tem se tornado de extrema importância para a pesquisa e o desenvolvimento de produtos cada vez mais competitivos. A utilização de métodos numéricos durante a avaliação, desenvolvimento e obtenção de uma concepção de projeto auxiliam no aumento da confiabilidade estrutural, minimização do tempo de desenvolvimento e redução nos custos de desenvolvimento e execução de protótipos.

Desenvolver novos produtos é essencial em um contexto de mercado cada vez mais acirrado e competitivo. A utilização de softwares voltados para simulação auxilia na melhoria da produtividade de desenvolvimento e aceleram a exploração de novos designs para os componentes.

A suspensão cumpre um papel importante na engenharia automotiva, tendo como principais funções proporcionar dirigibilidade, estabilidade em curvas e manobras, absorver impactos e proporcionar conforto durante a condução do veículo. Em veículos de grande porte, como caminhões e ônibus, costuma-se utilizar suspensões mais robustas e resistentes para suportar o peso de cargas elevadas e absorver os impactos das irregularidades durante o percurso.

A suspensão do tipo feixe de molas é um sistema por meio do qual os feixes, formados por barras (chamadas de barras ou folhas) sobrepostas, trabalham como elemento elástico da suspensão. Mais utilizadas em veículos de carga, já que são mais resistentes ao peso, distribuem a carga uniformemente sobre o chassi melhorando o conforto na absorção do impacto. Além disso são de fácil manutenção e versáteis no ajuste para atender necessidades específicas de carga, velocidade e condições da estrada.

O suporte, fixado diretamente ao chassi, é o principal componente utilizado para sustentar a carga. Para veículos de médio porte, como caminhonetes, os suportes em sua maioria são estampados. Porém, grande parte dos suportes em caminhões e ônibus, ainda são fabricados por processo de fundição.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Seguir uma metodologia de projetos para conversão do suporte traseiro de feixe de molas fundidos, através da Otimização Estrutural Topológica, para um componente estampado comprovando a possibilidade através de simulações computacionais utilizando o Método dos Elementos Finitos.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Analisar o comportamento da geometria proposta estampada em relação à rigidez, resistência e, principalmente, massa.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

3.1.1 Fundição

O processo de fundição é amplamente utilizado na indústria automotiva devido a sua versatilidade na fabricação de peças, pois são mínimas as limitações de complexidade e formato das peças que podem ser produzidas em tempo reduzido, de baixo custo e sem excesso de desperdício de material comparados a outros processos de produção.

Peças em seu estado final ou semiprontas são obtidas através do despejo do metal líquido (matéria-prima fundida) no molde em que se solidifica com formato desejado.

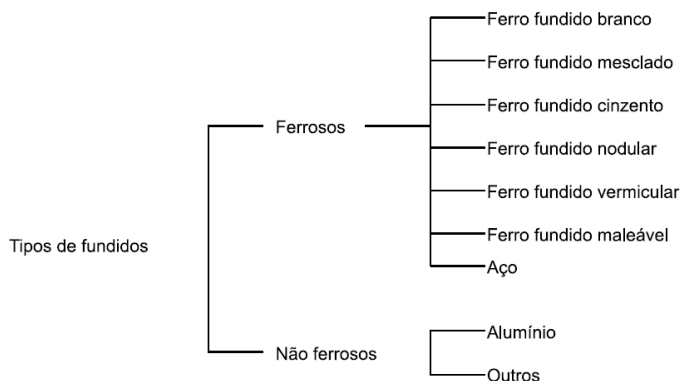
Para CHIAVERINI (1986), as etapas que devem ser consideradas, independente do processo de fundição adotado, são: desenho da peça, projeto do modelo, confecção do modelo (modelagem), confecção do molde (moldagem), fusão do metal, vazamento no molde, limpeza e rebarbação e controle de qualidade.

Dois fatores são chave para a qualidade final da peça e afetam diretamente as propriedades mecânicas da peça final, são eles a composição da liga do fundido e o processo de fundição utilizado.

3.1.1.1 Fundamentos da fundição

Segundo CASOTTI (2011), os fundidos podem ser classificados como ferrosos ou não ferrosos.

Figura 1 – Tipos de fundidos (composição de liga).



Fonte: CASOTTI (2011)

Ainda de acordo com CASOTTI (2011), dependendo de sua composição, os fundidos ferrosos podem ser classificados como brancos, mesclados, cinzentos, nodulares, vermiculares, maleáveis e aços.

O carbono é o elemento no qual se deve ter controle dentre os ferrosos. O aço contém teores de carbono inferiores a 2%, enquanto os ferros fundidos apresentam teores superiores a 2%. A microestrutura é o que define as propriedades mecânicas dos ferros fundidos. A principal, cementita, apresenta alta resistência mecânica, elevada dureza e baixa tenacidade tornando o metal duro, porém quebradiço.

O detalhamento da influência da adição de alguns elementos na composição de liga pode ser encontrado resumidamente em CASOTTI (2011).

Os processos de fundição partem dos mesmos fundamentos, descritos a seguir, que diferem para cada composição de liga.

Fusão

Etapa crucial do processo em que o metal a ser utilizado na fabricação é derretido e transformado em um líquido homogêneo. Existem vários métodos para fundir o material, como aquecimento elétrico, a gás ou a combustão, geralmente realizada em um forno específico para o tipo de metal.

Esta fase é diretamente relacionada à qualidade final da peça, pois sua composição química deve ser processada rigorosamente para garantir as propriedades e microestruturas desejadas na peça fundida, sendo de extrema importância a remoção/ redução dos gases dissolvido e a temperatura do forno deve ser controlada para garantir que o material seja completamente derretido.

Vazamento

Após a fusão, o metal líquido é transferido do forno para o molde. Nessa fase é necessário o controle da temperatura do metal a ser vazado, velocidade do vazamento e a turbulência do metal líquido. Essas variáveis afetam diretamente no preenchimento do molde, trazendo problemas para a qualidade da geometria final da peça.

A temperatura do metal fundido deve ser bem especificada, pois com temperatura baixa o metal se solidifica antes que possa ocorrer preenchimento completo do molde. Problemas e desvantagens como: aumento de salubridade dos gases, gerando bolhas e porosidade; aumento

da reação com o molde; possibilidade de aumento de fluxo turbulento durante o processo de preenchimento podendo aprisionar ar dentro do metal e do molde e aumento do consumo de energia na produção são causados devido a temperatura excessivamente alta, segundo EVANGELISTA (2020). Ainda segundo eles, uma velocidade alta pode provocar aumento da turbulência, erosão do molde e desgaste gradual da superfície do molde

Solidificação

Etapa onde o metal é resfriado e se solidifica no molde. O processo de transformação do metal líquido para o estado sólido novamente é diferente se o material for um elemento puro ou uma liga. A velocidade de resfriamento interfere diretamente na formação de microestruturas específicas para cada aplicação dependendo da propriedade mecânica desejada do fundido.

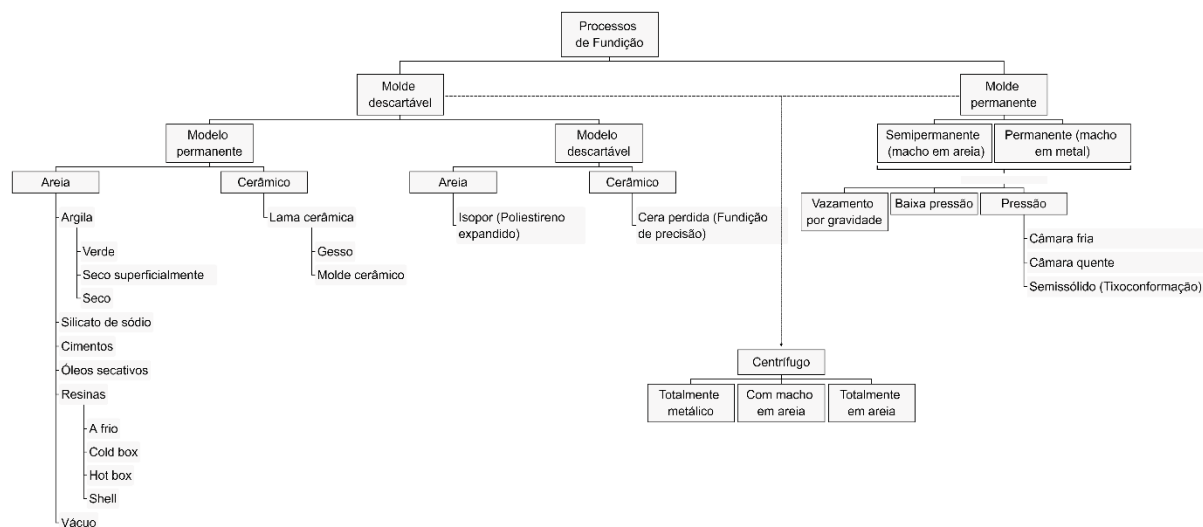
A maioria das propriedades mecânicas e estruturais da peça são desenvolvidas nessa fase. É importante garantir que a taxa de resfriamento, a composição química e a microestrutura estejam dentro dos limites desejados. Alguns fenômenos que ocorrem durante a solidificação do metal líquido são: a cristalização, a contração de volume, a concentração de impurezas e o desprendimento de gases. Caso não seja controlado de forma adequada, esses fenômenos podem gerar o aparecimento de heterogeneidades prejudicando a qualidade da peça.

3.1.1.2 Principais processos de fundição

A fundição tem variados processos e etapas que dependem da geometria da peça, tipo de liga a ser fundida, número de peças a ser produzida e qualidade superficial desejada. De acordo com CHIAVERINI (1986), a principal etapa que diferencia os diversos processos de fundição entre si é a confecção do molde (Figura 2).

Na tabela 4 fica evidenciado uma comparação com alguns parâmetros entre os principais processos de fundição.

Figura 2 – Classificação dos principais processos de fundição.



Fonte: Adaptado de BALDAM (2014)

Tabela 4 – Comparação de alguns processos de fundição

Fator	Fundição em areia	Fundição em molde permanente	Fundição sob pressão	Fundição centrífuga
Metal processado	Todos	Ferros fundidos e não-ferrosos	Não-ferrosos de baixo ponto de fusão	Todos
Dimensões comerciais min. – máx.	As maiores	0,5kg a cerca de 150kg	Diminutas a 35kg em Al, a 150kg em Zn	Acima de 25t
Espessura min. – máx.	3,2 – 4,7	3,2	0,8 – 1,6	1,6
Resistência à tração* kgf/mm ²	13	16	19,5	17,5
Ordem de produção** (Peças por hora)	10 - 15	40 - 60	120 - 150	30 – 50
Custo do molde ou modelo***	100	660	1650	500

*Para uma liga de alumínio, por exemplo.

