

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Adriano Ribeiro Marinho

**MANUFATURA ADITIVA PARA FABRICAÇÃO DE ACOPLADORA FLEXÍVEL
TOPOLOGICAMENTE OTIMIZADA**

Betim
2021

ADRIANO RIBEIRO MARINHO

**MANUFATURA ADITIVA PARA FABRICAÇÃO DE ACOPLADORA FLEXÍVEL
TOPOLOGICAMENTE OTIMIZADA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Betim como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Luiz Simonetti
(IFMG)

Coorientadores: Prof. Gabriel M. A. Carvalho
(IFMG) e Profa. Isabel Jesus (ISEP-IPP)

Betim
2021

M338m Marinho, Adriano Ribeiro

Manufatura aditiva para fabricação de acopladora flexível topologicamente otimizada / Adriano Ribeiro Marinho. – 2021. 64 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Câmpus Betim, 2021.

Orientação: Prof. Hélio Luiz Simonetti. Coorientação: Prof. Gabriel Mendes de Almeida Carvalho e Profa. Isabel Jesus.

1. Otimização topológica. 2. Manufatura aditiva. 3. Grampo de acopladora flexível. 4. SESO. I. Marinho, Adriano Ribeiro. II. Instituto Federal de Minas Gerais, Câmpus Betim, Bacharelado em Engenharia Mecânica. III. Título.

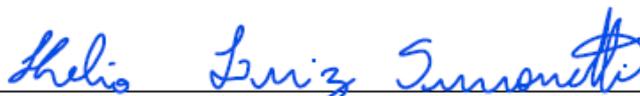
CDU 658.62

Adriano Ribeiro Marinho

**MANUFATURA ADITIVA PARA FABRICAÇÃO DE ACOPLADORA FLEXÍVEL
TOPOLOGICAMENTE OTIMIZADA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso Bacharelado em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Betim como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Aprovado em: 16 / 03 / 2021 pela banca examinadora:



Prof. Dr. Hélio Luiz Simonetti - IFMG (Orientador)



Prof. Dr. André Fonseca Félix - IFMG

FRANCISCO DE ASSIS DAS
NEVES:34593357420

Assinado de forma digital por
FRANCISCO DE ASSIS DAS
NEVES:34593357420
Dados: 2021.10.22 14:54:00 -03'00'

Prof. Dr. Francisco de Assis das Neves – UFOP

DEDICATÓRIA

Dedico a elaboração deste trabalho ao meu querido avô João Marinho Neto, pelo exemplo de coragem, perseverança e hombridade durante sua caminhada. Através de seus esforços e, principalmente, os aprendizados passados por gerações, hoje tenho a oportunidade de celebrar mais esta conquista. Guardarei para sempre todo o carinho e os momentos de felicidade junto ao senhor. Que Deus o tenha em um lugar muito especial!

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente à Deus e às seguintes pessoas e instituições, que de certa forma contribuíram para a minha formação e especialmente para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, Adercio e Luciana, por todo amor e dedicação ao longo da minha educação e dos meus irmãos Bruno e Flaviana. Vocês são e sempre serão a minha base e prioridade em todos os momentos da minha vida.

À minha melhor amiga, companheira e namorada Jordana Oliveira, pela imensa colaboração, carinho, paciência e compreensão durante todos os momentos difíceis.

À minha família, por serem a minha base de amor e alegria, em especial à Claudia Sabino, Daniel Matos, Jussara Oliveira, João Pedro, Letícia e Marcella.

Ao meu orientador Dr. Hélio Luiz Simonetti, pela imensa colaboração durante toda minha graduação. Tenho muita gratidão por tudo aquilo que conquistamos juntos ao longo dos últimos anos. Agradeço pelos ensinamentos, correções, paciência e amizade durante todo o percurso.

Ao meu coorientador Msc. Gabriel M. A. Carvalho, pelos momentos de descontração, dedicação ao ensino e pelo companheirismo fora do ambiente acadêmico.

À minha coorientadora Profa. Isabel Jesus e ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), por todo o suporte e colaboração durante o período de intercâmbio acadêmico. Espero manter os laços de amizade criados durante a oportunidade.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais por todas as oportunidades criadas durante à minha graduação. Tenho bastante orgulho de fazer parte da primeira turma de Engenharia Mecânica da instituição.

Aos amigos do IFMG, Caio Ribeiro, Cleberson Vitor, Felipe Caldeira, Henrique Pinheiro, Marconi Schiara, Moisés Perroni, Roberto Rossi e muitos outros, pela amizade, carinho e valiosas contribuições, não somente para a minha formação como engenheiro, como também para a formação do meu caráter.

À YPY Eng. Construções e Serviços, que permitiram a realização deste trabalho a partir da sessão da patente, além dos inúmeros suportes durante o desenvolvimento do estudo.

RESUMO

Dentre o campo de otimização estrutural, a técnica de Otimização Topológica (OT) apresenta uma vantagem entre as demais, possibilitando ao usuário alterar o layout da estrutura primária. Um conhecido problema limitador do uso da metodologia relaciona-se com a dificuldade e, muitas vezes, incapacidade dos meios de fabricação tradicionais de desenvolver o modelo otimizado devido ao seu nível de complexidade, sem que haja um pós-processamento do mesmo. Neste cenário, os métodos de fabricação conhecidos como Manufatura Aditiva (MA), vêm ganhando notoriedade nos últimos anos. A MA apresenta um conjunto de procedimentos mecânicos que podem ser usados para superar as limitações técnicas das abordagens clássicas, oferecendo também um maior grau de liberdade de design. Este trabalho apresenta uma investigação sobre as relações entre as técnicas de otimização e manufatura aditiva. Como estudo de caso, foi avaliado a configuração e aplicações de um grampo metálico, elemento que compõe a ferramenta denominada acopladora flexível (BR 10 2012 026038-7 A2), usada na fabricação e montagem de tubulações industriais soldadas. Para este fim, o método Smoothing Evolutionary Structural Optimization (SESO) foi empregado para o estudo topológico, seguido de uma análise estrutural via SolidWorks. Foram analisados os parâmetros de tensão máxima de Von Mises, percentual de redução de peso, quantidade de cavidades e complexidade do modelo ótimo, além da realização de testes de deflexão e estrição máxima para o componente. Os resultados obtidos foram comparados com os do modelo original, sendo observado uma boa concordância entre os comportamentos estruturais. O trabalho realizado mostra que a aplicação da técnica de otimização topológica via SESO, anterior ao estudo estrutural, auxiliou na determinação, de forma ágil, da quantidade e posicionamento das cavidades. Entende-se que a metodologia utilizada resulta em uma redução no tempo de análise e processamento da estrutura, bem como os custos computacionais envolvidos e que, portanto, pode ser empregada para facilitar o processo de otimização de estruturas.

Palavras-chave: Otimização Topológica. Manufatura Aditiva. Grampo de Acopladora Flexível. SESO.

ABSTRACT

Among the field of structural optimization, the Topological Optimization (OT) technique presents an advantage compared to the others, allowing the user to change the primary structure layout. A well-known limiting problem for the methodology application is related to the difficulty and, often, inability of traditional manufacturing means to develop the optimized model due to its level of complexity, without proper post-processing. In this scenario, the manufacturing methods known as Additive Manufacturing (MA) have been gaining notoriety in recent years. The MA technique presents a set of mechanical procedures that can be used to overcome the technical limitations of classic approaches, while also offering a better freedom design degree. This work presents an investigation about the relation between optimization techniques and additive manufacturing. As a case study, the configuration and of a metal clamp, part of the tool called flexible coupler (BR 10 2012 026038-7 A2), used in manufacture and assembly of welded industrial pipes. For this purpose, the Smoothing Evolutionary Structural Optimization (SESO) method was used for the topological study, followed by a structural analysis via SolidWorks. Parameters such as Von Mises maximum tension, percentage of weight reduction, number of cavities and optimal model complexity were evaluated, in addition to the performance of maximum component deflection and yield strength. The results obtained were compared with those of the original model, showing a good agreement between the structural behavior. This work shows that the application of topological optimization technique by SESO, prior to the structural study, helped in a fast determination of cavities quantity and positioning. The method used in this work results in reduction of time analysis and structure processing, as well as the computational costs involved and, therefore, can be used to facilitate the process of optimizing structures.

Keywords: Topological Optimization. Additive Manufacturing. Flexible Coupler Clamp. SESO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - PRINCIPAIS ABORDAGENS DA OE	17
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DO MODELO OTIMIZADO VIA OT (A).....	17
FIGURA 3 - PRINCÍPIOS DA OT	18
FIGURA 4 - ETAPAS CARACTERÍSTICAS DE UM PROCESSO DE OT	18
FIGURA 5 - SUAUIZACÃO DO VOLUME DE RETIRADA DE ELEMENTOS AO LONGO DAS ITERAÇÕES	21
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO ITERATIVO SESO	23
FIGURA 7 - REPRESENTAÇÃO DA REGIÃO DE INSTABILIDADE NUMÉRICA: TABULEIRO DE XADREZ.....	24
FIGURA 8 - PROBLEMA DE DEPENDÊNCIA DA MALHA	25
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DE UMA FUNÇÃO NÃO CONVEXA COM DIFERENTES MÍNIMOS LOCAIS	26
FIGURA 10 - ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO SLS	31
FIGURA 11 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO DMLS	32
FIGURA 12 - DISPOSIÇÃO DAS PRESILHAS DE ACORDO COM A DIMENSÃO DA TUBULAÇÃO	34
FIGURA 13 APLICAÇÃO DA ACOPLADORA NA MONTAGEM DO TIPO TUBO-CURVA.....	35
FIGURA 14 - GRAMPO EM DETALHE (OTIMIZAÇÃO VIA CAE).....	36
FIGURA 15 - ESQUEMA REPRESENTANDO A METODOLOGIA UTILIZADA NO TRABALHO	37
FIGURA 16 - GEOMETRIA DO GRAMPO UTILIZADO	38
FIGURA 17 - DIMENSÕES E DIAGRAMA DE CORPO LIVRE (DCL) DO DOMÍNIO DE SOLUÇÃO.....	38
FIGURA 18 - ESTRUTURA ÓTIMA OBTIDA PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO SESO	43
FIGURA 19 - HISTÓRICO DA EVOLUÇÃO DA COMPLIANCE (FO) POR NÚMERO DE ITERAÇÕES ...	43
FIGURA 20 - TAXA DE REDUÇÃO DE VOLUME AO LONGO DO PROCESSO ITERATIVO	44
FIGURA 21 - TRANSCRIÇÃO DA ESTRUTURA ÓTIMA VIA MATLAB (A) PARA O MODELO A SER UTILIZADO NA 1ª ANÁLISE ESTRUTURAL VIA SOLIDWORKS (B).....	45
FIGURA 22 - PRIMEIRA ANÁLISE: ADEQUAÇÃO DE DIMENSÃO DA CAVIDADE	46
FIGURA 23 - ESTRUTURA ÓTIMA PROPOSTA NO PRESENTE TRABALHO	47
FIGURA 24 - COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS OTIMIZADOS DO GRAMPO (A) E (B) PRESENTE TRABALHO.	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VANTAGENS E DESVANTAGENS DA APLICAÇÃO DA MA COMPARADO AOS PROCESSOS TRADICIONAIS	28
TABELA 2 - CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE MA BASEADOS NO ESTADO INICIAL DA MATÉRIA-PRIMA	29
TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DA TÉCNICA DE MA CONFORME NORMA ISO/ASTM 52900:2015	30
TABELA 4 - PARÂMETROS DE ENTRADA E PROPRIEDADES DO MATERIAL	41
TABELA 5 - COMPARATIVO ENTRE OS MODELOS OTIMIZADOS	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALM	Additive Layer Manufacturing
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
E	Módulo de elasticidade/ Módulo de Young (Pascal)
ER	Razão evolucionária
ESO	Evolutionary Structural Optimization
ISO	International Organization for Standardization
MA	Manufatura Aditiva
Maxloop	Nº máximo de iterações
MS	Manufatura Subtrativa
Nelx	Comprimento da estrutura (Matlab)
Nely	Altura da estrutura (Matlab)
Nelz	Largura da estrutura (Matlab)
OE	Otimização Estrutural
OT	Otimização Topológica
Rmin	Raio mínimo de abrangência
RR	Taxa de remoção de elementos
SESO	Smoothing Evolutionary Structural Optimization
SLA	Stereo Lithography
SLS	Selective Laser Sintering
V_{frac}	Fração de Volume
μ	Coefficiente de Poisson

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.	Otimização Estrutural	16
2.1.1.	Otimização Topológica (OT).....	17
2.1.1.1.	Smoothing Evolutionary Structural Optimization (SESO)	19
2.1.1.2.	Problemas Numéricos da OT	24
2.1.1.2.1.	Tabuleiro de xadrez.....	24
2.1.1.2.2.	Dependência da malha.....	25
2.1.1.2.3.	Mínimos locais	25
2.2.	Manufatura Aditiva (MA).....	26
2.2.1.	Fusão de leito em pó.....	31
2.2.2.	Direct Metal Laser Sintering (DMLS).....	31
3.	Estudo de Caso: Acopladora Flexível (BR 10 2012 026038-7 A2).....	34
4.	METODOLOGIA	37
4.1.	Definição da geometria – Domínio de solução.....	38
4.2.	Definição dos parâmetros de malha.....	39
4.3.	Definição dos critérios de otimização e parâmetros de simulação	39
4.3.1.	Formulações do Problema de Otimização	39
4.3.2.	Crítérios de otimização e parâmetros de simulação.....	40
4.4.	Pós-Processamento dos resultados	41
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
5.1.	Modelo otimizado via SESO	42
5.2.	Análise estrutural do modelo otimizado	45
6.	CONCLUSÕES	50
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
8.	REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

A demanda econômica mundial de diminuição de custos na indústria metalúrgica ao longo das últimas décadas, têm feito o mercado apostar em alternativas para a redução de peso e otimização de propriedades mecânicas de seus componentes. Neste contexto, o campo da otimização ganhou notoriedade, conforme descreve ROZVANI et al. (1995), consistindo em encontrar a configuração ótima de distribuição da massa da estrutura no domínio da região viável de projeto, avaliando as alterações em alguns comportamentos mecânicos, como a flexibilidade, frequências naturais, tensões, entre outros. Dentre as principais vertentes, a técnica de Otimização Topológica (OT), possui um potencial que a diferencia das demais: a possibilidade de alteração do layout da estrutura primária, tornando-se possível a determinação do fluxo de tensões (SIMONETTI *et al*, 2010, 2014a, 2014b).

Um dos tradicionais e mais utilizados processos de fabricação fundamenta-se em um procedimento longo de remoção do excesso de material até atingir a forma desejada, isto é, o produto acabado. Etapas como o desbaste, usinagem e acabamento final, dentre outras, consomem grandes linhas de produção, na maioria das vezes dedicadas exclusivamente a cada operação. Esse sistema pode receber o nome de Manufatura Subtrativa (MS) (BRACKET, 2011; FRANCO, 2019). Embora as máquinas para manufatura e ferramentas computacionais estejam em constante aprimoramento, em determinados casos, como o de peças com formas complexas e partes entrelaçadas, dificuldades em sua produção ainda são encontradas. Tendo em vista tais barreiras, observa-se um conhecido problema limitador da utilização das técnicas de OT: o pós-processamento obrigatório da estrutura final para torna-la viável ao processo de fabricação convencional.

Uma mudança recente no perfil de consumo, atrelado aos avanços tecnológicos oriundos da era digital, tem impactado a produção industrial em diversos setores da economia, que atualmente vem mostrando uma tendência à um baixo volume de produção. Tais produtos apresentam um alto nível de customização, direcionando o foco totalmente para o cliente, que exige cada vez mais opções, melhores relacionamentos e experiências (FRANCO, 2019). Assim, engenheiros e designers enfrentam grandes desafios, como o crescente nível de complexidade das peças e, principalmente, como fabricá-las. Diante destes avanços e tendências da denominada Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), as grandes organizações vêm buscando novas formas e técnicas de fabricação para equipar-se com ferramentas dispostas a oferecer maior flexibilidade e economia na produção. Suportada pela era da digitalização avançada, grande quantidade de informações transferidas via internet (*big data*) e integração de

diversos sistemas, a visão futura que se pode ter da produção se caracteriza em um cenário no qual os produtos controlam o seu próprio processo de fabricação, possibilitando um alto nível de personalização.

Nesta perspectiva, os métodos de fabricação de camada aditiva, do inglês *Additive Layer Manufacturing* (ALM), comumente conhecidos como métodos de impressão 3D, ou ainda como Manufatura Aditiva, do termo *Additive Manufacturing* (MA), vêm ganhando bastante popularidade. A MA apresenta um conjunto de procedimentos mecânicos que podem ser usados para superar as limitações técnicas das abordagens clássicas (MS), oferecendo também maior liberdade ao projeto (COSTA, 2018; FRANCO, 2019). Tais métodos podem ser aplicados usando tanto materiais de base polimérica como metais, na forma de pó ou fios, derretidos e soldados camada por camada, dependendo da variação do processo (TEAN SU, 2013).

Em um relatório de pesquisa realizado pelo Work Economic Forum, cujo objetivo era de captar as principais mudanças com grande impacto na sociedade e encorajar as pessoas a se prepararem para elas, o The Global Agenda Council (2015), coletou a visão de oitocentos especialistas no setor de tecnologia de informação e de comunicação, realizando uma investigação a respeito dos principais marcos tecnológicos. Dentre os vinte e um eleitos, três estão relacionados com a técnica de impressão 3D, sendo: manufatura, com o primeiro carro impresso; saúde humana, com o primeiro transplante de fígado impresso; e produtos de consumo, com 5% dos produtos de consumo impressos. Sendo assim, a MA pode ser vista como uma das principais modernizações que irão afetar significativamente a vida do ser humano nos próximos anos.

O presente trabalho abordará o processo de fabricação de manufatura aditiva, em especial à técnica intitulada como *Direct Metal Laser Melting* (DMLS), além de explorar o elo entre a metodologia e a técnica de otimização topológica denominada SESO (*Smoothing Evolutionary Structural Optimization*), cuja heurística é bidirecional e baseada na remoção e adição gradativa, de elementos ineficientes no domínio da estrutura. A técnica SESO será apresentada e empregada. Como estudo de caso, será utilizado uma ferramenta aplicada na indústria de óleo e gás, mais especificamente no ramo de fabricação e montagem de tubulações industriais soldadas, denominada acopladeira flexível (BR 10 2012 026038-7 A2), desenvolvida pela empresa YPY Eng. O objetivo deste trabalho é determinar uma configuração ótima para o grampo da ferramenta, responsável por dar suporte à cinta flexível de ajuste da tubulação, bem como explorar o método DMLS como uma das possíveis rotas para sua

fabricação. Em sua topologia atual, o grampo já possui suavizações de peso, realizadas pelo inventor de forma empírica, através de simulações via SolidWorks, observando propriedades como tensão de Von Mises, deflexão e estrição do componente. Com a realização deste trabalho, pretende-se examinar as possíveis melhorias estruturais, tornando-a mais simples e otimizada, dois quesitos importantes para sua fabricação e aplicação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção do trabalho serão estabelecidos conceitos importantes para uma melhor compreensão do tema discutido. Inicialmente, será apresentado o campo da otimização estrutural, seus objetivos, funcionalidades, bem como suas principais técnicas. Entre elas, a OT será mais detalhada e, em seguida, uma de suas metodologias: SESO. Por fim, será apresentado um resumo do cenário envolvendo a MA, sua origem, princípios e aplicações. Uma de suas vertentes também será demonstrada, conhecida como *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS).

2.1.Otimização Estrutural

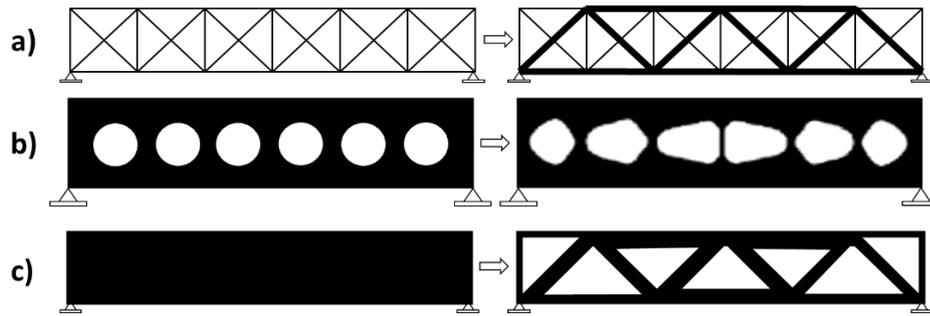
Conforme mencionado anteriormente, a preocupação com soluções econômicas em projetos cada vez mais sustentáveis justifica a importância da otimização estrutural, cujo objetivo é a redução do consumo de recursos naturais, sem a perda da eficiência estrutural (LANES & GRECO, 2013, p.1).

A otimização estrutural trata-se de um procedimento numérico visando a obtenção de configurações estruturais ótimas a partir de uma medida de desempenho pré-determinada, podendo ser mínima massa, máxima rigidez, entre outros (SIMONETTI et al., 2016a, p.2). Ademais, as restrições de projeto devem ser satisfeitas, tanto sobre as variáveis como também sobre o comportamento da estrutura (tensão de falha, deslocamentos, frequência natural, etc.).

Dentre as técnicas tradicionais de otimização estrutural, destacam-se três metodologias, conforme Figura 1: a otimização paramétrica (*Size Optimization*), em que a estrutura apresenta forma e topologia fixa, variando apenas os materiais constitutivos e/ou nas dimensões dos elementos; a otimização de forma (*Shape Optimization*) que, assim como a paramétrica, apresenta topologia fixa, no entanto o processo ocorre variando a forma das cavidades previamente estabelecidas (FERNANDES et al., 2015; MARCHESI et al., 2015; SIMONETTI, 2009). A OT, por sua vez, é recente no campo da otimização estrutural, no entanto, apresenta uma vantagem em relação aos demais procedimentos, que a permite inserir cavidades no domínio inicial, alterando-o (ALMEIDA et al., 2013; FERNANDES et al., 2015; SAADLAOUI et al., 2017; SIMONETTI, 2016; SIMONETTI et al., 2010; 2016a;2016b).

Figura 1 - Principais Abordagens da OE

a) Otimização Paramétrica, b) Otimização de Forma e c) Otimização Topológica.



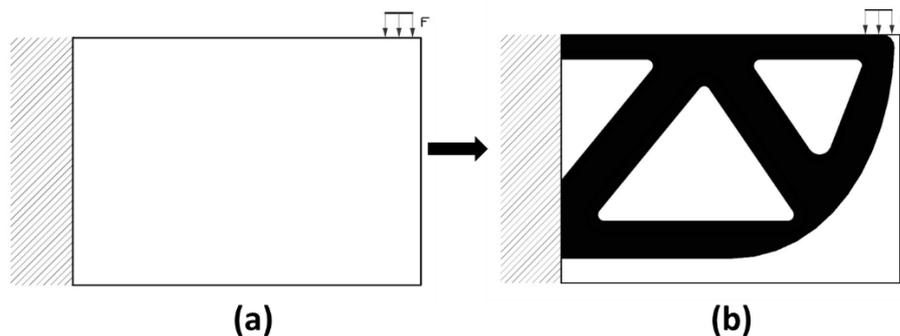
Fonte: Adaptado de BENDSOE & SIGMUND (2002).

2.1.1. Otimização Topológica (OT)

Os métodos de OT fornecem uma ferramenta numérica ideal para determinação automática das estruturas, sem levar em conta o processo de fabricação, considerando um ou mais critérios mecânicos a serem minimizados (COSTA, 2018). Deste modo, a técnica permite que sejam feitas alterações não apenas na geometria da estrutura, mas principalmente em sua topologia, modificando o número e a conectividade dos componentes, criando limites, ramificações e cavidades, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Evolução do modelo otimizado via OT (a)

Domínio fixo estendido e (b) Configurações ótimas dentro do domínio fixo estendido.

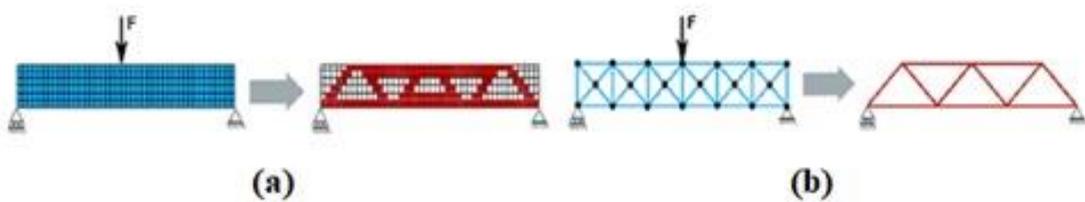


Fonte: Próprio autor

O objetivo principal da OT está relacionado com a distribuição ideal de material e regiões vazias dentro de um domínio predefinido, a partir de um determinado conjunto de cargas e condições de contorno (SAADLAOUI et al., 2017). O procedimento tem sido largamente utilizado em áreas da engenharia aeronáutica e mecânica, devido a enorme importância de se atingir componentes mais leves e estruturalmente eficientes (CHUN et al., 2019; JANKOVICS et al. 2018). Em casos de domínio contínuo, as variáveis do projeto são a quantidade, a conectividade, a forma e a localização das cavidades, enquanto na abordagem discreta, tem-se as espessuras ou áreas transversais dos membros estruturais (SAADLAOUI et al., 2017), vide Figura 3.

Figura 3 - Princípios da OT

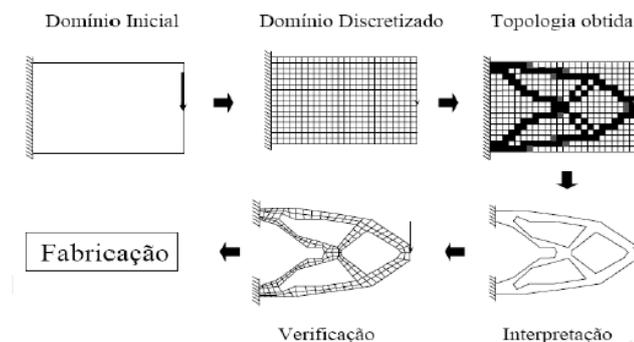
(a) domínios contínuos e (b) abordagem discreta



Fonte: SAADLAOUI et al. (2017)

Vale ressaltar que a estrutura ótima resultante da OT é considerada primária, pois problemas intrínsecos da técnica, os quais serão posteriormente abordados, decorrentes da utilização de elementos finitos, podem inviabilizar a manufatura desses modelos. Desta forma, o resultado, na maioria dos casos, necessita de um pós-processamento de acordo com a Figura 4.

Figura 4 - Etapas características de um processo de OT



Fonte: SILVA (2001)

Ao longo dos últimos anos, duas abordagens se destacam no campo da OT, a abordagem micro e a macro. De acordo com SIMONETTI et al (2010), a primeira trata-se de:

A existência de uma microestrutura porosa, que define as relações constitutivas do material em função da sua geometria e da densidade volumétrica de uma célula unitária representativa do material, que, por sua vez, é representada por variáveis contínuas, sucessivamente distribuídas, no espaço do domínio fixo estendido, que consiste numa região do espaço onde pode existir a estrutura.

Na abordagem micro, pode-se destacar o método SIMP – *Simple Isotropic Material With Penalization* (BENDSØE, 1989; ROZVANY et al., 1992). Já na abordagem macro, a topologia é modificada a partir da inserção de furos, otimizando-a. Como exemplo, o *Evolutionary Structural Optimization* (ESO) e o *Topological Sensitivity Analysis* (TSA), podem ser evidenciados (SIMONETTI 2009).

2.1.1.1. Smoothing Evolutionary Structural Optimization (SESO)

O SESO proposto por SIMONETTI et al. (2014b, 2014c, 2017) é um método evolucionário de otimização que tem uma heurística bidirecional, pois permite a adição e remoção de elementos no domínio da estrutura. Neste sentido, difere do ESO (XIE & STEVEN, 1993; QUERIN, 1997), cuja heurística é unidirecional, pois apenas retira elementos do domínio da estrutura de forma drástica (*Hard-kill*). A suavização proposta pelo SESO permite que os elementos, cujas tensões então próximas da restrição de desigualdade (1), sejam devolvidos a estrutura corrigindo a direção para o ótimo. Destaca-se ainda que problemas de instabilidade numérica como a formação do tabuleiro de xadrez, ou *checkerboard* (SIMONETTI, 2009; SIMONETTI et al., 2010; 2016; 2016a; 2016b; ALMEIDA et al., 2013; FERNANDES et al., 2015; SAADLAOUI et al., 2017) foram suavizadas com a adição desses elementos. No entanto, a técnica não proporciona garantia de um ótimo global e sim de um ótimo estacionário viável para o projeto.

Para o procedimento iterativo é necessário um domínio fixo estendido, isto é, uma malha de elementos finitos deve circunscrever todo o domínio de projeto, incluindo as condições de contorno em forças e deslocamentos, cavidades e demais condições iniciais. A partir das iterações, os parâmetros de interesse são avaliados, no caso mais comum, a diminuição de massa mediante o critério de tensão de Von Mises máxima da estrutura (SIMONETTI et al., 2016a, p. 4), conforme a seguinte inequação:

$$\sigma_e^{vm} < RR_k \cdot (\sigma_{i,max}^{vm}) \quad (1)$$

$$RR_{k+1} = RR_k + RE \quad (2)$$

Com σ_e^{vm} e $\sigma_{i,max}^{vm}$ sendo as tensões principais de Von Mises do elemento “e” e máximas da estrutura na iteração efetiva “i”, RR_k a razão de rejeição do k-ésimo estado de equilíbrio, sendo este uma taxa de controle de remoção dos elementos da estrutura e RE , a razão evolucionária que, representa o tamanho do passo do procedimento de otimização.

Em cada iteração, os elementos que satisfazem a desigualdade (1) são retirados da estrutura. O fator RR é aplicado para controlar o processo de remoção dos elementos, sendo repetido até que não haja mais elementos que satisfaçam a inequação. Quando esta situação ocorre, um estado de equilíbrio é alcançado. O processo evolucionário é definido adicionando a RR uma razão de evolução (RE). Assim, um novo ciclo de evolução inicia-se, até que não existam mais elementos a serem eliminados com esta nova RR . A RR será atualizada conforme a equação (2), até a obtenção de uma configuração otimizada, alcançada pelo controle de um parâmetro de desempenho.