**Produção estimada para uma peça fundida de alumínio de cerca de 1,5 kg de peso e moderada complexidade.

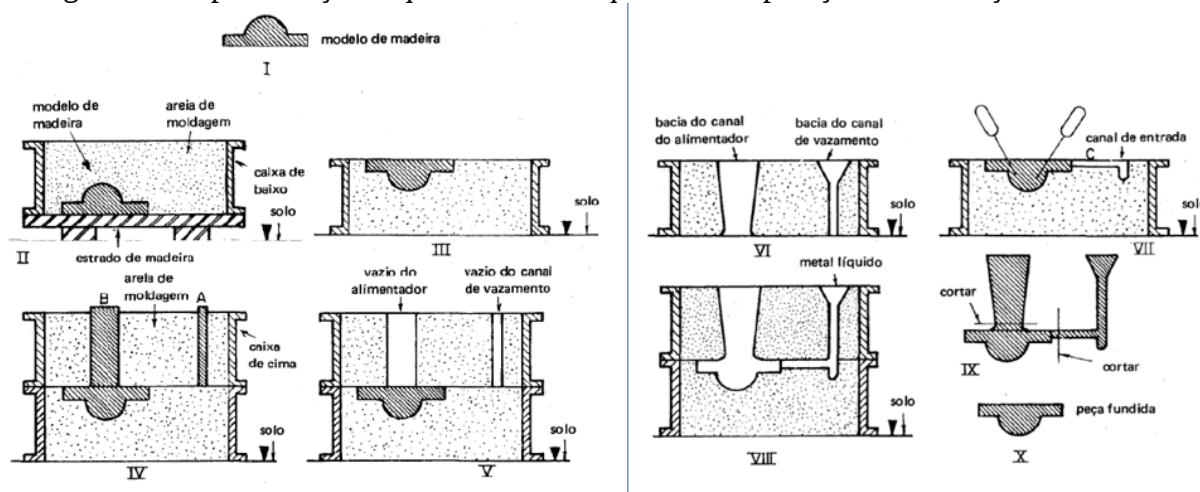
***Tomando como base 100 para fundição em areia.

Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (1986).

Fundição em molde de areia ou temporário, por gravidade

Processo mais simples da fundição. Uma mistura refratária (areia de fundição) é compactada para formar os moldes onde o metal fundido será vazado para formação da peça. Observa-se na Figura 3 a sequência de operações na fundição em areia verde.

Figura 3 – Representação esquemática da sequência de operações na fundição em areia.



Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (1986).

Além da facilidade de produção dos moldes, comparado aos outros processos, existe a possibilidade de produção de peças complexas com baixo custo e a reutilização da areia do molde. Entretanto há dificuldade de se produzir peças precisas e a necessidade de reparo e limpeza dos moldes após cada uso.

Fundição em molde metálico ou permanente

Moldes são confeccionados de aço ou ferro fundido. Um melhor acabamento superficial, maior uniformidade na superfície, tolerâncias dimensionais mais estreitas e melhores propriedades mecânicas são atingidas comparadas as peças produzidas em moldes de areia. Devido ao alto custo do molde, o processo é recomendado para produção de peças em série com dimensões relativamente pequenas. Formas muito complicadas aumentam o custo e complexidade de confecção do molde, além de dificultar a retirada da peça do interior.

- Por gravidade

O metal líquido é vazado dentro do molde utilizando a ação da gravidade. O molde, feito em duas ou mais partes, é alinhado formando uma cavidade correspondente ao formato da peça que se deseja. Após a solidificação, o molde é aberto e a peça retirada.

- Sob pressão

O metal líquido é bombeado dentro da cavidade do molde (matriz) por pressão. O molde é constituído, geralmente, em duas partes hermeticamente fechadas. De acordo com CHIAVERINI (1986), o processo sob pressão possibilita a fabricação de peças com formas mais complexas e com paredes mais finas que os processos por gravidade.

Fundição de precisão

Conhecido também como fundição por cera perdida, o modelo da peça é feito em cera e recoberta por um material refratário. Uma casca é formada com as cavidades correspondendo à peça, constituindo o molde. O modelo de cera é descartado por derretimento e o metal líquido vazado no interior da casca. Após solidificação, o molde é quebrado e a peça é retirada.

Fundição centrífuga

O metal líquido é vazado no interior de um molde rotativo. A força centrífuga gerada força o metal para as paredes do molde, ajudando a eliminar porosidades. Uma das aplicações mais comuns é a fabricação de tubos. Entretanto, o processo é mais complexo e caro em relação a outros processos de fundição devido ao equipamento mais caro e que requer maior manutenção.

Fundição contínua ou lingotamento contínuo

O processo gera barras longas de seção transversais regular, cilíndricas ou prismáticas para posteriormente serem processadas. O metal líquido é escoado na matriz e resfriada até começo da solidificação. A barra formada é arrastada ainda quente, com a mesma velocidade de resfriamento do material, enquanto termina a solidificação.

3.1.2 Estampagem

O processo de estampagem é um processo no qual uma chapa metálica plana é submetida a conformação mecânica controlada, podendo ser executadas em um conjunto de operações sucessivas, para obtenção de peças com uma nova forma geométrica.

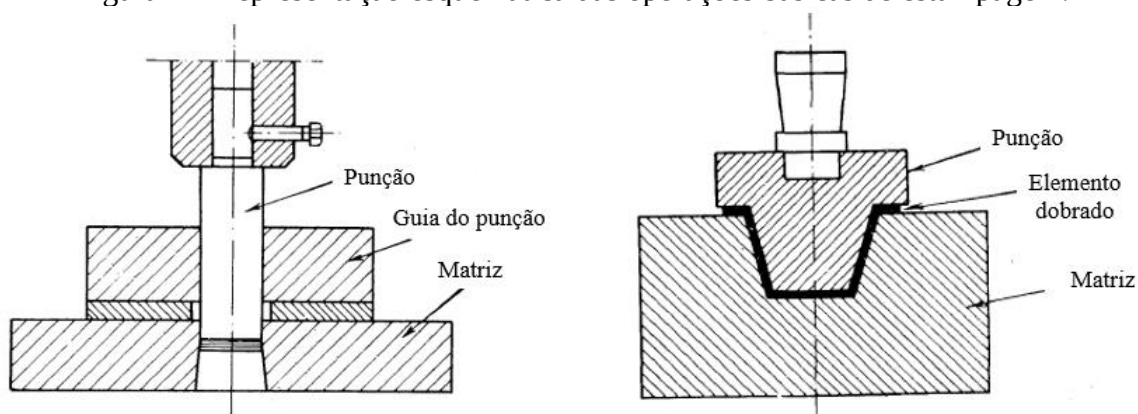
Os esforços das operações são executados por meio de prensas de estampagens com auxílio de ferramentas, onde são montadas matrizes e punções responsáveis pelo formato desejado. As prensas de estampagem podem ser mecânicas, onde um volante fornece energia

aplicada em manivelas e engrenagens, ou hidráulicas, em que a energia provém da pressão hidrostática aplicado em pistões.

3.1.2.1 Operações básicas de estampagem

Dentre os principais processos no qual a chapa metálica pode sofrer transformação estão o corte e a deformação. A Figura 4 indica uma representação esquemática de uma matriz de corte (à esquerda) e de uma matriz simples de dobramento (à direita).

Figura 4 – Representação esquemática das operações básicas de estampagem.

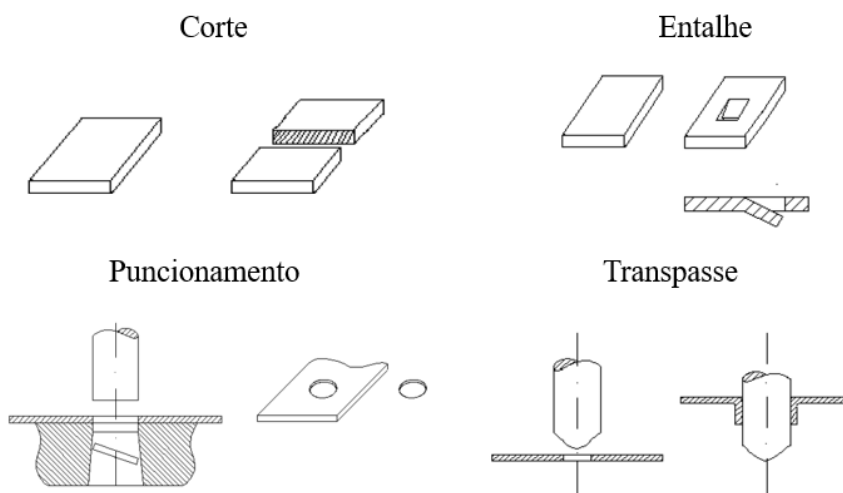


Fonte: Adaptado de CHIAVERINI (1986).

Corte

Caracteriza-se pelo rompimento por cisalhamento da chapa.

Figura 5 – Operações de corte.



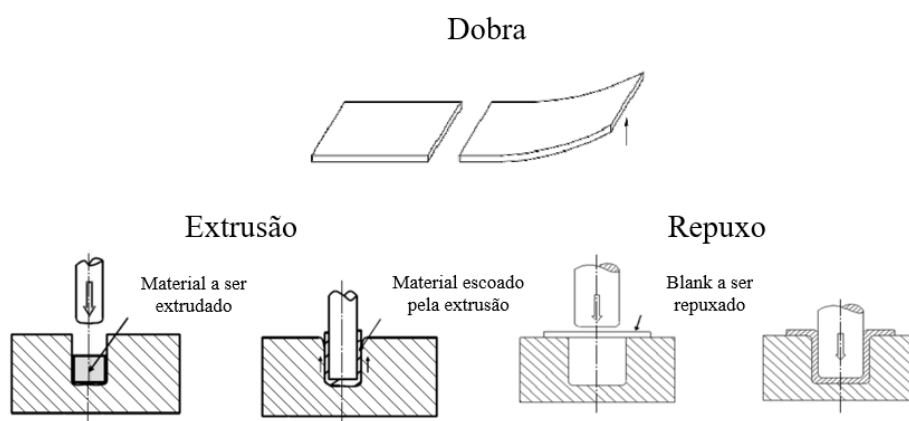
Fonte: Adaptado de BENAZZI JUNIOR (2010).