O procedimento conhecido como “Hard-kill” do ESO pode ser interpretado como:

$$D_i(j) \begin{cases} D_0 & \text{se } j \in \Gamma_i \\ 0 & \text{se } j \in \bar{\Gamma}_i \end{cases} \quad (3)$$

Em que a $D_i(j)$ trata-se da matriz constitutiva do elemento $j \in \Omega$ na i-ésima iteração, D_0 a matriz inicial do projeto, definida para cada elemento finito, $\Omega = \Gamma_i + \bar{\Gamma}_i$ representa o domínio da estrutura, de modo que $\Gamma_i = \{\Omega / (\sigma_e / \sigma_{VM}^{MAX}(\Omega)) \geq RR_i\}$ refere-se ao conjunto de elementos que não serão removidos e $\bar{\Gamma}_i = \Omega - \Gamma_i = \{\Omega / (\sigma_e / \sigma_{VM}^{MAX}(\Omega)) < RR_i\}$, representando o conjunto de elementos que serão removidos da estrutura.

Sendo assim, uma modificação na heurística de remoção da técnica ESO foi implementada por SIMONETTI et al. (2014a, 2014b, 2016b), com o intuito de suavizar a remoção dos elementos ineficientes, daí o termo “Smoothing ESO”, ou SESO. A remoção dos elementos, conhecida como “Soft-kill”, apresenta uma nova avaliação: os que apresentam uma tensão menor, porém próxima a tensão de Von Mises daquela iteração não serão radicalmente eliminados da malha. A teoria baseia-se na aplicação de uma relaxação, isto é, na interpretação de que se um elemento não for realmente necessário para a estrutura, a sua contribuição estrutural será gradualmente diminuída, até que tal componente não exerça mais influência sobre o todo, tornando-se dispensável. Todavia, os elementos que deveriam ser eliminados pela

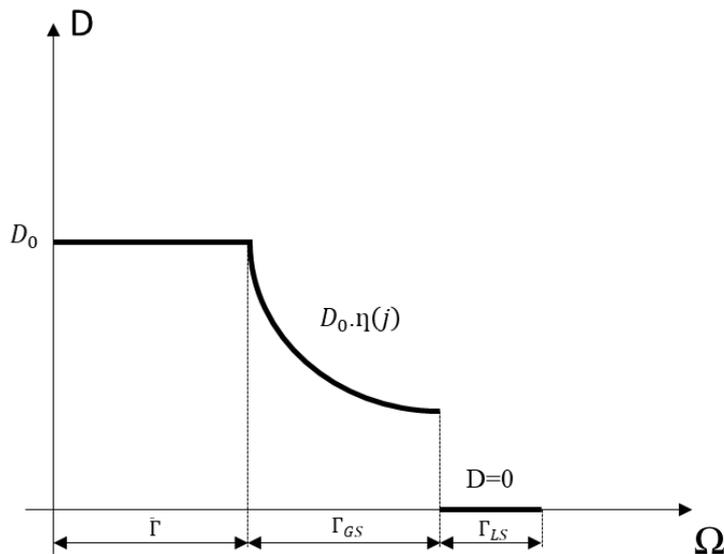
inequação (1), são organizados em n grupos ordenados de acordo com o valor de tensão apresentados.

Desta maneira, o procedimento “Soft-kill”, pode ser interpretado como:

$$D(j) \begin{cases} D_0 \text{ se } j \in \Gamma_i \\ D_0 \cdot \eta_j(\bar{\Gamma}) \text{ se } j \in \Gamma_{GS} \\ 0 \text{ se } j \in \Gamma_{LS} \end{cases} \quad (4)$$

Onde $\bar{\Gamma} = \Gamma_{GS} + \Gamma_{LS}$ representa o domínio que atendem a inequação (1), Γ_{LS} refere-se aos elementos que efetivamente serão excluídos e Γ_{GS} , o domínio que são devolvidos a estrutura. $0 \leq \eta(\bar{\Gamma}) \leq 1$ trata-se da função reguladora que pondera o valor da razão $\sigma_e^{VM} / \sigma_{VM}^{MAX}$ dentro do domínio $\bar{\Gamma}$. De acordo com SIMONETTI et al. (2014a, 2014b, 2016b), a proposta de suavização tem seu desempenho descrito por uma função constante $\eta(j) = \alpha * EY(j)$, em que $EY(j)$ representa o módulo de elasticidade do elemento j. A função contínua, diferenciável em todo o seu domínio $\bar{\Gamma}$, tem sua imagem variando de 0 a 1, conforme Figura 5.

Figura 5 - Suavização do volume de retirada de elementos ao longo das iterações

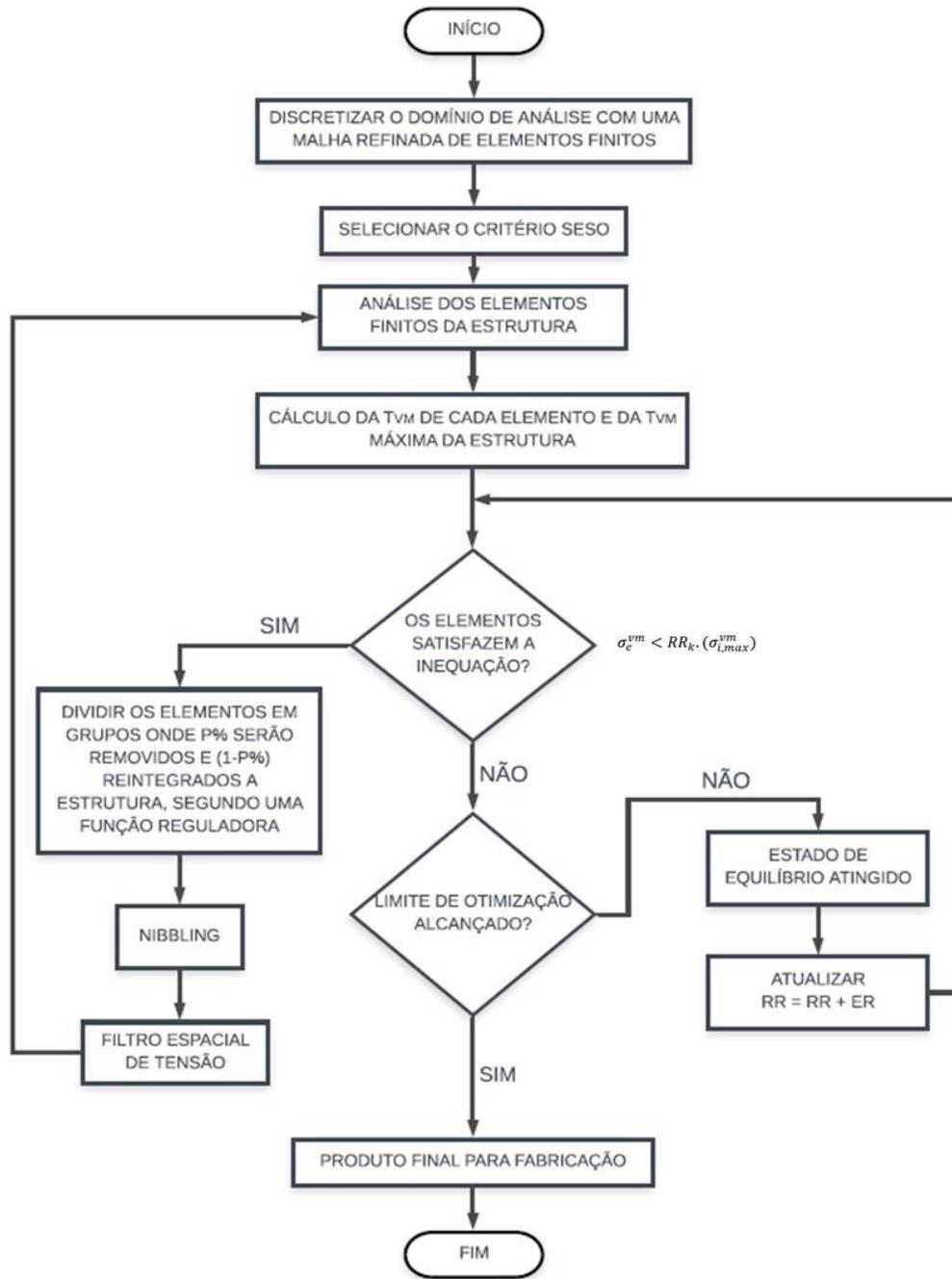


Fonte: Adaptado de SIMONETTI et al. (2014a, 2014b, 2016b)

O procedimento SESO pode também ser descrito através do fluxograma apresentado na Figura 6. O processo é iniciado a partir da discretização do domínio de análise com uma malha refinada de elementos finitos. Em seguida, a análise ocorre com base nos

cálculos de tensão de Von Mises máxima de cada elemento (σ_e^{vm}) e da estrutura ($\sigma_{i,max}^{vm}$), em cada iteração. A partir dos valores coletados, a próxima etapa (looping) é regulamentada pela desigualdade (1), ocorrendo a separação dos elementos em 3 grupos distintos, conforme abordado anteriormente. É importante ressaltar que o grupo de elementos que serão reintegrados à estrutura devido ao seu valor de tensão máxima, são preavaliados pelos processos de Nibbling e Filtro Espacial de Tensão, explorados nos trabalhos de SIMONETTI (2009) e SIMONETTI et. al (2014a, 2014b, 2016b). O processo iterativo é interrompido no momento em que o limite de otimização determinado pelo usuário é alcançado.

Figura 6 - Fluxograma do procedimento iterativo SESO



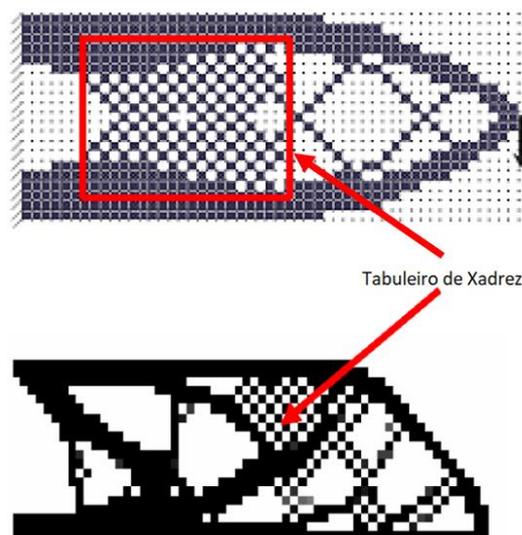
Fonte: Adaptado de SIMONETTI et al. (2009)

2.1.1.2. Problemas Numéricos da OT

2.1.1.2.1. Tabuleiro de xadrez

A remoção de elementos usando a heurística *Hard-kill*, embora favorável computacionalmente, abre caminho para a formação de tabuleiro e pode provocar, inclusive, uma instabilidade na estrutura se um grande número de elementos satisfizer o critério de remoção. Um problema número clássico da OT é a formação do tabuleiro de xadrez “checkerboard”. Trata-se de uma configuração de modelagem, que sequencia os elementos como um tabuleiro de xadrez, conforme Figura 7. Este efeito é prejudicial ao processo de manufatura convencional, pois torna a sua produção inviável (SIMONETTI, 2009).

Figura 7 - Representação da região de instabilidade numérica: tabuleiro de xadrez



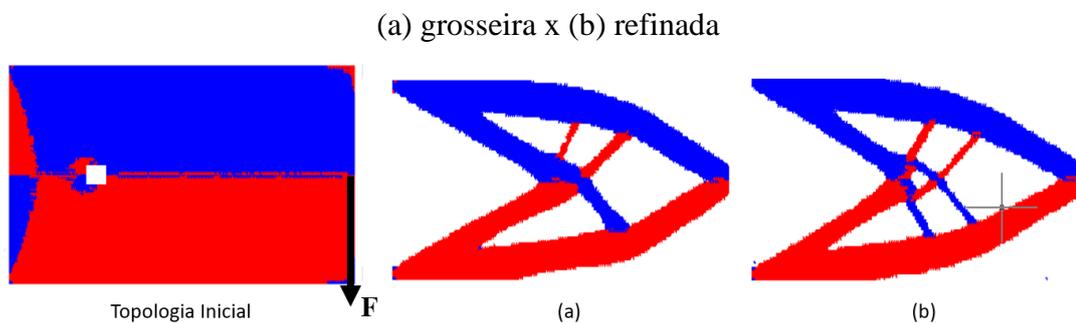
Fonte: LANES & GRECO (2017), SIMONETTI (2009)

Este problema foi exaustivamente estudado por vários pesquisadores durante o processo de consolidação da OT como ferramenta numérica. Além dele, outros dois problemas numéricos conhecidos são: a dependência da malha e os mínimos locais, as quais foram exploradas por SIGMUND (1997), SIGMUND & PETERSON (1998), POUSEN (2002) e MATSUI & TERADA (2004), e serão apresentadas a seguir.

2.1.1.2.2. Dependência da malha

No problema numérico de dependência da malha, diferentes configurações ótimas são encontradas, a partir de níveis distintos de discretização. Na OT, a medida que a malha se torna cada vez mais refinada, há uma tendência de que a topologia ótima apresente maior número de cavidades, apresentando um resultado qualitativamente diferente de uma estrutura com malha mais grosseira, em conformidade com a Figura 8.

Figura 8 - Problema de Dependência da Malha

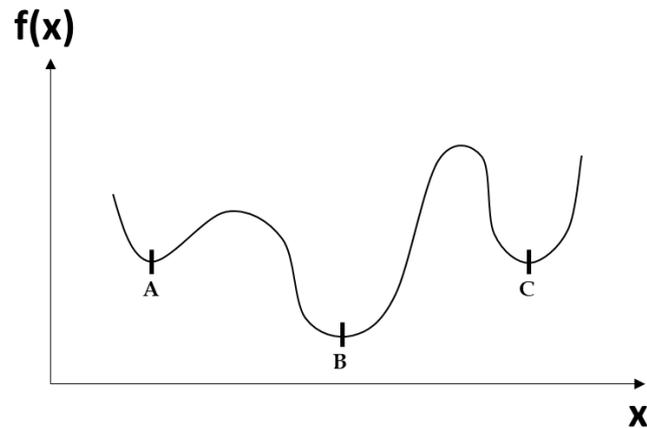


Fonte: MARINHO et al. (2018)

2.1.1.2.3. Mínimos locais

O problema de mínimos locais, refere-se à obtenção de diferentes soluções ótimas para o mesmo estudo ao se escolher parâmetros de entrada distintos para o algoritmo, ou seja, a alteração e combinação de uma ou mais variáveis podem resultar em estruturas distintas, consideradas mínimos locais. Segundo SIMONETTI (2009), um dos desafios relacionados à aplicação da OT refere-se à sensibilidade que o algoritmo possui quando pequenas alterações são realizadas em seus parâmetros, como por exemplo a quantidade de elementos finitos, geometria inicial, razão de rejeição (RR), razão de evolução (ER), entre outros. A Figura 9 ilustra uma função não convexa, com a existência de mínimos locais. No gráfico, A, B e C representam três topologias ótimas distintas.

Figura 9 - Representação de uma função não convexa com diferentes mínimos locais



Fonte: Próprio autor

2.2. Manufatura Aditiva (MA)

O design e acabamento final de produtos é um estágio importante no processo de fabricação, devendo considerar a aplicação desejada, além de suas propriedades mecânicas. Geralmente, em peças mecânicas a propriedade mais importante é sua funcionalidade. No entanto, em setores cujos itens são sofisticados, como os de jóias, a beleza supera as outras funções. Sendo assim, o design deve ser avaliado a partir de múltiplos ângulos (PAKKANEN, 2018).