- Corte – Separação completa do material.
- Entalhe – Corte sem separação total da chapa.
- Puncionamento – Obtenção de figuras geométricas.
- Recorte – Operação de corte realizada pela segunda vez.
- Transpasse – Corte associado à operação de deformação (enrijecimento da chapa).

Deformação

A chapa sofre deformação plástica, onde se deforma permanentemente.

Figura 6 – Operações de deformação.



Fonte: Adaptado de BENAZZI JUNIOR (2010).

- Dobramento – Dobra da chapa com mudança/ criação de outro plano por um ângulo.
- Repuxo – Obtenção de peças ocas.
- Extrusão – Conformação do material, forçado a reduzir sua seção transversal sob alta pressão na matriz pela punção.
- Cunhagem – Perfil gravado em alto ou baixo relevo pelo amassamento do material.

3.1.3.1 Critérios de estampabilidade de chapas metálicas

O conhecimento de algumas propriedades das chapas metálicas é de extrema importância para o projetista de peças estampadas para que ocorra um desenvolvimento e fabricação de um produto com mínimo possível de defeitos e de forma otimizada. Descrito por BUENO (2016),

para caracterização da estampabilidade das chapas metálicas são utilizados os seguintes critérios:

- Teste de tração: dão origem à curva tensão versus deformação, indicando as propriedades mecânicas (tensão de escoamento, máxima e de ruptura, módulo de elasticidade, ductilidade etc.).
- Curva de escoamento: concede informação sobre o modo de encruamento de um material.
- Índice de anisotropia: relação entre a diferença das propriedades mecânicas da chapa na direção de estampagem e na direção transversal, é uma medida da heterogeneidade ou da direcionalidade das propriedades mecânicas na chapa.
- Curvas de limite de conformação: representação gráfica que demonstram os limites máximos de deformações nas três direções principais durante o processo de conformação.

3.2 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma poderosa ferramenta para resoluções de uma ampla classe de problemas físicos. O MEF busca a resolução aproximada, de precisão aceitável, de problemas complexos por meio de métodos numéricos, é um método aproximado de cálculos de sistemas contínuos. Um sistema contínuo é a idealização da estrutura para o modelo de cálculo, subdividido em componentes individuais (elementos) para que se possa compreender o comportamento do todo partindo da compreensão de cada elemento.

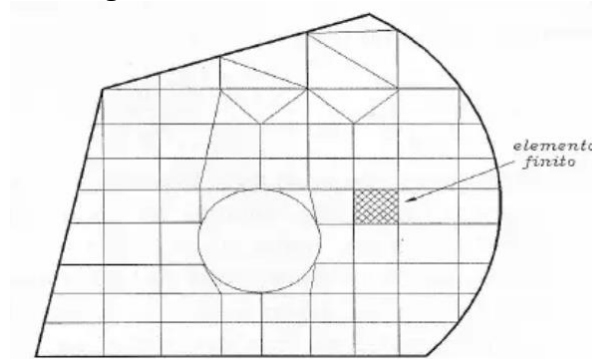
A definição do modelo parte do entendimento da natureza física do fenômeno que se propõe a resolução a partir da identificação de pontos relevantes para que se possa tecer hipóteses sobre seu comportamento.

Para ALVES FILHO (1952), os softwares de Elementos Finitos oferecem diversos elementos, cada qual representando um comportamento físico diferente conhecido da Mecânica Estrutural (estado plano de tensões, placas, cascas, membranas, sólidos etc.). Comportamento que é descrito por intermédio de funções matemáticas que representam o comportamento interno do elemento.

Uma estrutura ou corpo contínuo, de modo geral, é dividida em um número finito de partes. Cada parte discreta deve representar o que ocorre na estrutura real. Essas partes são

conectadas entre si por meio de pontos discretos, chamados de Nós e a montagem dessas partes constitui a malha de elementos finitos, representando o modelo matemático.

Figura 7 – Malha de elementos finitos.



Fonte: ASSAN (2003)

O número de pontos discretos deve ser suficiente para que o comportamento de seus parâmetros represente uma solução aproximada mais perto do real. Quanto mais discretizado, ou seja, quanto maior a divisão em partes menores, maior será a precisão do modelo matemático. Porém, quanto mais subdividido mais complexo e trabalhoso ficam os cálculos para obtenção da solução. Um número finito de elementos terá seu comportamento especificado por um número finito de parâmetros.

Para ASSAN (2003) o MEF, de forma geral, pode ser descrito através de funções admissíveis definidas para cada elemento finito que satisfaçam as condições de contorno e que representem de maneira aproximada todo o domínio. Para cada elemento finito i é definido um funcional (entidade que depende de uma função, ou seja, função de uma função) Π_i que, somado aos dos demais elementos finitos, formam o funcional para o todo o domínio.

$$\Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i \quad (1)$$

A função aproximadora v é formada pelos parâmetros nodais a_j e por funções denominadas funções de forma ϕ_j .

$$v = \sum_{j=1}^m a_j \phi_j \quad (2)$$

O funcional Π fica expresso por:

$$\Pi(a_j) = \sum_{i=1}^n \Pi_i(a_j) \quad (3)$$

Um sistema de equações algébricas lineares é gerado na condição de estacionaridade:

$$\delta\Pi(a_j) = \sum_{i=1}^n \Pi_i(a_j) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \frac{\delta\Pi(a_j)}{\delta a_j} = 0 \quad (4)$$

Solucionando o sistema de equações, encontra-se os valores dos parâmetros nodais a_j que podem ser deslocamentos, forças internas ou ambos dependendo da formulação.

Os métodos de cálculos aproximados mais conhecidos e que originaram o MEF são os métodos de Rayleigh-Ritz (variacional) e o de Galerkin (resíduos ponderados). Em ASSAN (2003) encontra-se detalhes das deduções dos métodos.

O roteiro a seguir sugerido por ALVES FILHO (1952), indica as principais tarefas consideradas no planejamento de um trabalho de Análise Estrutural:

- Identificação e definição do problema estrutural analisado, estabelecendo os objetivos da Análise.
- Determinar a parte da estrutura a ser modelada.
- Definir as cargas e suas respectivas direções, além dos pontos de vinculação da Estrutura.
- Avaliar comportamentos esperados que devam ser representados pelo modelo na obtenção dos resultados.
- Modelagem da estrutura, definindo tipo de malha de Elementos Finitos a ser utilizada e atribuição das propriedades materiais, estabelecendo equivalência adequada entre o comportamento físico real e o comportamento representado pelos elementos formulados. Criar os dados de entrada no software de elementos finitos.
- Verificar o modelo em Elementos Finitos construído.
- Efetuar a Análise pelo Método dos Elementos Finitos.
- Analisar os resultados obtidos e verificar se correspondem às expectativas de comportamento estabelecidas no início.
- Caso não atenda aos critérios estabelecidos, adaptar o modelo de acordo com as modificações geométricas introduzidas na estrutura e reiniciar a Análise.

De forma simplificada e didática, ALVES FILHO (1952) explica e exemplifica os conceitos fundamentais e procedimentos gerais utilizados para determinar a matriz de rigidez de qualquer elemento finito no Método dos Elementos Finitos, sendo um bom início para o estudo de MEF. ASSAN (2003) também escreveu um trabalho com linguagem simples e

acessível para conhecimento dos princípios e cálculos básicos para os primeiros passos no mundo dos Elementos Finitos. Em ALTAIR ENGINEERING, INC., a (2021) encontram-se aspectos práticos da simulação por elementos finitos.

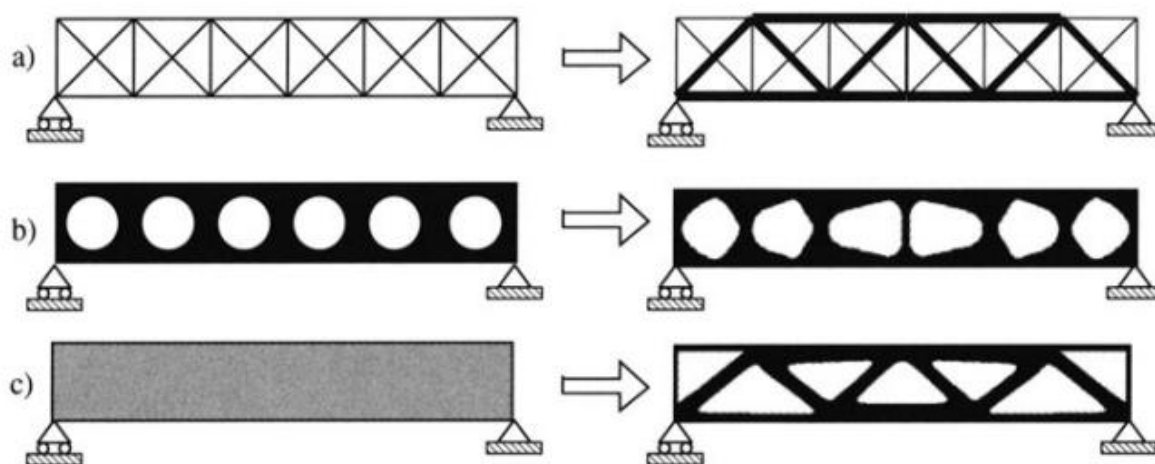
3.2.1 Otimização Estrutural

Do significado da palavra, otimização é o processo de tornar ótimo, é a busca da excelência obtendo-se o melhor valor de uma grandeza. A otimização topológica é um método para design a fim de buscar uma topologia e forma ótima de estruturas.

No campo da engenharia é um processo muito utilizado na busca de design estruturais com uso eficiente de material, combinando cálculos mecânicos, variacionais e programação matemática.

O problema de design estrutural tem três aspectos diferentes. O paramétrico é relacionado as dimensões (características) da geometria, partindo de uma forma já estabelecida. O aspecto de forma é similar ao paramétrico, porém o objetivo é encontrar a forma ótima do domínio permitindo variações no contorno da geometria. E o aspecto topológico envolve a distribuição ótima do material, buscando a determinação do número, localização e forma de “vazios” ao longo do domínio, onde não há necessidade do material.