É possível considerar “o que pode ser modelado” sem levar em conta as restrições de manufatura, uma vertente denominada *product driven design* (PPD), e é comumente utilizada em produtos finais de alto valor. A quantidade de recursos para obtê-los não é poupada para atingir o objetivo (PAKKANEN, 2018). No entanto, o cenário vivenciado normalmente pelos designers parte de restrições econômicas, tendo que optar pelo método de fabricação mais econômico de um produto, a partir do questionamento de “o que pode ser fabricado” (MARCHESI et al., 2015).

Diante dos avanços e tendências da denominada Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0), atrelado à uma mudança recente no perfil do consumidor, atraídos pela possibilidade de um alto nível de personalização dos produtos adquiridos, as grandes organizações têm buscado novas formas e técnicas de fabricação para equipar-se com ferramentas dispostas a oferecer um maior grau de flexibilidade de design e economia na produção. Neste cenário, a MA vem ganhando bastante notoriedade, sendo considerada por

muitos como uma revolução para o design (POSSER, 2019, KOLATSI, 2019). A MA apresenta um conjunto de procedimentos mecânicos que podem ser usados para superar as limitações técnicas das abordagens clássicas (MS). A MA oferece a possibilidade de construir formas, levando à uma economia de tempo e de material, pois há a produção de menos sucata de metal proveniente da subtração (PAKKANEN, 2018). O cliente final não estará pagando a mais pelo material extra removido que acaba terminando em reciclagem, e sim apenas pela matéria prima usada em seu produto.

Em meados de 1960, através do *Battelle Memorial Institute*, a tecnologia foi inicialmente utilizada para fins de prototipagem. O nível de detalhes e a qualidade do acabamento eram baixos, a impressão era lenta, onerosa e restrita a pequenos objetos. Assim, a técnica tinha sua aplicação reduzida para fases iniciais de desenvolvimento de produtos, muitas vezes para testes interativos de forma, encaixe ou funcionalidade, ou seja, com a finalidade de realizar ensaios e experimentos. Pode-se afirmar que a primeira técnica denominada *Stereo Lithography* (SLA) surgiu em 1980 quando o japonês Hideo Kodama, pelo Instituto Municipal de Pesquisa de Nagoya, publicou o seu trabalho “*Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer*” (KODAMA, 1981 apud PAKKANEN 2018). Ainda segundo registros, Hideo não dispunha dos recursos financeiros para continuar com a patente de sua pesquisa.

O primeiro sucesso comercial foi alcançado em 1987 com o método SLA, comercializada pela 3D Systems. Outras tecnologias acompanharam a ampliação tecnológica, como é o caso da *Selective Laser Sintering* (SLS), em 1992. Vale ressaltar também o desenvolvimento da técnica conhecida como *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), de 1994. Após isso, com o aumento da adoção da MA, novas técnicas foram surgindo.

Alguns anos depois, com o aprimoramento e desenvolvimento de novas técnicas, aplicação de novos materiais resistentes ao calor (nylon) e ligas de metal (titânio, alumínio, aço inoxidável), além de uma redução relativa no custo de uso, ampliou-se sua utilização, desencadeando a segunda etapa de adoção da MA como Ferramental Rápido (*Rapid Tooling*). Nos anos 2000, o custo da MA começou a ser suficientemente baixo e, com a obtenção de qualidade satisfatória, iniciou-se a terceira onda de adoção da técnica: a fabricação de produtos finais diretamente com impressoras 3D, ficando conhecido como Manufatura Rápida (MR).

Um grande marco para esta fase foi a implementação de um processo produtivo totalmente digitalizado, obtendo produtos fabricados diretamente a partir de modelos digitais CAD (*Computer Aided Design*) sem a utilização de moldes ou usinagem. A quarta etapa da

adoção, ainda segue em andamento, e é caracterizada pela fabricação pelo próprio consumidor, os quais utilizam equipamentos de impressão 3D. Embora a aquisição de tais maquinários ainda não seja acessível devido ao alto investimento financeiro, uma alternativa tem se mostrado viável: imprimir os projetos em locais que oferecem a estrutura necessária, os conhecidos *hubs* ou *fablabs* (PAKKANEN, 2018).

Segundo VOLPATO (2007), o processo de MA, em uma visão geral, possui certas vantagens e desvantagens em relação aos processos de fabricação tradicional (MS). Na Tabela 1, alguns pontos positivos e negativos são apresentados.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens da aplicação da MA comparado aos processos tradicionais

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Possibilidade de fabricação de peças com geometrias complexas; ▪ Uso de dispositivos ou ferramentais especiais para fixação das peças é desnecessário; ▪ Não há necessidade de troca de ferramental durante no processo, pois o mesmo ocorre do início ao fim em um único meio de processamento; ▪ Não há necessidade de cálculos complexos relacionados a trajetória de ferramentas, uma vez que a trajetória neste tipo de processo ocorre somente de forma bidimensional. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Limitações nas aplicações do processo, devido a disponibilidade ainda restringida de matérias-primas; ▪ Em alguns casos, não atingimento de certas propriedades mecânicas; ▪ Anisotropia do material devido ao processo de manufatura camada a camada; ▪ Escalabilidade de produção limitada, uma vez que o custo de produção se torna elevado à medida que se aumenta o número de peças; ▪ Precisão e acabamento superficial inferiores aos de peças usinadas, sendo necessário pós-processamentos em determinados casos.

Fonte: VOLPATO (2007)

OLIVEIRA (2018) descreve diversas maneiras de agrupar os processos de MA, destacando: a) a classificação de acordo com o padrão de tecnologia de lasers, jato e extrusão e b) a separação de técnicas de acordo com o estado da matéria prima (VOLPATO, 2007), conforme apresentado na Tabela 2. Em processos cuja matéria-prima esteja líquida, geralmente

são utilizadas resinas fotocuráveis como a acrílica e o epóxi. Em processos baseados em matéria-prima sólida, é possível a utilização do poliéster, o policarbonato, plástico, papel, cerâmica, tecido, cera, metais, entre outros. Já em processos baseados em pó, a gama é muito vasta, podendo apresentar qualquer material que possa ser transformado em pó, como por exemplo o náilon, poliamida, cerâmicas, polímeros e metais (VOLPATO, 2007).

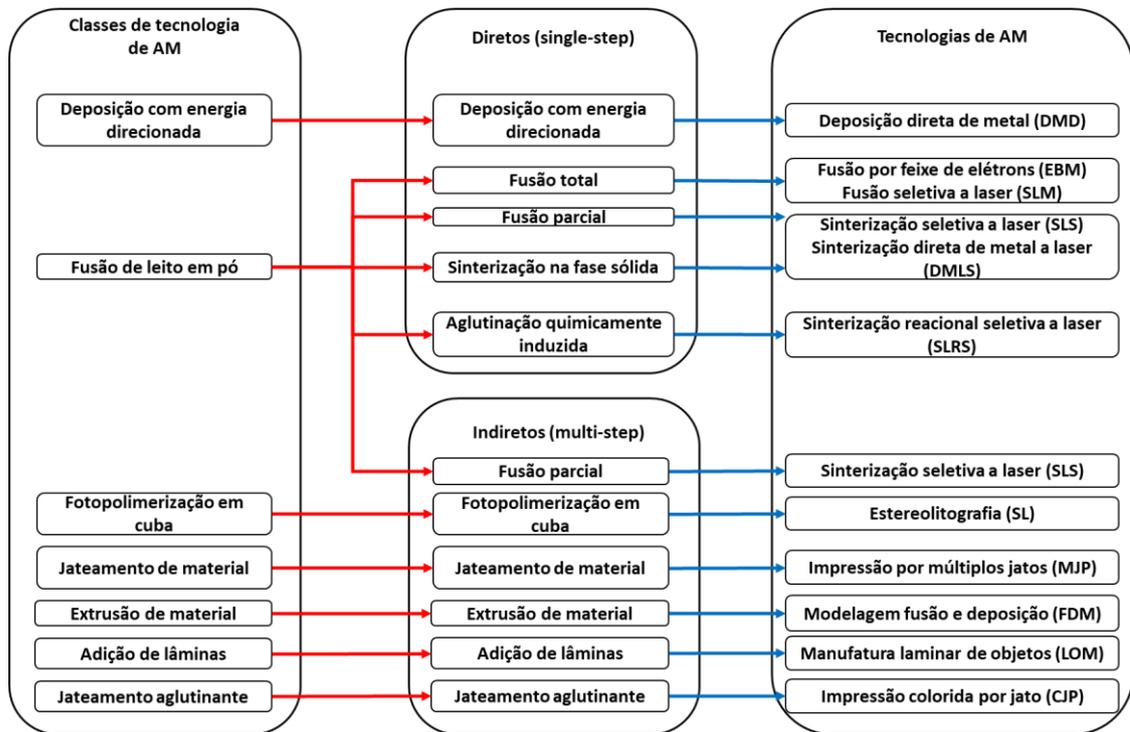
Tabela 2 - Classificação dos processos de MA baseados no estado inicial da matéria-prima

Líquida	Sólida	Em pó
Estereolitografia (<i>Stereolithography – SL</i>)	Modelagem por fusão e deposição (<i>Fused Deposition Modeling – FDM</i>)	Sinterização Seletiva a Laser (<i>Selective Laser Sintering – SLS</i>)
IJP – Invision	IJP – Thermojet	Sinterização a Laser (<i>Laser Sintering – EOSINT</i>)
Impressão a jato de tinta (<i>Ink Jet Printing Polyjet – IJP</i>)	IJP – Benchtop	<i>ProMetal</i> (3DP)
	Manufatura Laminar de Objetos (<i>Paper Lamination Technology – PLT</i>)	Sinterização Direta de Metais por Laser (<i>Direct Metal Laser Sintering – DMLS</i>)
		Fundição Direta de Metal a Laser (<i>Direct Metal Laser Melting – DMLM</i>)

Fonte: Adaptada de VOLPATO (2007)

O problema dessas classificações é que acabam relacionando técnicas totalmente distintas. Deste modo, com a finalidade de estabelecer um padrão de classificação para os métodos de MA, os comitês internacionais ISO e ASTM se uniram para estabelecer na norma ISO/ASTM 52900:2015, sete categorias de processos de MA, apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação da técnica de MA conforme norma ISO/ASTM 52900:2015



Fonte: Adaptada de OLIVEIRA (2018)

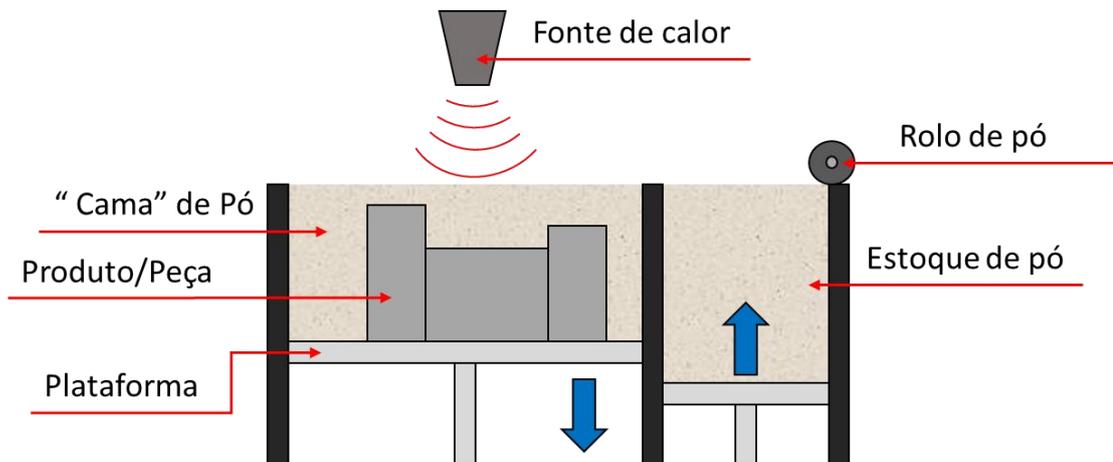
Dentre as classes apresentadas, vale ressaltar a de fusão por leito de pó, como sendo um processo que utiliza energia térmica para fundir regiões delimitadas (OLIVEIRA, 2018). Segundo o autor, verifica-se nesta classe diferentes meios de ligação entre as partículas metálicas, como: sinterização no estado sólido, sinterização líquida parcial, fusão total e ligação quimicamente induzida. Na maioria dos casos, a energia necessária é proveniente de um feixe de laser ou de elétrons.

Cada processo apresentado possui suas aplicações, particularidades, vantagens e desvantagens, de modo a não existir um processo ideal. Dessa forma, a escolha do processo a ser utilizado deve basear-se, principalmente, no produto desejado, levando em conta fatores como as propriedades mecânicas, físicas e superficiais desejadas, material utilizado e os custos para a sua obtenção.

2.2.1. Fusão de leito em pó

O processo de fusão de leito em pó utiliza uma fonte de energia térmica. As técnicas que se enquadram nesta classificação, são as que utilizam um berço preenchido com material em pó. Dentre elas, o primeiro processo enquadrado é o SLS que, com o auxílio de um rolo, o material é espalhado em uma fina camada de aproximadamente 1mm, sobre uma plataforma, onde o laser será utilizado para sinterizar as partículas na forma em que foi programado, ver Figura 10. Após a solidificação da primeira camada, o rolo distribui uma nova, repetindo o processo até a construção do produto solicitado (OLIVEIRA, 2019). Outro processo que também se enquadra nesta classificação é o DMLS, que se assemelha muito ao SLS, não sendo necessário a utilização de ligantes e a ação do laser sendo feito em uma atmosfera inerte. A técnica será melhor explorada na próxima seção.

Figura 10 - Ilustração do Processo SLS



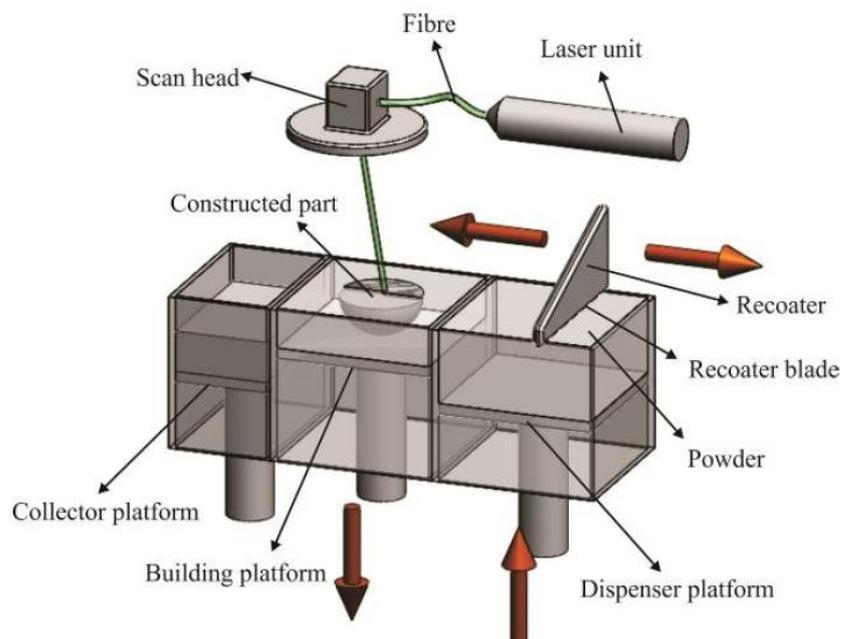
Fonte: Adaptada de FERNANDES (2019)

2.2.2. Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

A técnica de sinterização direta de metal por laser foi desenvolvida de forma pioneira pela empresa EOS GmbH, na Alemanha, capaz de trabalhar com metais sob a forma de pó, como as ligas de alumínio, cobre, cobalto, níquel, titânio, etc. Assim, o processo pode ser descrito como um método de produção, camada a camada, através da sinterização de pós metálicos, por ação de uma fonte de energia térmica (TEAN SU, 2013).

A construção do componente ocorre de forma similar à técnica SLS, em que inicialmente é necessária uma distribuição do pó metálico sobre a plataforma de trabalho, situadas dentro de um compartimento com gás inerte, minimizando a oxidação da matéria prima. Em seguida, a fonte de energia (laser), efetua a varredura da área correspondente a primeira camada da peça, sinterizando o material. Após esta etapa, a plataforma desce um nível, correspondente a espessura da primeira camada, criando assim as condições para que a próxima camada seja distribuída e sinterizada. A Figura 11 representa um esquema do processo.

Figura 11 - Esquema representativo do processo DMLS



Fonte: BINELI et al. (2011)

Segundo a empresa desenvolvedora, dependendo do tamanho da peça, em poucas horas a máquina poderá produzi-la com alta precisão e complexidade. No entanto, dependendo da aplicação do produto, é necessário um pós tratamento como têmpera ou tratamento superficial. Entre as vantagens do processo, destaca-se que todo o material não sinterizado pode ser removido da câmara e reutilizado (TEAN SU, 2013; OLIVEIRA, 2019). Além disso, o procedimento pode ser utilizado para obtenção tanto de protótipos como de produtos finais.

Diversos parâmetros estão envolvidos no processo DMLS e, assim como, em qualquer processo de fabricação, são necessários controle e uma combinação ideal entre eles para obter um nível aceitável de qualidade do produto final. De acordo com OLIVEIRA (2019), entre esses parâmetros, destacam-se a velocidade de varredura do laser, potência do laser, taxa

de deposição, espessura da camada em pó depositada, distância entre as linhas de varredura, fluxo e tipo de gás utilizado para controle atmosférico, orientação do produto sobre a plataforma de construção, entre outros. Tais variáveis influem diretamente nas propriedades mecânicas do produto final, como sua densidade, resistência mecânica, precisão dimensional; bem como no acabamento da peça, como a rugosidade superficial (TEAN SU, 2013). Segundo o autor, a técnica possui desvantagens que necessitam de atenção, especialmente no controle do seu processo. Altos gradientes de temperatura e taxas de densificação acabam gerando tensões internas elevadas, resultado em distorções na peça. Outro ponto que merece atenção trata-se do acúmulo e formação de impurezas na plataforma de trabalho, as quais podem induzir o aumento da rugosidade superficial. É comum encontrar em complemento ao processo DMLS, operações adicionais para garantia da qualidade superficial das peças produzidas, como por exemplo o jateamento de esferas.

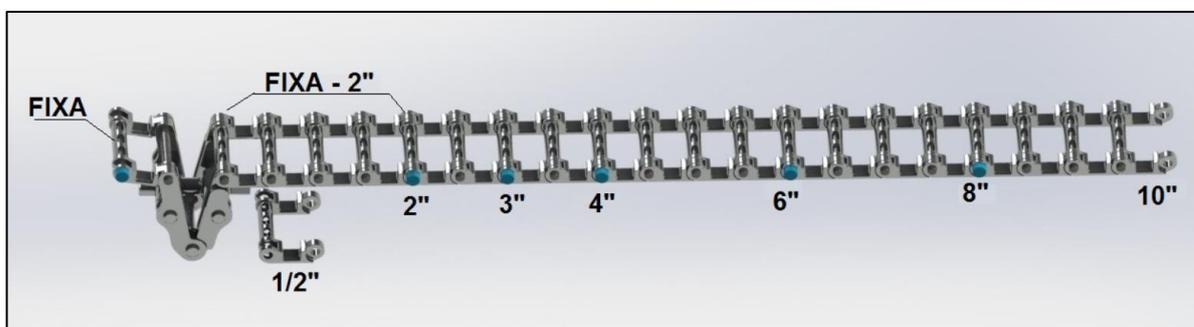
3. ESTUDO DE CASO: ACOPLADORA FLEXÍVEL (BR 10 2012 026038-7 A2)

Um acoplamento provisório para tubulação é qualquer tipo de encaixe ou dispositivo auxiliar usado de forma a alinhar dois ou mais ductos para realizar sua união por soldagem, sendo muito utilizado na fabricação ou manutenção das linhas de tubulação. Podem ser rígidos ou flexíveis, dependendo da quantidade de movimento que o tubo é submetido. A maioria das instalações tubulares exige que vários comprimentos de tubos sejam unidos ou cortados para facilitar as mudanças de direção e travessia de obstáculos, situações comumente encontradas em uma planta industrial. Isto requer um método rápido de ligação entre as seções, mantendo integridade dos tubos durante o processo.

A presente invenção, desenvolvida pela empresa *YPY Eng.*, trata-se de uma acopladora flexível, composta de presilhas especialmente desenvolvidas para formar uma cinta ajustável de acordo com o tamanho da tubulação, podendo ser adicionadas ou removidas, conforme ilustrado na Figura 12. Desse modo, é evitada a necessidade de desmontar o acoplamento para adicionar os grampos, proporcionando um ganho de produtividade na operação.

Uma outra vantagem da ferramenta, segundo o inventor, trata-se da utilização de parafusos de alta resistência com ponta anti-rotacional, impedindo a danificação dos tubos. Além disso, o instrumento permite a correção de desvios de ovalização, avaria comumente originada durante a fabricação e/ou transporte das tubulações, que dificulta a montagem e acoplamento. A ferramenta permite realizar também montagens do tipo tubo-curva, tubo-conexão T, tubo-flange e ainda tubo-redução.

Figura 12 - Disposição das presilhas de acordo com a dimensão da tubulação

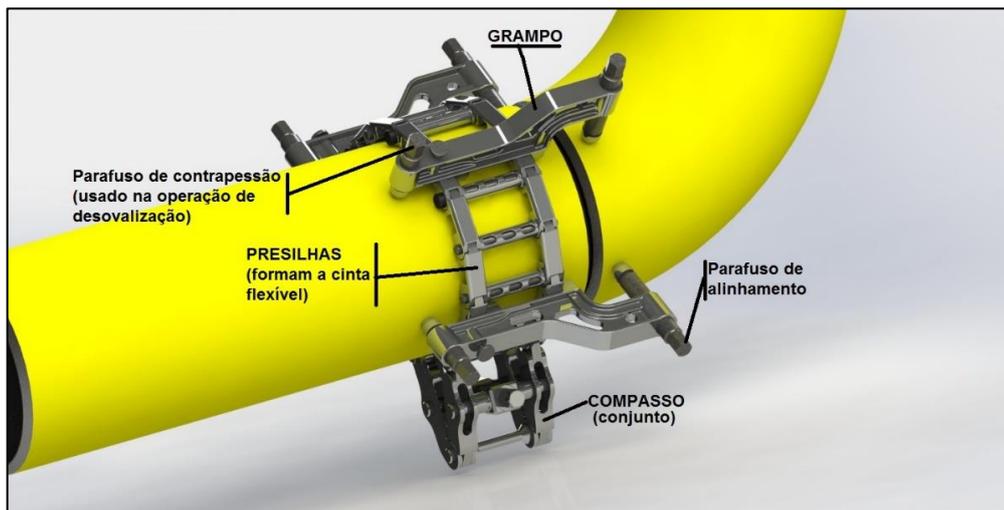


Fonte: YPY ENG 2018. Disponível em: <<https://www.ypycom.com.br/>>.

Para ajustar a posição das presilhas na tubulação durante a conexão, são utilizados grampos, os quais possuem um parafuso de ajuste e um parafuso de estabilização. De acordo com o inventor, o primeiro tem a função de fixar a presilha e o grampo na tubulação. Já o segundo, tem como função controlar a inclinação do grampo, garantindo sua posição paralela e estável durante a montagem. O grampo apresenta duas garras inferiores que permitem sua montagem e desmontagem a qualquer momento e em qualquer presilha. Em relação ao seu processo de fabricação, atualmente o grampo é obtido por um método de microfusão, capaz de conferir ao componente excelente precisão dimensional e impecável acabamento superficial, reduzindo ou eliminando a necessidade de pós-processamentos como a usinagem.

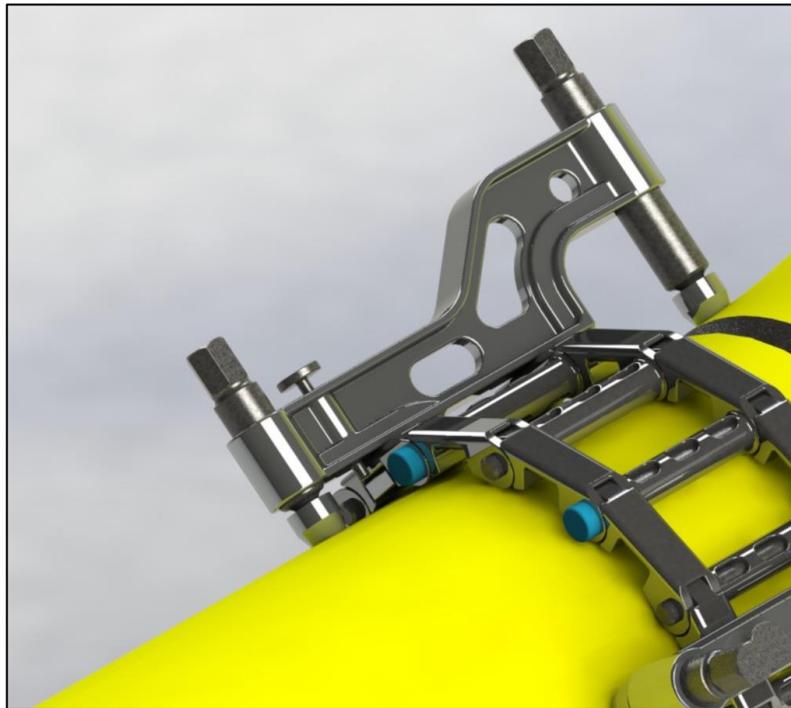
As Figuras 13 e 14 apresentam o dispositivo em destaque, evidenciando a sua proposta de acoplagem. Vale ressaltar que, na Figura 14, o grampo apresenta suavizações de peso, oriundas de um processo “manual” de otimização realizado pelo inventor através de análises CAE (*Computer Aided Engineering*).

Figura 13 Aplicação da acopladora na montagem do tipo tubo-curva



Fonte: YPY ENG 2018. Disponível em: <<https://www.pycom.com.br/>>.

Figura 14 - Grampo em detalhe (Otimização via CAE)



Fonte: YPY ENG 2018. Disponível em: <<https://www.pycom.com.br/>>.

4. METODOLOGIA

Nesta seção será apresentado o procedimento numérico adotado para avaliação da otimização topológica em um grampo de uma acopladora flexível. O grampo modelado neste trabalho foi previamente projetado pela empresa *YPY Eng* e descrito na patente BR 10 2012 026038-7 A2. Os resultados numéricos obtidos, ou seja, a estrutura otimizada obtida neste estudo será comparada com os resultados alcançados de forma empírica pelo inventor. O método de otimização SESO (*Smoothing ESO*) será adotado.

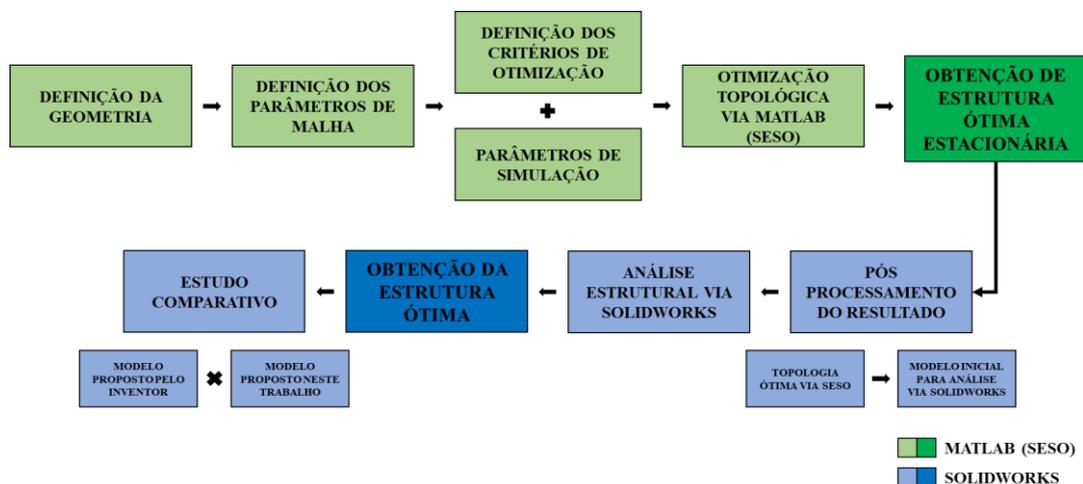
As simulações serão realizadas numericamente por meio do software MATLAB R2016a e, as análises posteriores, através do SolidWorks 2019. Serão executadas em uma máquina própria, com processador Intel® Core™ i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz, 64bits, memória interna de 8GB + SSD 128GB. O tempo médio gasto para a execução das simulações será analisado.

A metodologia deste trabalho consiste em 4 etapas:

- a) Definição da geometria (condições de contorno, restrições, etc.);
- b) Definição dos parâmetros de malha;
- c) Definição dos critérios de otimização e parâmetros de simulação;
- d) Pós-processamento dos resultados.

As quatro etapas citadas acima serão descritas em detalhes nas seções seguintes. O esquema apresentado na Figura 15, tem intuito de oferecer uma visão geral da metodologia utilizada no presente trabalho.

Figura 15 - Esquema representando a metodologia utilizada no trabalho



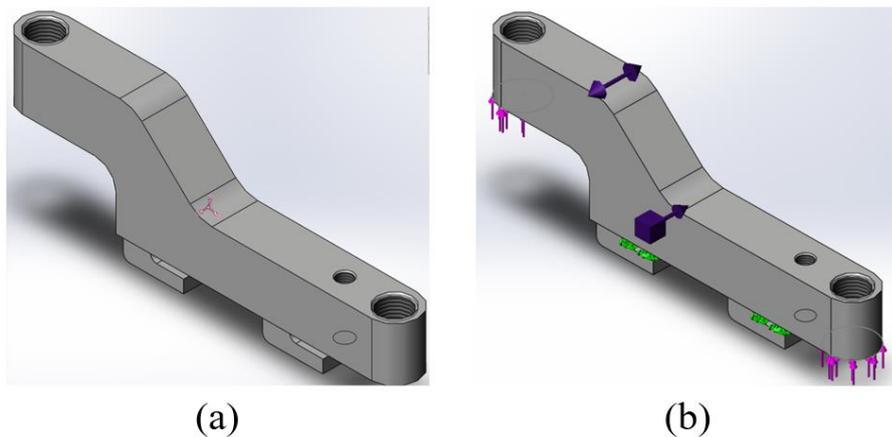
Fonte: Próprio autor.