Figura 8 – Três categorias de otimização estrutural.



- a. Otimização de tamanho/dimensão de uma estrutura de treliças;
- b. Otimização de forma;
- c. Otimização de topologia.

Os problemas iniciais são mostrados no lado esquerdo e as soluções otimizadas são mostrados do lado direito.

Fonte: Adaptado de BENDSOE (2003).

Tamanho, forma e topologia não são representados por funções paramétricas padrões, mas por uma série de funções distribuídas definidas em um espaço de design fixo, de acordo com BENSØE (2003).

3.2.1.1 Formulação geral

A formulação generalizada é definida da seguinte maneira para problemas lineares, onde há uma correspondência entre entradas e respostas, por HAFTKA (1991) e ALTAIR ENGINEERING, INC., b (2021).

Vetor de variáveis de design:

Definição dos parâmetros que descrevem o sistema, independentes entre si.

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (5)$$

- Natureza física: Dimensão, forma, material, topologia;
- Natureza numérica: contínua, discreta, integral, real, binária.

Função objetivo:

Definição do parâmetro que se deseja alcançar.

$$\text{Min/Max } f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (6)$$

- Minimizar: massa, deformação, deslocamento etc.;
- Maximizar: rigidez, tensão etc.

Restrições:

Orientam o procedimento para atendimento dos requisitos físicos e mecânicos, mensurando a viabilidade do problema. Por exemplo: limites de tensões do material; limites do espaço de design como volume do componente, furos de conexões ou áreas de contato; etc.

- **Igualdade**

$$h(x) = h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 ; j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

- **Desigualdade**

$$g(x) = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 ; i = 1, 2, \dots, p \quad (8)$$

HAFTKA (1991) destrincham os elementos da Otimização Estrutural, apresentando inúmeros exemplos para compreensão dos mesmos.

O método de otimização estrutural topológica busca design ótimos da topologia, forma e material para estruturas contínuas e discretas, utilizando a abordagem da homogeneização (homogenization). Está ligada a distribuição de material e como os membros da estrutura são conectados.

3.2.2 Homogeneização

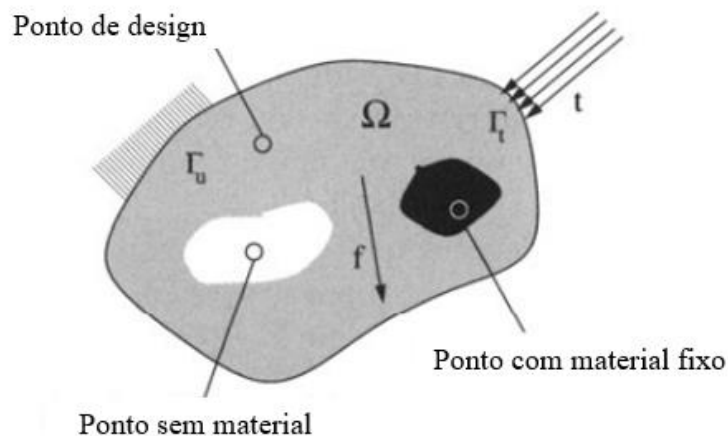
O método de otimização topológica por homogeneização, também chamado de *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP), é um método baseado na busca da melhor distribuição de material em uma estrutura linear elástica dentro de uma região específica, abordagem primeiramente descrita por BENSØE (1988).

Segundo HARZEIM (2005), o método de distribuição de material atribui a densidade em uma região específica de acordo com a solicitação mecânica avaliada em cada elemento de malha. São determinados assim os pontos no espaço que devem ter material (alta densidade) e as áreas vazias, 1 e 0 respectivamente. Para valores intermediários (entre 0 e 1), existe uma penalização de acordo com a restrição de volume considerada.

De acordo com BENSØE (2003), temos a definição para o problema de distribuição de material otimizada a seguir descrita.

Considerando um espaço de design de referência fixo (Ω), escolhido para definição de carregamentos aplicados e condições de contorno, busca-se determinar a melhor configuração (Ω^{mat}) de pontos com material.

Figura 9 – Problema generalizado de design de forma para encontrar a distribuição ideal de material em um domínio bidimensional



Fonte: Adaptado de BENDSOE (2003).

$$E_{ijkl}(x) = 1\Omega^{mat} E_{ijkl}^0, \text{ onde } 1\Omega^{mat} = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in \Omega^{mat} \\ 0, & \text{se } x \in \Omega/\Omega^{mat} \end{cases} \quad (9)$$

$$\int_{\Omega} 1\Omega^{mat} d\Omega = \text{Vol}(\Omega^{mat}) \leq V \quad (10)$$

A inequação expressa o limite, V , de quantidade de material a disposição para que a mínima rigidez de design seja alcançada para um volume limitado fixo.

A função de design é a densidade $\rho(x)$ e E_{ijkl}^0 representa a propriedade de material de um material isotrópico. O índice p penaliza valores intermediários de densidade, considerados desfavoráveis no sentido de a rigidez obtida ser pequena comparado ao custo (volume) do material.

$$E_{ijkl}(x) = \rho(x)^p E_{ijkl}^0, \quad p > 1 \quad (11)$$

$$\int_{\Omega} \rho(x) d\Omega \leq V; \quad 0 \leq \rho(x) \leq 1; \quad x \in \Omega \quad (12)$$

A densidade é interpolada entre 0 e E_{ijkl}^0 .

$$E_{ijkl}(\rho = 0) = 0 \quad (13)$$

$$E_{ijkl}(\rho = 1) = E_{ijkl}^0 \quad (14)$$

Partindo do conhecimento das equações podem ser seguidos os seguintes passos, citados por BENSOE (1988), para se obter a geometria ótima através do método:

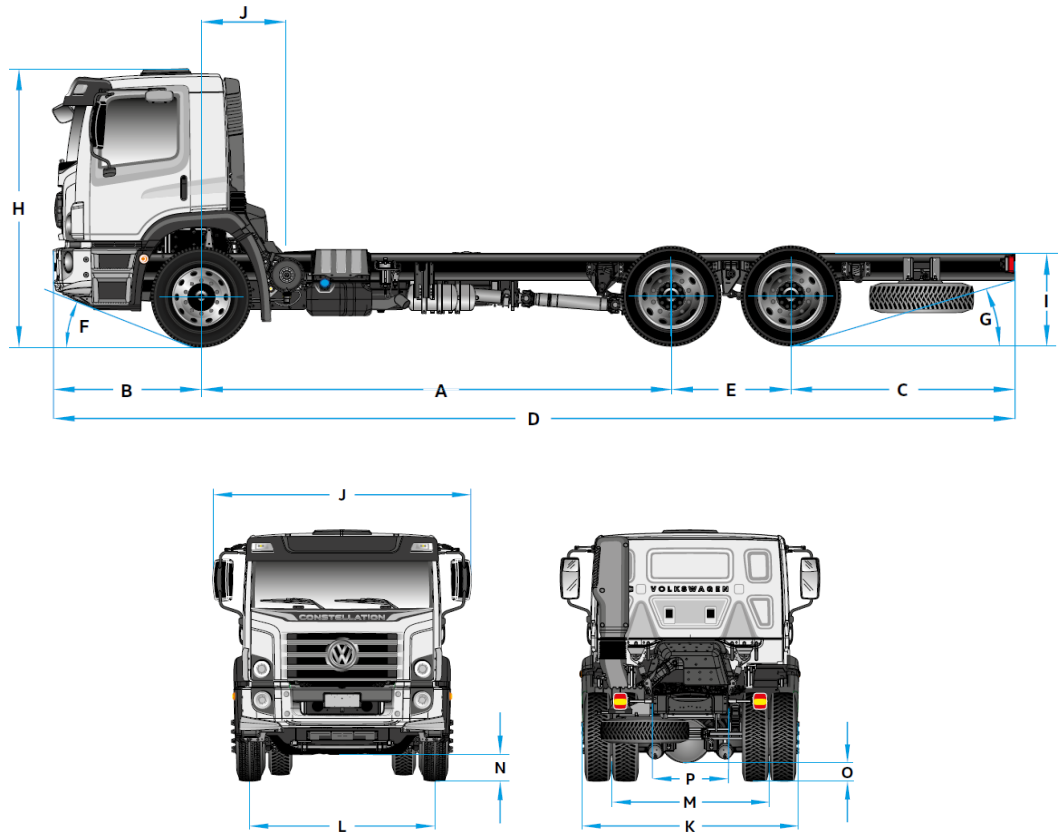
- Escolher um domínio design de referência adequado que permita definir as superfícies de tração, limites fixos, volume da estrutura etc.;
- Determinar cargas aplicadas, possíveis condições de suporte e possíveis restrições adicionais de design (localização e tamanhos de furos ou áreas sólidas, espaços de não-design);
- Escolher um compósito (composto por material e vazio), construído por uma repetição de células unitárias;
- Calcular as propriedades do material compósito, usando a teoria da homogeneização. Trazendo uma relação funcional entre a densidade do material no compósito (tamanho dos furos) e as propriedades efetivas do material;
- Interpretar a distribuição ideal do material como a definição de forma, no sentido da formulação geral de design de forma dada, ou seja, de acordo com os objetivos escolhidos inicialmente (tamanho físico, forma e conectividade da estrutura).

Em BESO (2003), é realizado o detalhamento mais profundo da teoria, métodos e aplicações para Otimização Topológica. Mais detalhes sobre o solver *OptiStruct* podem ser encontrados em ALTAIR ENGINEERING, INC., b (2021).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para parametrização das dimensões, empregou-se o caminhão da Volkswagen Constellation 26.260 (Figura 10) que apresenta chassi tipo escada, longarinas simples, retas de perfil “U” constante, rebitado e parafusado, suspensão traseira eixo rígido motriz e eixo auxiliar, tag-tanden tipo balancin com suspensor eletropneumático para o eixo auxiliar. Molas semielípticas assimétricas trapezoidais. (VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS (2022)).

Figura 10 – Caminhão Constellation 26.260.



Fonte: VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS (2022).

Do modelo referência (Constellation 26.260) temos as ordens de peso (kg) presentes na Tabela 5.

Tabela 5 – Pesos (kg).