4.1. Definição da geometria – Domínio de solução

A primeira etapa do trabalho consistiu na definição do domínio de solução computacional, definindo a região de análise da geometria. A geometria modelada tem como base a primeira versão do componente utilizado pelo inventor, antes dos estudos de suavização de massa com o auxílio do CAE. A modelagem escolhida é apresentada na Figura 16 e, na Figura 17, é possível observar com clareza as regiões de aplicação das cargas, bem como as garras do grampo, representando as regiões de apoio. Na Figura 16.b, é possível visualizar dentre as condições de contorno, as regiões onde serão aplicadas as cargas, ilustradas pelas setas na cor rosa. Já as restrições e regiões de apoio, situam-se nas garras do grampo, sendo representadas pelas setas na cor verde.

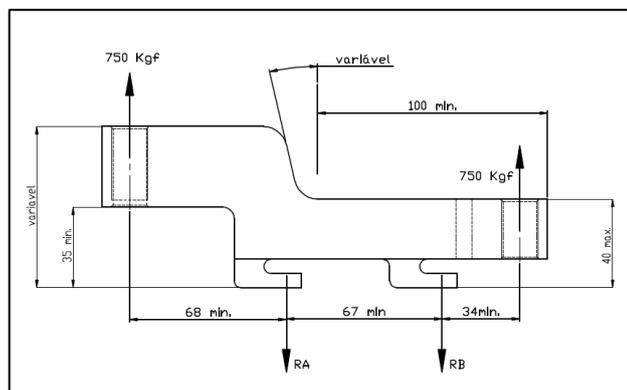
Figura 16 - Geometria do grampo utilizado

(a) domínio de projeto e (b) condições de contorno.



Fonte: INVENTOR (2018) Adaptada.

Figura 17 - Dimensões e Diagrama de Corpo Livre (DCL) do domínio de solução



Fonte: Próprio autor.

4.2. Definição dos parâmetros de malha

A segunda etapa do trabalho trata-se da discretização do domínio de solução. Nesta etapa, o domínio foi subdividido em uma malha de elementos finitos, propondo o elemento finito hexaédrico regular de oito nós, baseado no trabalho de Liu & Tovar (2014). Para este fim, deve-se implementar a sua matriz constitutiva tridimensional para um elemento isotrópico, cargas e restrições dentro do espaço tridimensional e levando-se em conta as sensibilidades das mudanças devida a consideração do procedimento de otimização topológica na análise elástica durante a remoção de material. Um gerador automático é necessário para facilitar a geração do modelo a ser discretizado. O número total de elementos e nós obtidos será apresentado posteriormente.

4.3. Definição dos critérios de otimização e parâmetros de simulação

Na terceira etapa do trabalho, foram definidas as formulações do problema de otimização proposto, abordando os critérios de otimização e os parâmetros de simulação pré determinados, os quais serão responsáveis por controlar o processo iterativo.

4.3.1. Formulações do Problema de Otimização

O procedimento de OT utilizado neste trabalho é bidirecional, pois permite a adição e remoção de elementos durante todo o processo iterativo. Na técnica SESO, uma estrutura é otimizada removendo p% de elementos ineficientes da estrutura e devolvendo (1-p%) desses elementos, suavizando o procedimento “*Hard-kill*” do ESO. Essa heurística é denominada “*Soft-kill*”. Portanto, para minimizar a energia através da remoção de elementos, é evidente que a maneira mais eficaz é eliminar os elementos que têm os valores mais baixos de modo que o aumento na energia seja mínimo. Assim, considerando o problema de otimização de topologia como minimizando a energia de deformação da estrutura, levando em conta o equilíbrio tem-se $W = 2U$.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } U(X) &= \frac{1}{2} u^T K u = \sum_1^{NE} \frac{1}{2} \int_{V_e} \varepsilon_e^T E_e(x) \varepsilon_e dV_e \\ \text{sujeito a } K u &= F \\ V(X) &= \sum_{i=1}^{NE} x_i V_i - \bar{V} \leq 0 \\ X &= \{x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad \dots \quad x_N\}, \quad x_i = 1 \text{ ou } x_i = 0 \end{aligned} \tag{5}$$

Onde E_e é a matriz de elasticidade do elemento, ε_e é o vetor das deformações do elemento, V_e é o volume de um elemento, NE é o número de elementos finitos da malha, K é matriz de rigidez, $Ku = F$ é equação de equilíbrio onde F é o vetor das cargas aplicadas na estrutura, x_i é a variável de projeto do i -ésimo elemento e X é o vetor das variáveis de projeto.

4.3.2. Critérios de otimização e parâmetros de simulação

Na Figura 16.b, nota-se que a permissão para retirada de elementos ocorrerá na seção transversal do componente, ao longo do todo seu comprimento, com exceção as regiões de ancoragem com a presilha da cinta metálica. A rigidez/flexibilidade é um dos fatores principais que devem observados nos projetos de estruturas, com base em sua aplicação. No entanto, nem sempre o projeto mais rígido é o mais forte. Neste trabalho, o SESO foi implementado para minimizar a rigidez, isto é, minimizar o crescimento da energia (*Compliance*) sobre um critério de mínimo volume. Além disso, foi criado um índice de performance cujo objetivo é monitorar o procedimento de otimização detectando variações bruscas na energia devido ao rompimento de barras ou a retirada excessiva de elementos do domínio de projeto.

Liang et al. (2002) usou o produto (*compliance * volume*) como um índice de desempenho para um procedimento denominado Performance-Based Optimization (PBO) utilizado como um dos critérios de otimização. Assim, o procedimento evolucionário deve ser interrompido quando o índice de desempenho cai drasticamente. Os parâmetros de otimização e as propriedades do material utilizado são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de entrada e propriedades do material

Parâmetros Importantes <i>(Inputs)</i>	Valor médio (m)
nelx (mm)	180
nely (mm)	75
nelz (mm)	8
E (MPa)	2.1E5
μ	0.30
F (kN)	750 (2x)
Maxloop	60
RR (Taxa de remoção de elementos)	0.108
ER (Razão evolucionária)	0.01
V_{frac} (Fração de volume)	0.50/0.40/0.35/0.30/0.28/0.25

Fonte: Próprio autor.

4.4.Pós-Processamento dos resultados

Depois do procedimento de OT, um ótimo estacionário é alcançado e uma estrutura viável para projeto deve ser processada. Assim, o pós-processamento se inicia a partir da transferência do modelo para o SolidWorks. O resultado numérico obtido será comparado com os resultados apresentados no grampo atual, realizando avaliações das propriedades mecânicas como tensões máximas de Von Mises, deflexão e estrição.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentadas as análises realizadas a partir da estrutura inicial apresentada na seção 4.1. Os resultados serão divididos em duas subseções: a primeira abordando a estrutura ótima obtida pelo método de otimização SESO e, a segunda exibindo o estudo comparativo realizado no modelo pós processado.

5.1. Modelo otimizado via SESO

Conforme descrito na Tabela 4, foram avaliadas as configurações para diferentes restrições de volume. Vale ressaltar que, nenhum dos seis processos iterativos realizados foram interrompidos devido ao atingimento do número de iterações máxima, ou seja, ótimos estacionários foram alcançados quando o critério de parada em energia é violado. O critério de parada, baseado no trabalho de LOYOLA et. al (2018), é definido como a mudança na função objetivo nas últimas 20 iterações, equação (6), que é considerado um número adequado de iterações para o estudo de convergência. Isso implica que o processo terá um mínimo de 20 iterações, já que o critério não é aplicado até que o número da iteração alcance 20.

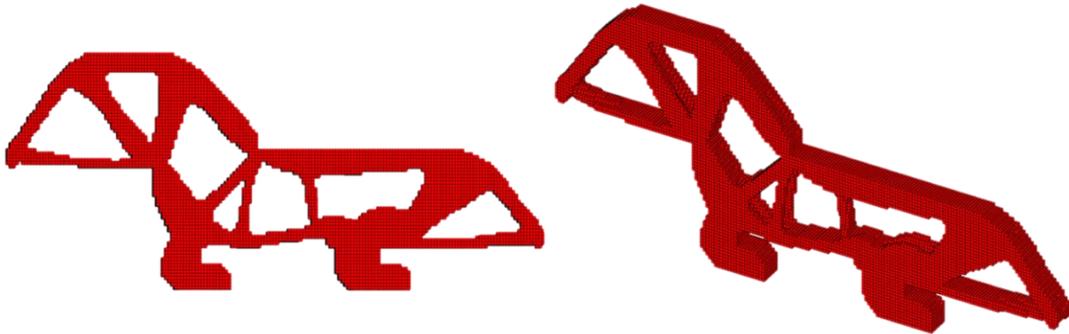
$$\varepsilon_i = \frac{\sum_{i-19}^{i-10} C_i - \sum_{i-9}^i C_i}{\sum_{i-9}^i C_i} \quad (6)$$

onde ε_i é o critério de parada, com valores típicos variando entre 0,0001 e 0,001.

Durante os testes realizados, notou-se tanto a sensibilidade da técnica às variações dos *inputs* como também a dependência da malha, conforme descreve SIMONETTI (2009). Após finalizado os processos iterativos, observou-se um padrão bem evidente nas cavidades criadas, sendo melhor desenvolvidas pelo programa ao passo que o valor definido de V_{frac} era reduzido.

Com o intuito de visualizar com mais clareza a criação e modelagem das cavidades durante o processo iterativo, a estrutura ótima escolhida para as discussões parte de um mínimo alcançado quando $V_{frac} = 0.25$. A Figura 18 apresenta a topologia otimizada da estrutura, convergindo para o modelo ótimo na iteração nº 28, após aproximadamente 50 min.

Figura 18 - Estrutura ótima obtida pelo método de otimização SESO

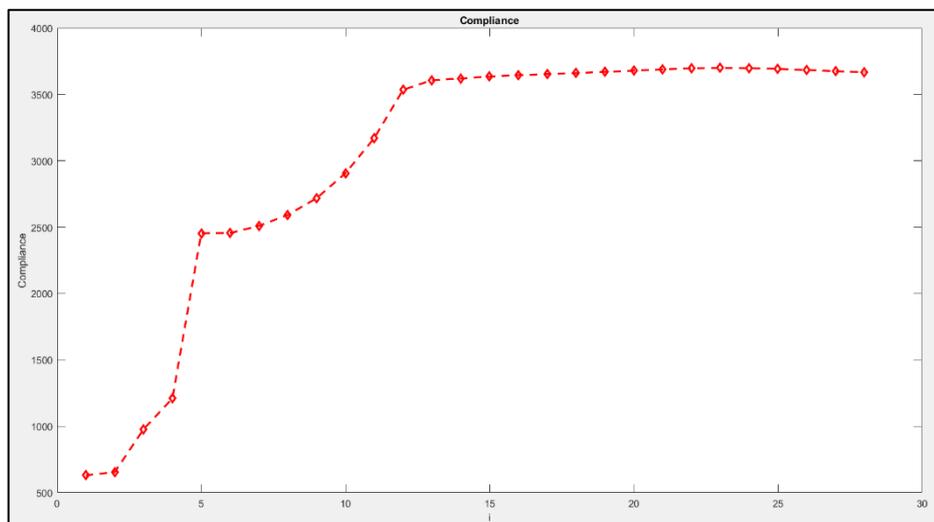


Fonte: Próprio autor

É possível visualizar que a estrutura exibe em sua região central cavidades principais bem modeladas, divididas por nervuras situadas nas extremidades do corpo. A configuração da estrutura remete à um perfil treliçado, resultado muito comum na utilização da metodologia SESO. Tanto as regiões de aplicações das forças, quanto os apoios apresentam a maior concentração de massa. Não houveram regiões de instabilidade numérica visíveis na estrutura demonstrando a formação de tabuleiro de xadrez, tradicional problema em subprodutos da OT (LANES & GRECO, 2017).

As Figuras 19 e 20 exibem, respectivamente, a evolução da função objetivo (*Compliance*), e a redução gradativa do volume até o critério de parada ser alcançado.

Figura 19 - Histórico da evolução da Compliance (FO) por número de iterações

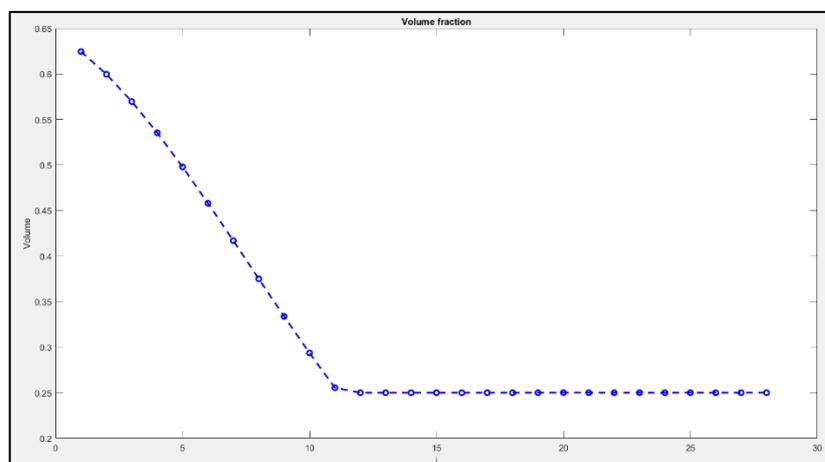


Fonte: Próprio autor (via *Matlab*)

O gráfico apresentado na Figura 19 foi elaborado com base no valor da função objetivo coletada em cada iteração, gerada a partir da equação de minimização de energia de deformação (5). Observa-se que nas primeiras iterações, houve um crescimento abrupto no valor da função objetivo, seguido de um estado de equilíbrio com início na iteração nº 12. Este comportamento pode ser justificado pela remoção de uma grande quantidade de elementos nas primeiras iterações devido ao valor utilizado para RR. Destaca-se aqui, que a configuração ótima é constituída por elementos com elevada energia interna, necessários para suportar o esforço aplicado.

O termo *Compliance* vem sendo largamente utilizado como um critério de otimização no campo da análise estrutural, a fim de alcançar estruturas com alto nível de flexibilidade. Sendo assim, pode-se interpretar com o gráfico crescente, que ocorre a minimização de energia. A Figura 20 exibe o histórico de evolução do volume evidenciando uma grande retirada de elementos nas iterações iniciais, se estabilizando no nível previamente definido $V_{frac} = 0.25$. Essa remoção acelerada é justificada pelo valor atribuído a RR no processo iterativo. Assim, a remoção de um número maior de elementos prova a criação de mais cavidades nas primeiras iterações. Após esta etapa, o procedimento se concentra na modelagem das mesmas, até a obtenção da topologia ótima. Observa-se que o procedimento de otimização não para quando o volume mínimo prescrito é alcançado e sim quando o critério de parada definido na equação (6) é alcançado. Esse comportamento explica a necessidade de mais iterações mesmo após o volume prescrito ser alcançado.

Figura 20 - Taxa de redução de volume ao longo do processo iterativo



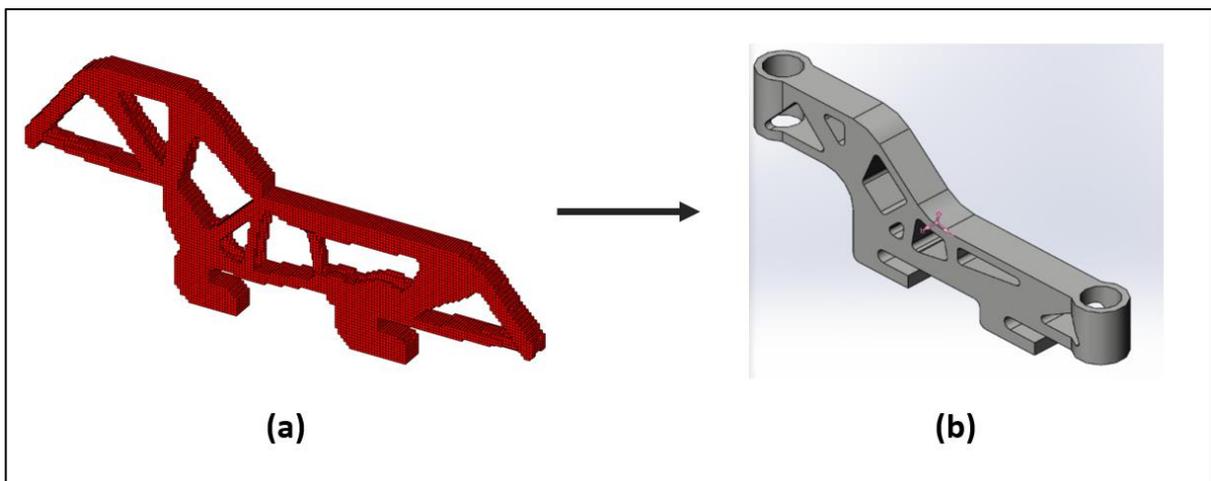
Fonte: Próprio autor (via *Matlab*)

5.2. Análise estrutural do modelo otimizado

Conforme mencionado anteriormente, o grampo, em sua topologia atual, já possui suavizações alcançadas através do trabalho realizado pelo inventor, observando propriedades como tensões de Von Mises, deflexão e estrição do componente. A partir da estrutura ótima obtida via Matlab apresentada na Figura 18, o modelo foi preparado para dar início ao estudo comparativo por meio de uma análise estrutural via SolidWorks 2019. Nesta seção serão apresentados os ajustes realizados no modelo otimizado, bem como os resultados dos ensaios estruturais.

Inicialmente, foi necessário realizar um processo de transcrição da estrutura otimizada do Matlab para o SolidWorks. Para isso, respeitou-se as dimensões iniciais do modelo apresentadas na Figura 16, acrescentando as cavidades obtidas pelo estudo via SESO, exibidas na Figura 18. Vale ressaltar que as mesmas apresentaram quinas vivas em suas extremidades, sendo necessário então um ajuste nos contornos, considerando um acabamento com raio padrão de 2mm, de modo a adequar a estrutura para o processo de fabricação. Em seguida, os furos de fixação dos parafusos de ajuste e estabilização foram incluídos, convergindo no modelo, de acordo com a Figura 21, utilizado na primeira análise estrutural via SolidWorks.

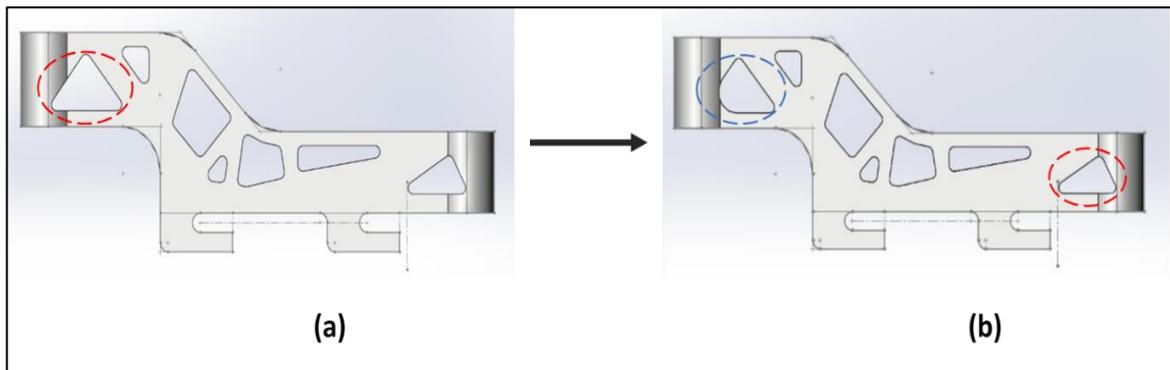
Figura 21 - Transcrição da estrutura ótima via Matlab (a) para o modelo a ser utilizado na 1ª análise estrutural via SolidWorks (b)



Fonte: Próprio autor

Definido as restrições, regiões de aplicação das forças e características da malha de elementos finitos a ser utilizados no estudo, partiu-se para a primeira análise estrutural. O estudo baseou-se na avaliação das tensões de Von Mises máximas da estrutura, até alcançar o modelo final, no qual foram realizados os testes de deflexão e estrição. O limite de escoamento do ensaio foi de 758MPa. Na primeira análise, notou-se a existência de um ponto de deformação ($\sigma_{max}^{VM} = 955\text{MPa}$) na região do furo de fixação do parafuso esquerdo, devido a cavidade prevista na região, como pode-se observar na Figura 21a. Desta forma, houve a necessidade da primeira adequação na dimensão da cavidade. Na segunda análise de tensões de Von Mises, notou-se que a modificação surtiu efeito positivo, reduzindo drasticamente a tensão máxima na estrutura. No entanto, foi verificado também, na região do furo de fixação do parafuso direito, um ponto de tensão máxima ($\sigma_{max}^{VM} = 555\text{MPa}$), vide Figura 22. Embora abaixo do limite de escoamento, optou-se por modificar a dimensão da cavidade na região. Até esta etapa, o modelo apresentava um peso de 572g, equivalente à 58% do peso inicial (980g.).

Figura 22 - Primeira análise: adequação de dimensão da cavidade



Fonte: Próprio autor.

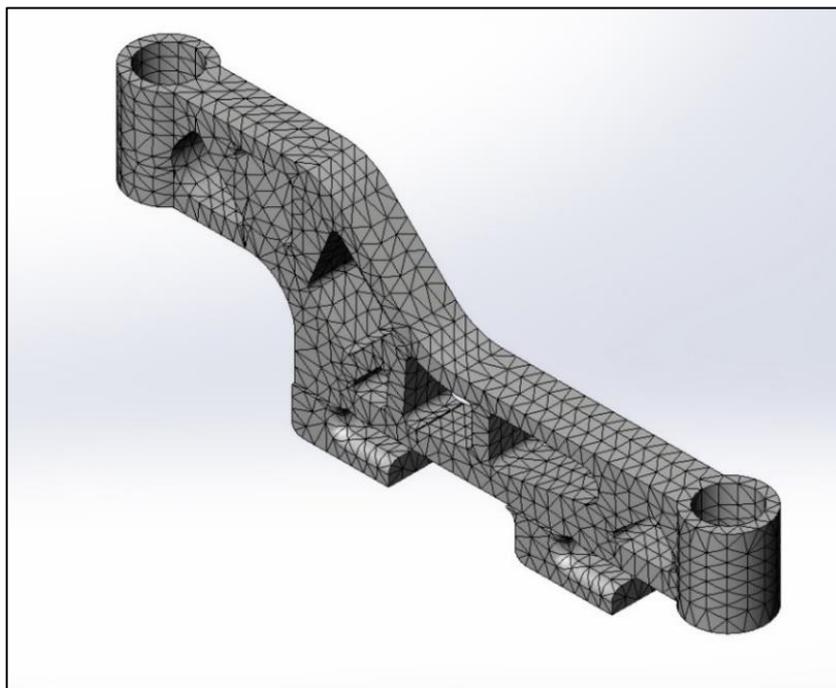
Em seguida, na terceira análise, foram realizadas modificações nas demais cavidades do modelo, redimensionando-as e criando um padrão entre as mesmas, como o paralelismo e distância fixa em relação às extremidades do grampo. O resultado foi uma redução no peso da estrutura (528g.) e um leve aumento no valor da tensão máxima ($\sigma_{max}^{VM} = 578\text{MPa}$). Partindo para a quarta análise estrutural, foi executado um trabalho de redução na espessura da alma do grampo, de 16mm para 14mm, com exceção as garras do grampo, resultando em um peso de 478g.

Devido às modificações realizadas nas análises 2, 3 e 4, notou-se que tensão de Von Mises máxima da estrutura ($\sigma_{max}^{VM} = 538\text{MPa}$) passou a se localizar na região da garra do

grampo. Na quinta análise, houve a tentativa de reduzir o valor da tensão por meio de suavizações em quinas vivas na região, alcançando o valor de tensão máximo equivalente à $\sigma_{max}^{VM} = 464$ MPa, bem abaixo do limite de escoamento da estrutura. A estrutura ótima final, obtida após a quinta análise estrutural, apresentando um peso de 469g, correspondente à uma redução de peso de 62%. A Figura 23 apresenta a estrutura ótima final. Para as análises estruturais, foi aplicada uma malha sólida de elementos finitos sobre o modelo, utilizando o elemento finito tetraédrico (padrão do SolidWorks), assim como na análise efetuada pelo inventor. Análises relacionadas à influência do refinamento de malha sobre os pontos de máxima tensão não foram abordados no presente trabalho.

Figura 23 - Estrutura ótima proposta no presente trabalho

Total de 8279 elementos (Tam. unitário: 4,1882 mm). Nº de nós: 14963.

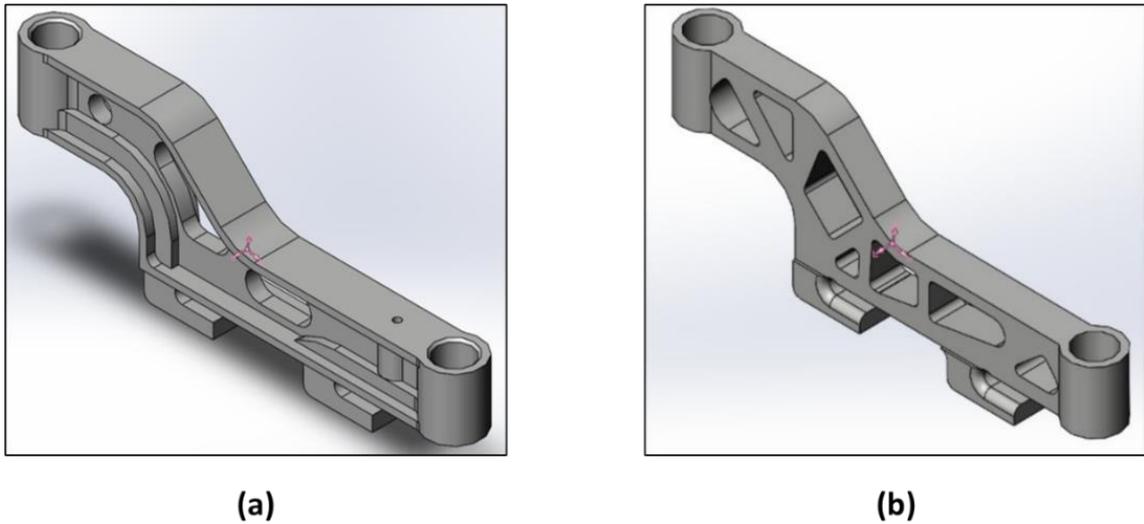


Fonte: Próprio autor.

Comparando a estrutura ótima deste trabalho com o modelo obtido pelo inventor, é possível avaliar certas semelhanças e diferenças. Os pontos de tensões de Von Mises máximas ficaram situados na mesma região, isto é, na garra do grampo. No modelo do inventor, é possível visualizar a existência de reforços próximo à garra traseira, na tentativa de robustecer a região. Em ambos os casos, as regiões dos furos de fixações dos parafusos foram mantidas intactas e, por outro lado, as regiões com maior concentração de cavidades localizam-se no

centro dos grampos, apesar do modelo deste trabalho apresentar maior quantidade. A Figura 24 apresenta uma comparação de ambas. Outro ponto que difere as estruturas são a presença de flanges no modelo do inventor, devido a uma menor espessura da alma.

Figura 24 - Comparativo entre os modelos otimizados do grampo (a) e (b) presente trabalho.



Fonte: Próprio autor.

Após a obtenção da estrutura ótima, foram realizados os testes de deflexão e estrição do componente, também pelo SolidWorks. Os ensaios de deflexão e estrição são importantes para simular sua aplicação no campo, analisando as consequências dos esforços aplicados sobre o mesmo. O primeiro ensaio aborda as possíveis deformações existentes na estrutura, a partir da aplicação de uma ou mais forças. Já o ensaio de estrição, tem como objetivo apresentar as regiões com maiores tendências de diminuição da seção de um corpo, mediante a aplicação das cargas. A Tabela 5 apresenta uma análise resumida, confrontando as principais propriedades entre o modelo ótimo obtida no presente trabalho e a estrutura otimizada pelo inventor. O estudo completo pode ser visualizado no Anexo 1.

Tabela 5 - Comparativo entre os modelos otimizados

	Modelo Otimizado (Inventor)	Modelo Otimizado (Presente Trabalho)
Nº de iterações	35	5
Nº de cavidades	3	7
Peso da estrutura em Kg (Percentual de redução)	0,475 (51,5%)	0,469 (52,1%)
Tensão máxima da estrutura (MPa)	409	464
Deflexão (mm)	0,339	0,375
Estricção (mm)	0,00148	0,00199
Fator de segurança	1,9	>2,0

Fonte: Próprio autor.

Observa-se que o modelo proposto no presente trabalho apresentou um percentual de redução de peso levemente maior que o modelo do inventor. Por outro lado, exibiu maior valor de tensão máxima, embora bem abaixo do limite de escoamento. Os resultados dos testes de deflexão e estricção demonstram uma similaridade das estruturas em resposta aos esforços aplicados. Em relação ao número de cavidades, nota-se uma superioridade no modelo obtido via SESO, evidenciando uma das principais características presentes nos métodos de otimização topológica.

Avaliando o Nº de iterações, isto é, a quantidade necessária de *loopings* de simulação estrutural para atingir o modelo final, percebe-se que o modelo proposto foi atingido em apenas 5 iterações, enquanto o modelo do inventor foi alcançado após 35 repetições. Neste ponto, é importante ressaltar o papel do estudo topológico realizado via SESO, cujo *output* permite ao usuário visualizar de forma ágil, a quantidade e posicionamento das cavidades.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar e explorar a ponte entre a tecnologia de manufatura aditiva e a metodologia de otimização topológica, em especial a técnica denominada SESO. Como estudo de caso, utilizou-se parte de uma ferramenta aplicada na indústria de óleo e gás, aplicada no ramo de fabricação e montagem de tubulações industriais, intitulada acopladeira flexível, para realizar um estudo de otimização estrutural, com o intuito de alcançar uma topologia ótima para o grampo. A fim de comparar o modelo obtido neste trabalho, e apresentar possíveis melhorias estruturais e construtivas em relação ao modelo existente, parâmetros como percentual de redução de peso, tensão máxima de Von Mises, testes de deflexão e estrição, fator de segurança, bem como a complexidade dos modelos foram avaliados.

Entre os modelos propostos durante a avaliação de otimização topológica via SESO realizada no Matlab, notou-se tanto a sensibilidade da técnica às variações dos *inputs* como também a dependência da malha, conforme descreve SIMONETTI (2009). O modelo escolhido para seguir como *input* para a fase de análise estrutural partiu de um mínimo alcançado quando $V_{frac} = 0.25$, devido ao melhor desenvolvimento das cavidades.