Capacidade técnica (Total)	25600
Eixo Dianteiro	6600
Eixo Traseiro	19000

Fonte: VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS (2022).

Como componente da suspensão, o suporte de feixe de molas faz a conexão entre o feixe de molas e o chassi, sendo uma parte que não possui movimento.

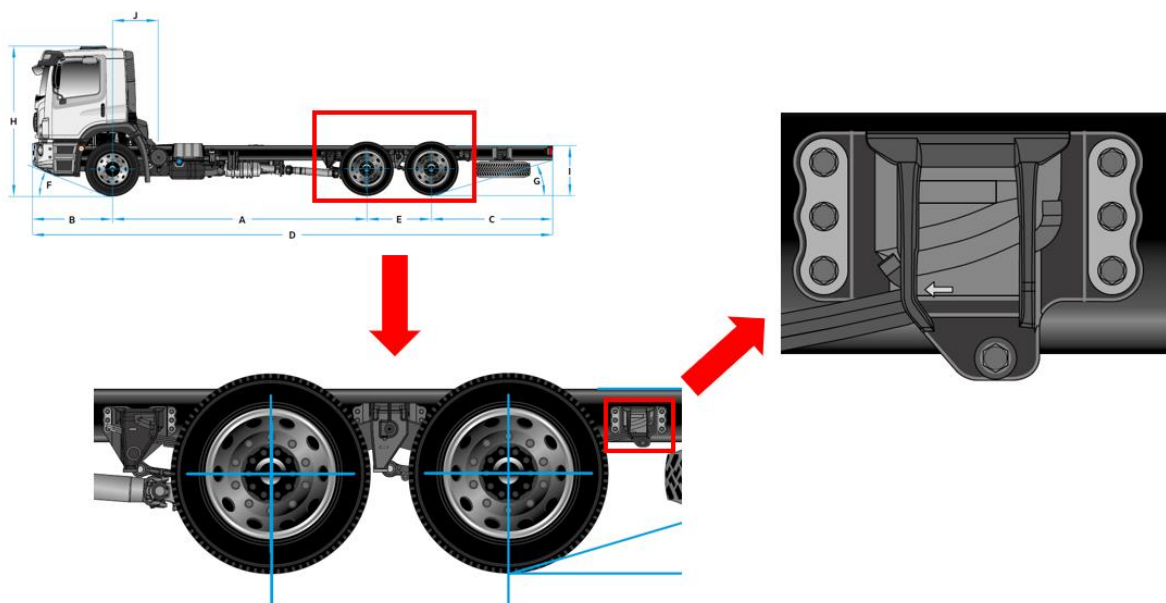
4.1 MODELO UTILIZADO

O modelo de suporte traseiro feixe de molas traseiro produzido de ferro fundido nodular, por fundição em molde de areia, foi utilizado como base de referência para o objeto de estudo.

O material empregado no suporte de feixe de molas foi o ferro fundido nodular FE 42012 (ABNT). Especificações de material, segundo ABNT NBR 6916:

- Limite de escoamento: 270 MPa
- Limite de resistência à tração: 410 MPa

Figura 11 – Feixe de molas traseiro.

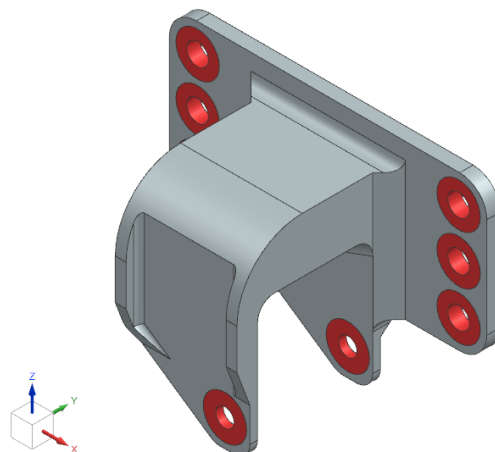


Fonte: Adaptado de VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS (2022).

4.2 SOFTWARES UTILIZADOS

Um modelo similar com as dimensões do real suporte feixe de molas foi reproduzido e modelado em 3D no software *Siemens NX*.

Figura 12 – Suporte no software *Siemens NX*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Visando a otimização estrutural e verificação do modelo foi utilizado o software *Altair Inspire*, que utiliza o solver *OptiStruct*.

Inspire é uma família intuitiva e poderosa de produtos de software que permite uma modelagem orientada pela simulação durante todo o ciclo de vida de desenvolvimento do produto, do conceito à realidade. Quando utilizada no início do processo de design, a tecnologia Inspire permite a criação de designs que se concentram tanto no desempenho como na manufaturabilidade, e habilita os seus utilizadores a explorar, desenvolver e fabricar produtos de alto desempenho num único ambiente de desenvolvimento intuitivo. ALTAIR ENGINEERING, INC., c, 2023, tradução nossa). [1]

O solver calcula uma densidade equivalente para cada elemento, onde 1 é equivalente a 100% do material, enquanto 0 é equivalente a nenhum material no elemento. O solver procura então atribuir aos elementos que tem um baixo valor de tensão, uma densidade equivalente baixa antes de analisar o efeito sobre a estrutura restante. Desta forma, elementos estranhos tendem para uma densidade de 0, com otimizado tendendo para 1. (ALTAIR ENGINEERING, INC., b, 2021, p.28, tradução nossa). [2]

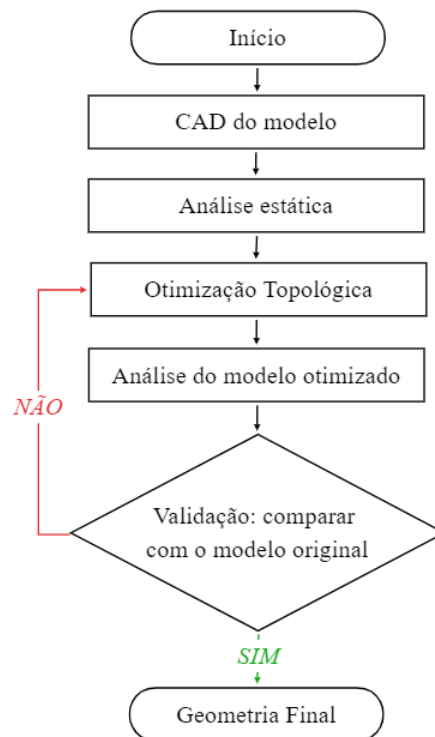
[1] Inspire is an intuitive and powerful family of software products that enables simulation-driven design throughout the entire product development lifecycle, from concept to reality. When used early in the design process, the Inspire technology empowers the creation of designs that are focused on both performance and manufacturability and empowers its users to explore, develop, and manufacture high-performance products in a single intuitive development environment.

[2] The solver calculates an equivalent density for each element, where 1 is equivalent to 100% material, while 0 is equivalent to no material in the element. The solver then seeks to assign elements that have a low stress value a lower equivalent density before analyzing the effect on the remaining structure. In this way extraneous elements tend towards a density of 0, with the optimum design tending towards 1.

4.3 METODOLOGIA DE CONVERSÃO

Seguindo o roteiro proposto por BENSOE (1988) para otimização estrutural em conjunto com os passos descritos por ALVES FILHO (1952), a sequência de atividades pode ser descrita como a seguir (Figura 13).

Figura 13 – Fluxograma de projeto.



Fonte: Adaptado de GUNJAWATE (2020).

4.3.1 Modelo fundido (CAD)

Cálculo de força em cada suporte de feixe de molas, devido ao efeito de carregamento de massa no eixo traseiro:

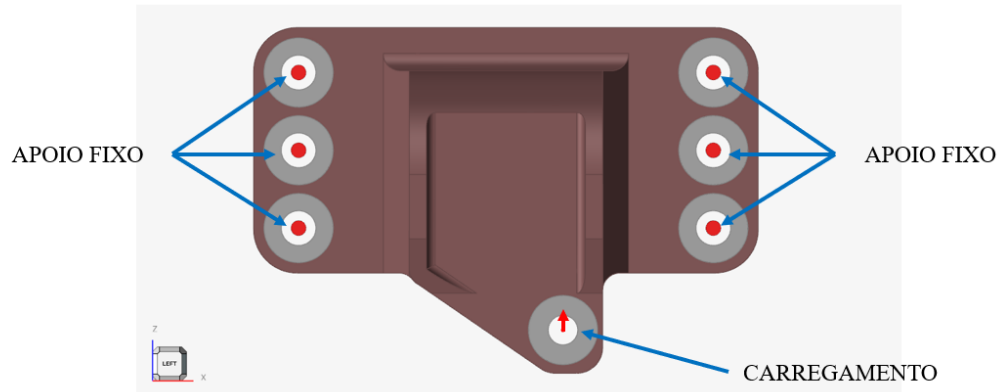
- 6 suportes (3 para as rodas esquerdas e 3 para as rodas direitas);
- Massa suportada em cada suporte do eixo traseiro: $19000/6 \sim 3170$ kg.
- Força em cada suporte: $31097,7$ N $\sim 31,2$ kN.

Devido a sua montagem no caminhão, carregamentos e restrições são aplicados como mostrado na Figura 14 da seguinte maneira:

- 31200 N de carregamento vertical (direção Z), aplicados nos furos de fixação do feixe de molas no suporte.

- 6 furos no plano vertical são parafusados no chassi, de maneira fixa.
- Não há movimento do suporte em relação ao chassi.

Figura 14 – Carregamentos e restrições aplicadas.

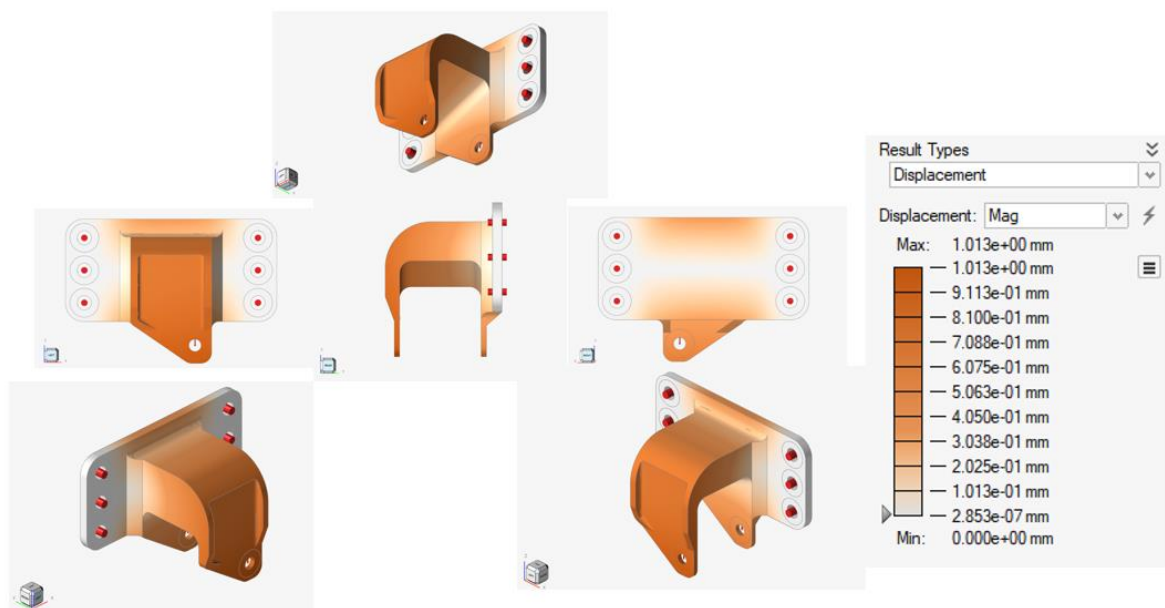


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3.2 Análise estática e de fadiga

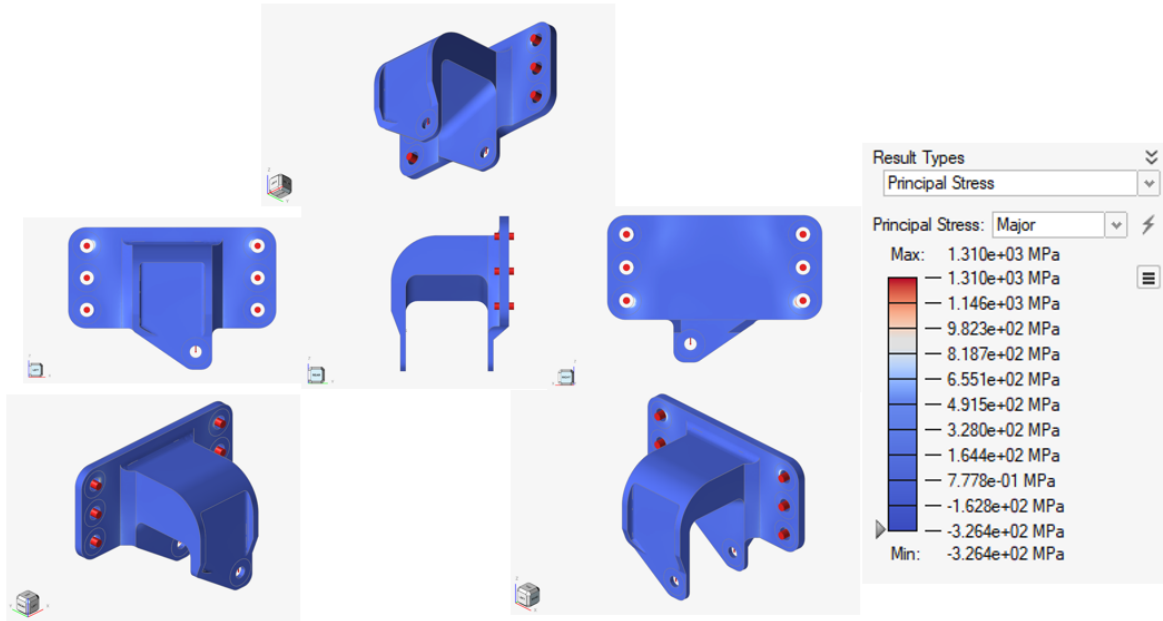
Com a aplicação dos parâmetros de carregamentos e restrições do caminhão, foi possível realizar a análise. Deslocamento total (Figura 15) e tensão máxima principal (Figura 16) são medidas no suporte fundido.

Figura 15 – Deslocamento máximo (Fundido).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 16 – Tensão principal máxima (Fundido).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

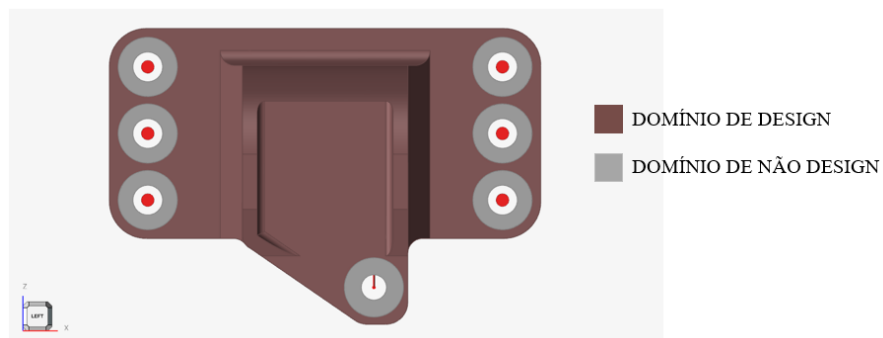
4.3.3 Otimização topológica

- **Definição da região de otimização:**

Partindo do modelo em CAD, foram preservadas as áreas do suporte que tem conexão com a montagem no chassi e no feixe de molas. Denominadas de domínio de não-design, em cinza na Figura 17, são áreas com presença de material que não passarão pelo processo de otimização topológica preservando suas dimensões, pois envolvem outros componentes anexados que não são objetivos da otimização.

Define-se também o domínio de design, área em marrom na Figura 17. Foco da Otimização Topológica, esse volume definido inicialmente é dividido em um número finito de elementos para cálculo da melhor distribuição de material na estrutura, de acordo com os objetivos e restrições.

Figura 17 – Domínio de design e não-design.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

- **Objetivos**

Maximizar a rigidez, reduzindo 65% da massa do suporte.

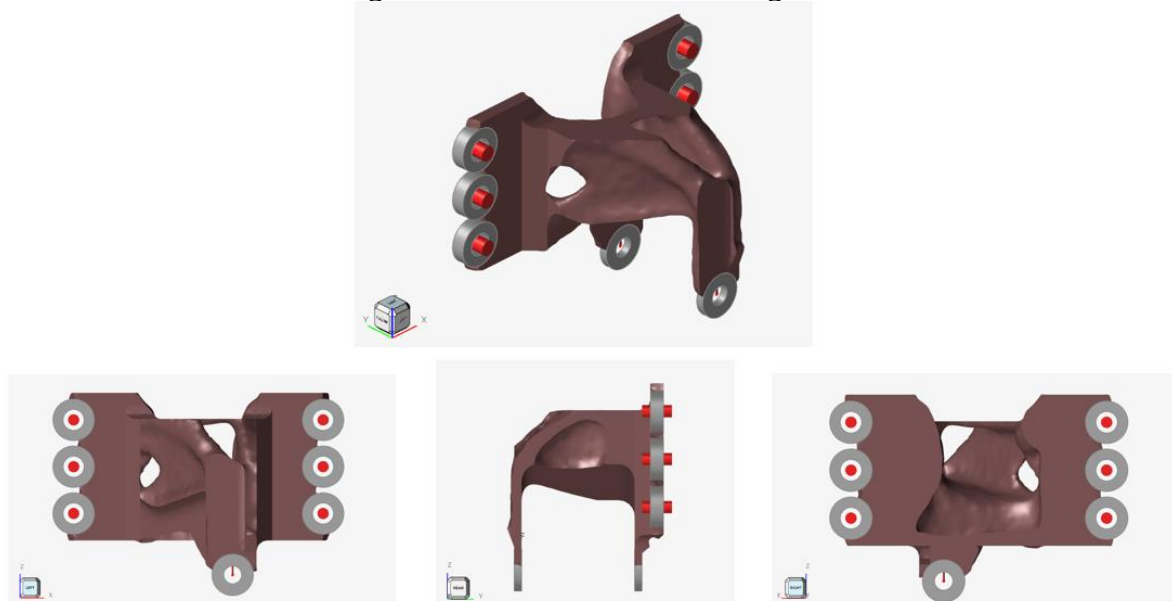
- **Restrição**

A restrição na resposta é manter 35% da massa, já que se busca a redução de 65%.

- **Solução**

A Otimização Topológica roda várias iterações para chegar na solução final. A Figura 18 mostra o resultado gerado pelo software *Altair Inspire 2022 0.2* da topologia otimizada.

Figura 18 – Modelo otimizado orgânico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Redução de massa na área de design:

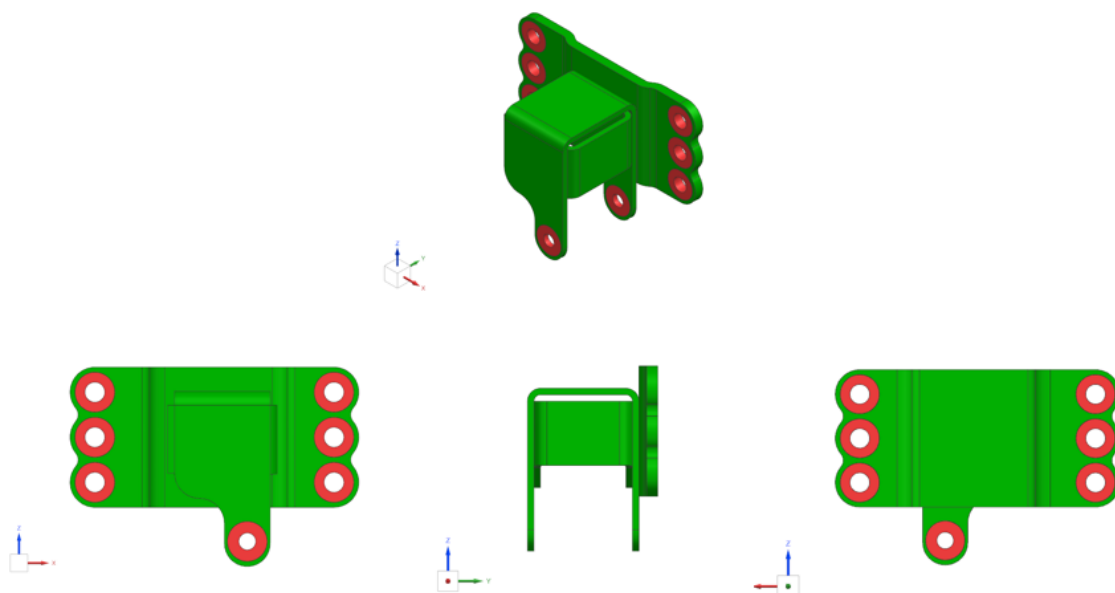
- Massa fundido: 12,771 kg
- Massa otimizada: 4,483 kg
- Redução de massa: 64,9% ~ 65%

4.3.4 Geometria pós-otimização

Da Otimização Topológica, obtemos uma forma “orgânica” que deve ser interpretada, pois nem sempre são adequadas para reprodução em manufatura tradicional. Entende-se por forma “orgânica” aquelas encontradas na natureza, que representam formas naturais, com contorno irregulares, não predeterminada e limitada em formas geométricas.

Considerando a viabilidade de manufatura e visando o processo de estampagem, propõem-se como modelo final a Figura 19 criado no software *Siemens NX*, que não necessariamente será idêntico ao resultado da otimização. Em primeira análise com objetivo de maximizar a rigidez, é possível observar pontos no espaço de design do componente que sofrem maiores esforços e tem a necessidade da presença de material. Com isso é possível o posicionamento de chapas dobradas.

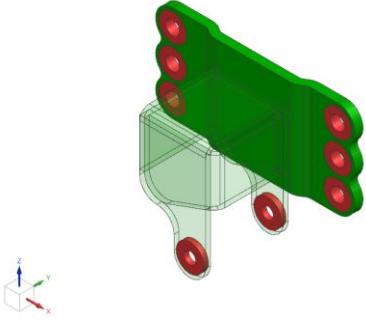
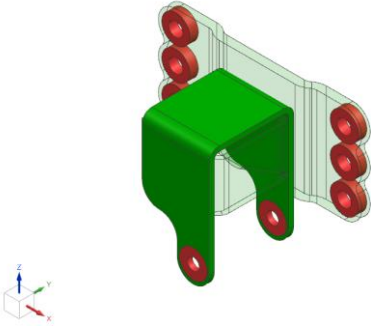
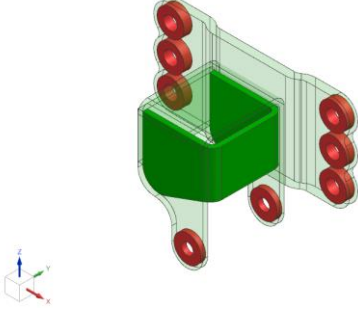
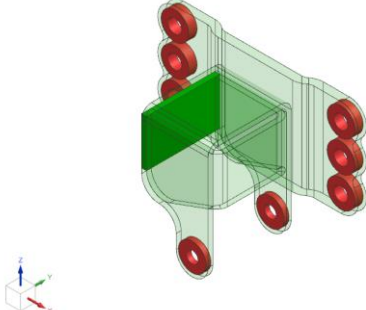
Figura 19 – Modelo otimizado viável.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O componente estampado é composto pela montagem de 4 chapas soldadas, exibida na Tabela 6.

Tabela 6 – Componentes estampados.

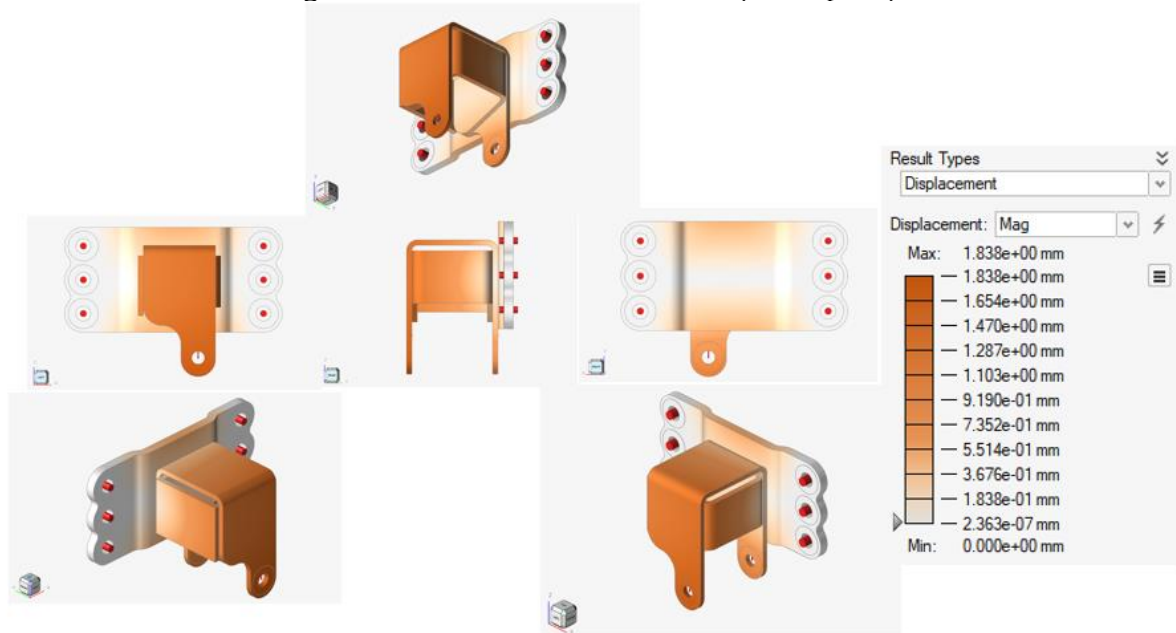
Componente	Espessura (mm)
	12
	7
	7
	7

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

4.3.5 Análise do modelo otimizado

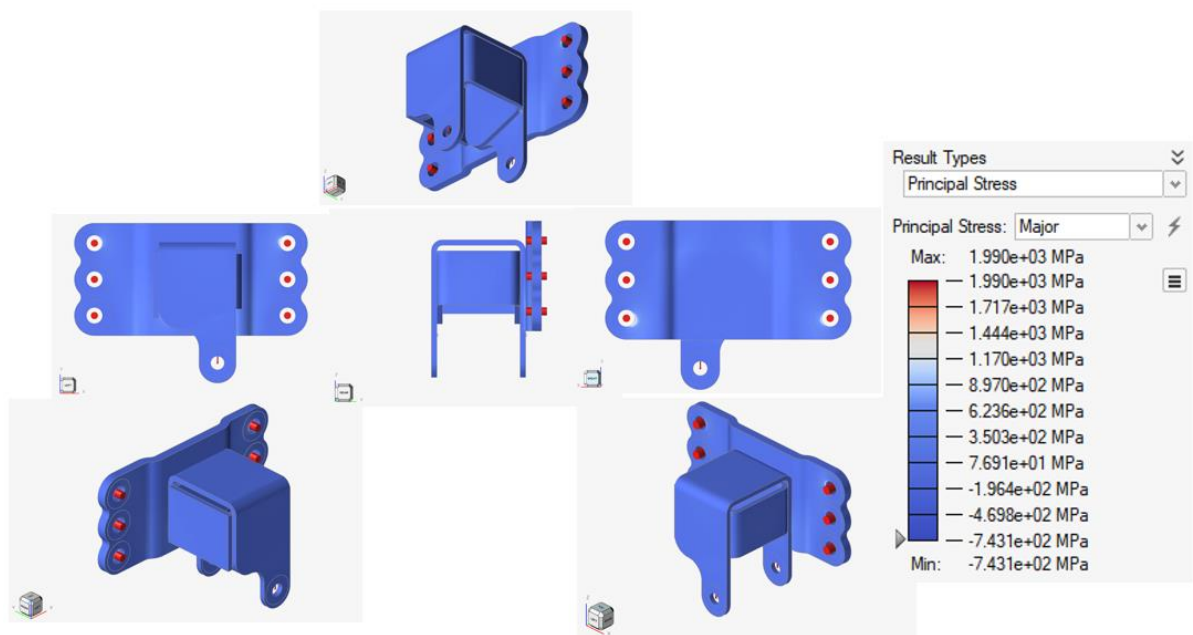
Da mesma maneira que o modelo fundido, forças e restrições foram aplicadas para a análise do modelo final proposto pela otimização.

Figura 20 – Deslocamento máximo (Estampado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 21 – Tensão principal máxima (Estampado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

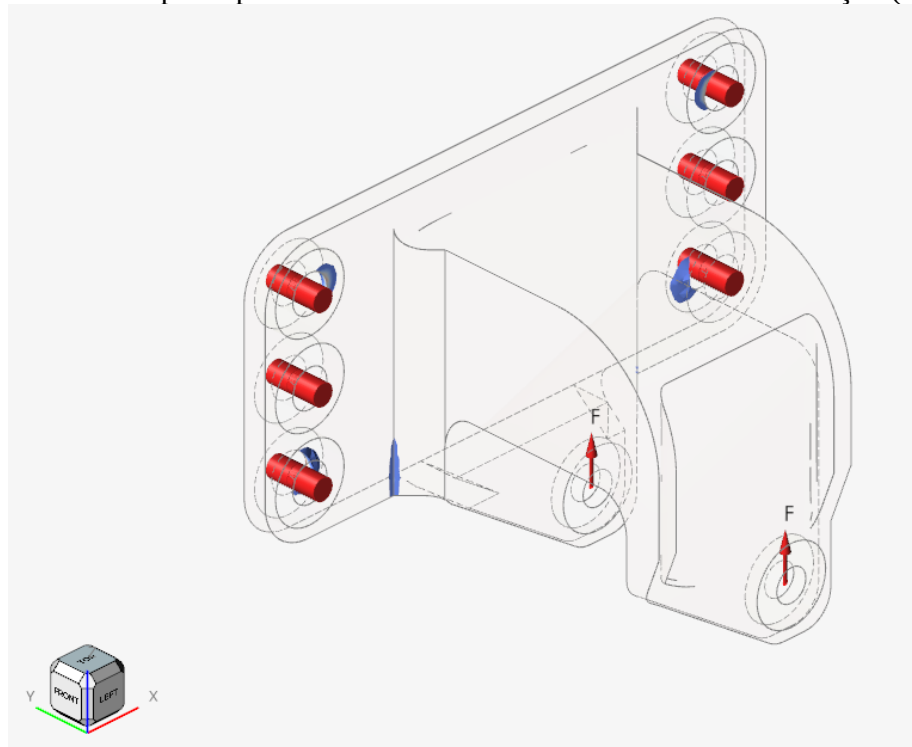
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VALIDAÇÃO: FUNDIDO x ESTAMPADO

Pela análise linear, não houve aumento significativo no deslocamento máximo do suporte, apresentado valor máximo de 1,013mm no fundido e 1,838mm no modelo estampado.

Para análise de tensão principal máxima do fundido foram destacados na escala, Figura 22, pontos que ultrapassam do limite de resistência à tração do material de 410MPa.

Figura 22 – Tensão principal máxima acima do limite de resistência à tração (Fundido).



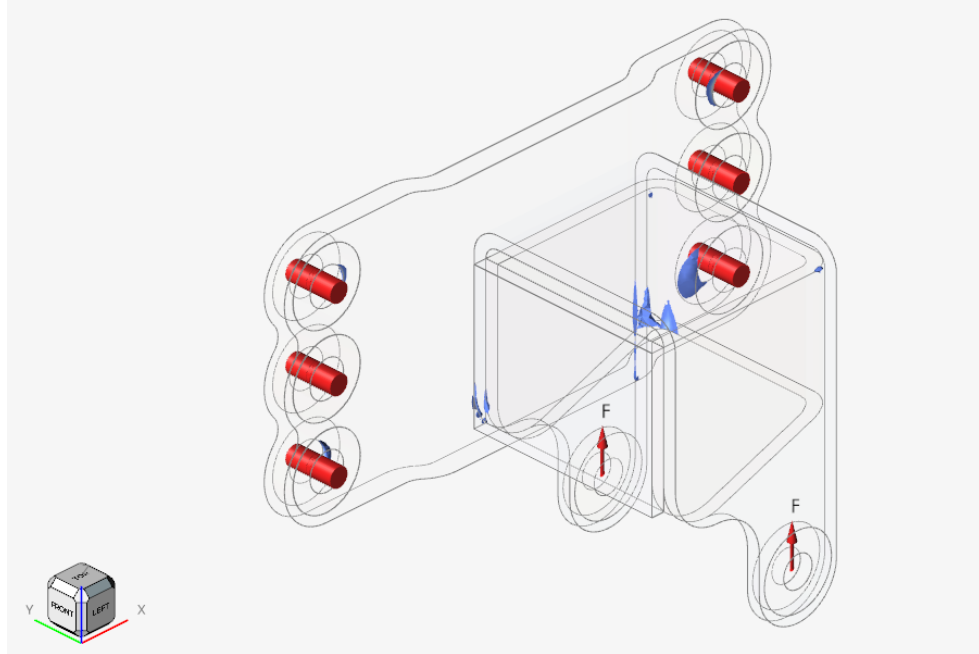
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Observam-se pontos de concentração de tensões nas fixações de parafusos onde foram considerados pontos fixos com graus de liberdade travados. O modelo fundido, portanto, condiz e converge com a realidade. Partindo desse princípio, a análise do suporte estampado pode ser realizada.

Materiais padronizados e voltados para utilização no processo de estampagem são encontrados na norma ABNT NBR 6656. Buscando similaridade em cima da análise de tensões do suporte fundido com suporte estampado, encontra-se um ponto comum aproximadamente

em 560 MPa, Figura 23, limite de resistência à tração do aço de alta resistência mecânica LNE-500 no qual pode ser produzido.

Figura 23 – Tensão principal máxima acima do limite de resistência à tração (Estampado).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O resultado do modelo proposto estampado mostrou-se satisfatório e pertinente para realizar a substituição do componente fundido pelo estampado em primeira análise. Foi atingido também o objetivo de redução de massa, cerca de 45,75%.

- Suporte fundido: 13,16 kg
- Suporte estampado: 7,14 kg.

6. CONCLUSÕES

Na busca por sistemas com melhores desempenho e componentes cada vez mais eficientes e de alto desempenho, a Otimização Topológica é uma excelente ferramenta de design de componentes novos que atendam esses requisitos. Ainda que sem uma geometria inicial definida, é possível obter um esboço de forma orgânica do modelo que se deseja tendo o conhecimento do espaço que se deseja ocupar, além de carregamentos e restrições no qual será submetido.

É uma técnica efetiva para otimização de componentes. Através dela foi possível realizar a transformação do suporte fundido em um componente estampado e que manteve performance similar ao original. Utilizando o método foi possível alcançar uma redução de aproximadamente 45,75 % da massa, cerca de 6 kg.

As restrições de processo de manufatura convencionais podem acabar limitando a condição ótima da peça. A Otimização Topológica torna-se muito mais efetiva se for utilizado um método de manufatura para produção mais fiel do resultado da otimização, como a manufatura aditiva.

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Validação do componente para total substituição através da simulação multi-corpos, para aquisição dos esforços dinâmicos, e simulações de durabilidade do componente;
- O desenvolvimento mais profundo do processo de estampagem da peça, detalhando o gerenciamento de ciclo de vida do produto (PLM – *Product Lifecycle Management*) desde a concepção do produto, desenvolvimento e manufatura, até sua entrada em serviço;
- Estudo para definir melhor método de produção de um componente com topologia otimizada.

REFERÊNCIAS

ALTAIR ENGINEERING, INC., a. **Practical aspects of finite element simulation**. 2021. *E-book*. Disponível em: <https://altairuniversity.com/free-ebooks/free-ebook-practical-aspects-of-finite-element-simulation-a-study-guide/>. Acesso em: 06 nov. 2022.

ALTAIR ENGINEERING, INC., b. **Practical aspects of optimization with Altair OptiStruct™**. 2021. *E-book*. Disponível em: <https://altairuniversity.com/free-ebooks/free-ebook-practical-aspects-of-structural-optimization-a-study-guide/>. Acesso em: 10 nov. 2022.

ALTAIR ENGINEERING, INC., c. **Inspire applications** [2023]. Disponível em: <https://www.altair.com/inspire-applications>. Acesso em: 05 fev. 2022.

ALVES FILHO, A. 1952. **Elementos finitos**: a base da tecnologia CAE. 2.ed. São Paulo: Érica, 2000.

ASSAN, A. E. **Método dos elementos finitos**: primeiros passos. 2.ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6656**: Chapas e bobinas de aço acalmado com características especiais de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6916**: Ferro fundido nodular ou ferro fundido com grafita esferoidal – especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

BALDAM, R.; VIEIRA, E. **Fundição**: processos e tecnologias correlatas. São Paulo: Érica, 2014.

BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R.; VAZ, L. F. H. Panorama da indústria de autopeças no Brasil: características, conjuntura, tendências tecnológicas e possibilidades de atuação do BNDES. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.42, p. [167]-216, set. 2015. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9555>. Acesso em: 05 nov. 2022.

BENAZZI JUNIOR, I. **Tecnologia de estampagem**. São Paulo: Fatec Sorocaba, mar. 2010.

BENSØE, M. P.; KIKUCHI, N. Generating optimal topologies in optimal design using o homogenization method, **Computer methods in applied mechanics and engineering**, North Holland: Elsevier B.V., 2nd ed., v.71, p. 197-224, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(88\)90086-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(88)90086-2). Acesso em: 11 ago. 2022.

BENSØE, M. P.; SIGMUND, O. **Topology optimization** – theory, methods, and applications. Berlin: Springer-Verlag, 2003.

BUENO, J. S.; SCHAEFFER, L. Critérios de estampabilidade de chapas metálicas. **Corte & conformação de metais**, São Paulo, v. 12, n. 135, p.14-21, jul. 2016. Disponível em: <http://www.cbcm->

metalfforming.com/publicacoes/2016/CRITERIOS_DE_ESTAMPABILIDADE.pdf. Acesso em: 30 out. 2022.

CASOTTI, B. P.; BEL FILHO, E. D.; CASTRO, P. C. Indústria de Fundição: situação atual e perspectivas. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n.33, p. 121-162, mar. 2011. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1721>. Acesso em 11 set. 2022.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica** – processos de fabricação e tratamento v. 2. 2.ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

EVANGELISTA, A. S.; SILVA, J. Processo de fundição e sua versatilidade na fabricação de peças. **Revista Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, 3.ed., v. 11, p. 21-50. mar. 2020. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/processo-de-fundicao>. Acesso em: 05 nov. 2022.

GUNJAWATE, S. R.; SOLAPUR, S. B. Structural analysis and topology optimization of leaf spring bracket, **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, v. 9, 7th ed., July 2020. Disponível em: <https://www.ijert.org/research/structural-analysis-and-topology-optimization-of-leaf-spring-bracket-IJERTV9IS070630.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2022.

HAFTKA, R. T.; GÜRDAL, Z. **Elements of structural optimization** - 3rd revised and expanded edition. Springer-Dorcrecht, 1992.

HARZEIM, L.; GRAF, G. A review of optimization of cast parts using topology optimization I – topology optimization without manufacturing constraints. **Struct Multidisciplinary Optimization**, Springer-Verlag, n.30, p. 491-497, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00158-005-0553-x>. Acesso em: 11 ago. 2022.

INSTITUTO AÇO BRASIL. **A siderurgia em números 2022 (pocket yearbook)**. Rio de Janeiro, maio 2022. Disponível em: https://acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2022/05/AcoBrasil_Mini_anuario_2022.pdf. Acesso em: 27 nov. 2022.

KLAVA, B. **Desenvolvimento das etapas de análise e otimização estrutural de uma manga de eixo**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/86383>. Acesso em: 13 ago. 2022.

PERINI, G. **Estudo de caso: aplicação de otimização topológica no desenvolvimento de um protótipo de cubo de roda**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica, área Projeto e Fabricação) - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/802>. Acesso em: 15 ago. 2022.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE AUTOPEÇAS (Sindipeças); ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE AUTOPEÇAS (Abipeças). **Anuário da indústria de autopeças** – ed. 2021. São Paulo, 2021. Disponível em: <http://www.virapagina.com.br/sindipeças2021/>. Acesso em: 24 out. 2022.

VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS. **VW Constellation 26.260 6x2**: Especificações Técnicas. ed. out. 2022. Versão *online*. Disponível em: <https://man-static-hml.s3.amazonaws.com/7aaf30fc-5285-4378-9add-a15b9fbde604.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2022.