Analisando os resultados do estudo estrutural, foi observado que o modelo otimizado apresentou um percentual de redução de peso equivalente à 62% do peso inicial do grampo, ligeiramente mais leve que a estrutura proposta pelo inventor. Em relação às simulações dos ensaios mecânicos, notou-se que a estrutura obtida no presente trabalho apresenta tensão máxima muito inferior ao limite de escoamento, dado os esforços aplicados. Os testes de deflexão e estrição do modelo proposto indicaram níveis baixíssimos de deformação, assim como na estrutura definida pelo inventor.

Quanto à comparação do perfil do grampo obtido com o modelo proposto pelo inventor, observa-se que o modelo desenvolvido neste trabalho apresenta uma configuração mais simples e leve, capaz de ser produzida pelo processo convencional de microfusão, como também por processos de manufatura aditiva metálica, como por exemplo a técnica DLMS.

O trabalho realizado mostra que a aplicação da técnica de otimização topológica via SESO, anterior ao estudo estrutural, auxiliou na determinação, de forma ágil, da quantidade e posicionamento das cavidades. Entende-se que a metodologia utilizada resulta em uma redução no tempo de análise e processamento da estrutura, bem como os custos computacionais

envolvidos na obtenção da estrutura ótima e que, portanto, pode ser empregada para facilitar o processo de otimização de estruturas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como forma de complementar e expandir o tema do trabalho, seguem as seguintes vertentes:

- Avaliar a influência do refinamento da malha de elementos finitos no valor de tensão máxima da estrutura;
- Desenvolver uma análise de confiabilidade da estrutura ótima apresentada neste trabalho, avaliando o grau de confiança da mesma através dos requisitos básicos de uma estrutura (serviço, segurança e robustez), por meio da técnica denominada FORM (*First Order Reliability Method*).
- Fabricação de um exemplar do modelo otimizado neste trabalho pelos métodos de microfusão e DMLS, realizando um estudo comparativos das principais propriedades mecânicas.

8. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, V.S.; SIMONETTI, H. L.; OLIVEIRA NETO, L. Comparative analysis of strut-and-tie models using Smooth Evolutionary Structural Optimization. **ELSEVIER**. 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.07.007>.

BINELI, A. R. R. et al. Direct metal laser sintering (DMLS): Technology for design and construction of microreactors. **6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação da Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM)**. 11 a 15 de abril. Caxias do Sul (RS). 2011.

BRACKETT, D., ASHCROFT, I. HAGUE R. TOPOLOGY OPTIMIZATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING. Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Loughborough University, Loughborough, Leicestershire, Le11 3tu, UK. 2011.

BENDSØE, M. P. Optimal Shape design as a material distribution problem. **Structural Optimization**, v. 1, pp. 193-202, 1989.

CHUN, J.; PARK, D.; LEE, J. TOPO-JOINT: Reliability-Based Topology Optimization For 3d-Printed Building Joints. **13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (XIII ICASP)**. May 26-30, 2019. Annual. Seoul, South Korea.

COSTA, Pedro Rafael Silva. **Otimização topológica para fabricação aditiva de sistema de suporte do auv medusa deep sea**. 2018. 94 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Porto, Portugal, 2018.

FERNANDES, Ramon Packer. **Avaliação da Exatidão Geométrica de Processo de Manufatura Aditiva**. 2019. 117 f. Monografia (TCC) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Departamento de Metal-Mecânica, Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Florianópolis, 2019.

FERNANDES, W. S.; ALMEIDA, V. S.; NEVES, F. A.; GRECO, M. Topology optimization applied to 2D elasticity problems considering the geometrical nonlinearity. **Elsevier Limited**. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.05.042>>.

FRANCO, Denise. **Impactos da manufatura aditiva no modelo de negócio**. 2019. 280 p. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos (UFSC). São Carlos, São Paulo, 2019.

GLOBAL AGENDA COUNCIL ON THE FUTURE OF SOFTWARE & SOCIETY. **Deep Shift - Technology Tipping Points and Societal Impact**. September, p. 43, 2015.

H.L. Simonetti, V.S. Almeida, L. Oliveira Neto. A influência do peso próprio na otimização topológica de estruturas elásticas 2D – via técnica numérica Smooth Evolutionary Structural Optimization (SESO). **Rev. int. métodos num. cálculo eng.**, 30(4) (2014a), p 271-280.

JANKOVICS, D.; GOHARI, H.; TAYEFEH, M.; BARARI, A. Developing Topology Optimization with Additive Manufacturing Constraints in ANSYS ®. **International Federation Of Automatic Control (IFAC): Elsevier**. 2018. Annual. Available online at www.sciencedirect.com.

KOLATSI, Nikos. **Topology optimization for additive manufacturing**. 2019. 101 p. Tese (Mestrado em Tecnologia) – Program of Industrial Systems Analytics in School of Technology and Innovations, University of VAASA. Vaasa. 2019.

LANES, R. M. and GRECO, M. Application of a topological evolutionary optimization method developed through python script. **Ciência & Engenharia: (Science & Engineering Journal, v. 22)**. ISSN 1983-4071, p. 11. 11 jun. 2013.

LIANG, Q.Q.; UY, B.; STEVEN, G. P. Performance-based optimization for strut–tie modeling of structural concrete. **J Struct Eng** 2002. p. 815–823.

LIU, K.; TOVAR, A. An efficient 3D topology optimization code written in Matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization**. 2014. vol. 50, n. 6, pp. 1175–1196.

LOYOLA, R. A.; QUERIN, O. M.; JIMÉNEZ, A. G.; GORDOA, C. A. A sequential element rejection and admission (SERA) topology optimization code written in Matlab. **Structural and Multidisciplinary Optimization, Springer**. 2018, vol, 58, p. 1297-1310. Disponível em: <[A sequential element rejection and admission \(SERA\) topology optimization code written in Matlab | SpringerLink](#)>.

MARCHESE, T.R., LAHUERTA, R.D., SILVA, E.C.N., TSUZUKI, M.S.G., MARTINS, T.C., BARARI, A., WOOD, I. Topologically Optimized Diesel Engine Support Manufactured With Additive Manufacturing. **International Federation Of Automatic Control (IFAC): Elsevier**, Anual. 2015

MARINHO, A. R.; SIMONETTI, H. L.; ALMEIDA, V. S.; JESUS, I.; BARBOSA, R. Topological Optimization Applied in Flexible Robotic Arms – BY SESO. **XXXIX Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE 2018)**. p. 259-264. Paris and Compiègne, FRA. ISBN: 978-2-9565961-0-3. Nov, 2018.

MATSUI, K. & TERADA, K. Continuous approximation of material distribution for topology optimization. **International Journey for Numerical Methods in Engineering**, v. 59, n. 14, p. 1925-44. 2004.

OLIVEIRA, Isaías de. **Desenvolvimento de suporte catalítico monolítico para fins aeroespaciais empregando a manufatura aditiva**. 2018. 110 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Departamento de Materiais Convencionais e Avançados, Universidade de São Paulo (USP), Lorena (SP), 2018.

OLIVEIRA, Jéssica Machado de. **Caracterização de peça em aço inox 316l fabricada por manufatura aditiva (DMLS)**. 2019. 89 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica, Departamento Acadêmico de Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Ponta Grossa, 2019.

PAKKANEN, Jukka Antero. **Design for additive manufacturing: Product and Process Driven Design for Metals and Polymers**. 2018. 156 p. Dissertação (Doutorado) – Doctoral Program in Materials Science and Technology (XXX Cycle), Politecnico di Torino, Torino, Itália, 2018.

POSSER T. **Princípios de design para manufatura aditiva aplicados em cilindros de motores dois tempos para máquinas portáteis**. 2019. 76 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia / Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

POUSEN, T. A. A simple scheme to prevent checkerboard patterns and one-node connected in topology optimization, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 24, n. 5, p. 396-399. 2002.

QUERIN, Osvaldo M. **Evolutionary structural optimisation: Stress Based Formulation and Implementation**. 1997. 261 p. Tese (Doutorado) – Department of Aeronautical Engineering - University of Sydney, Australia, 1997. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/266864815>>.

ROZVANY G. I. N.; BENDSØE M. P.; KIRSCH U. Layout optimization of structures. **Appl Mech Rev**. 48:41-119. 1995

ROZVANY, G. I. N.; ZHOU, M.; BIRKER, T. Generalized shape optimization without homogenization. **Structural Optimization**, v. 4, p. 250-252, 1992.

SAADLAOUI Y., MILAN, J.L., ROSSI, J.M., CHABRAND, P. Topology optimization and additive manufacturing: comparison of conception methods using industrial codes. **Journal of manufacturing systems. Elsevier**. v.43, p.178-186. 2017.

SIGMUND, O. On the Design of Compliant Mechanisms Using Topology Optimization. **Mechanics of Structures and Machines**, v. 25, n. 4, p. 495-526. 2014.

SIGMUND Oe; PETERSSON J. Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh dependencies and local minima. **Structural Optimization**, v. 16, p. 68–75. 1998.

SILVA, E. C. N. Técnicas de Otimização Aplicadas no Projeto de Peças Mecânicas (Apostila). Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos. Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil. 2001.

SIMONETTI, H.L. **Otimização Topológica de Estruturas Bidimensionais**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2009.

SIMONETTI, H. L.; NEVES, F. A.; ALMEIDA, V. S. Otimização Topológica Via uma Suavização do ESO em Problemas de Elasticidade Plana. **Revista CIATEC – UPF**, vol. 2 (1), p. 28-44, 2010.

SIMONETTI, H. L.; ALMEIDA, V. S.; ASSIS, F. N. Seleção de topologias ótimas de estruturas

elásticas 2D com restrição de tensão – via Smooth Evolutionary Structural Optimization. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**. April, 2014b. Disponível em: < <https://www.researchgate.net/publication/261598315>>.

SIMONETTI H.L.; ALMEIDA, Valério S.; DE OLIVEIRA NETO, Luttgardes.A Smooth Evolutionary Structural Optimization Procedure Applied to Plane Stress Problem. **Engineering Structures**, v. 75, p.248-258, 2014c.

SIMONETTI, H. L. **Otimização topológica de estruturas elásticas 2D via mec baseada em uma nova abordagem evolucionária**. 2016. 162 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Ouro Preto, Minas Gerais, 2016.

SIMONETTI, H. L.; ALMEIDA, V. S.; ASSIS, F. N.; NETO, L. O. Otimização Topológica e uma nova abordagem de criação de cavidades. **XXXVII Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)**. Brasília, DF, Brasil. Novembro, 6-9, 2016a.

SIMONETTI, H. L.; ALMEIDA V. S; OLIVEIRA NETO, L.; ASSIS, F. N. Optimal Strut-And-Tie Models Using Smooth Evolutionary Structural Optimization. **Revista CIATEC – UPF**, vol.8 (2), p.p.34-49, 2016b.

SIMONETTI, H. L.; ALMEIDA, V. S.; ASSIS, F. N. Evolutionary structural optimization of elastic structures 2d using strain energy criteria. **Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)**. P.O. Faria, R.H. Lopez, L.F.F. Miguel, W.J.S. Gomes, M. Noronha (Editores), ABMEC, Florianópolis, SC, Brazil, November 5-8, 2017.

TEAN SU, William. **Manufatura aditiva da liga ti-6al-4v aplicada em uma biela automotiva**. 2013. 99 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2013.

VOLPATO, N. et al. Prototipagem Rápida: Tecnologias e Aplicações. São Paulo: **Editora Edgard Blücher**, 2007. 244p.

Xie Y.M.; Steven, G.P. A simple evolutionary procedure for structural optimization, **Computers & Structures**, Vol. 49, n. 5, p. 885-896, 1993.

ANEXO 1



Descrição

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - ANÁLISE TOPOLÓGICA

Trabalho de Conclusão de Curso Análise Estrutural

Data: quarta-feira, 6 de janeiro de 2021

Projetista: Adriano Marinho

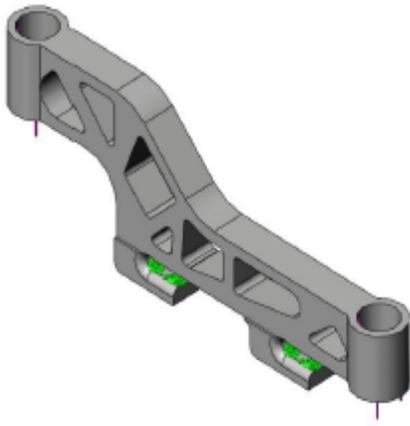
Nome do estudo: tcc-AM-teste-01

Tipo de análise: Análise estática

Sumário

Descrição	1
Informações do modelo	2
Propriedades do estudo	3
Unidades	3
Propriedades do material.....	4
Acessórios de fixação e Cargas	5
Informações de malha.....	6
Forças resultantes.....	7
Resultados do estudo	8

Informações do modelo



Nome do modelo: grampo-tcc
Configuração atual: Predeterminada

Corpos sólidos			
Nome e referência do documento	Tratado como	Propriedades volumétricas	Caminho/Data do documento modificado
<p>Filete4</p> 	Corpo sólido	Massa:0,468891 kg Volume:6,00372e-05 m ³ Densidade:7.810 kg/m ³ Peso:4,59513 N	D:\ALCANCCI\Adriano\grampo-tcc.SLDPRT Jan 6 15:54:26 2021



Propriedades do estudo

Nome do estudo	tcc-AM-teste-01
Tipo de análise	Análise estática
Tipo de malha	Malha sólida
Efeito térmico:	Ativada
Opção térmica	Incluir cargas de temperatura
Temperatura de deformação zero	298 Kelvin
Inclui efeitos da pressão de fluidos do SOLIDWORKS Flow Simulation	Desativada
Tipo de Solver	FFEPlus
Efeito no plano:	Desativada
Mola suave:	Desativada
Atenuação inercial:	Desativada
Opções de união incompatíveis	Automático
Grande deslocamento	Desativada
Calcular forças de corpo livre	Ativada
Atrito	Desativada
Usar método adaptável:	Desativada
Pasta de resultados	Documento do SOLIDWORKS (D:\ALCANCC\Adriano)

Unidades

Sistema de unidades:	SI (MKS)
Comprimento/Deslocamento	mm
Temperatura	Kelvin
Velocidade angular	Rad/s
Pressão/Tensão	N/m ²

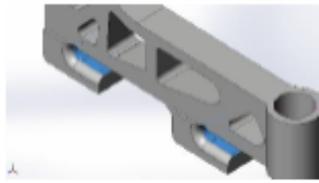


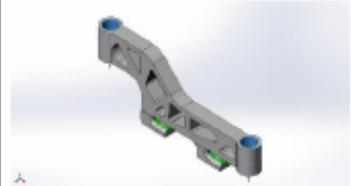
Propriedades do material

Referência do modelo	Propriedades	Componentes
	<p>Nome: 17-4.PH Tipo de modelo: Isotrópico linear elástico Critério de falha predeterminado: Desconhecido Limite de escoamento: 7,58423e+08 N/m² Resistência à tração: 9,30792e+08 N/m² Módulo elástico: 1,97e+11 N/m² Coeficiente de Poisson: 0,272 Massa específica: 7.810 kg/m³ Módulo de cisalhamento: 7,74e+10 N/m² Coeficiente de expansão térmica: 1,8e-05 /Kelvin</p>	<p>Corpo sólido 1(Filete4)(grampo-tcc)</p>
Dados da curva:N/A		



Acessórios de fixação e Cargas

Nome do acessório de fixação	Imagem de acessório de fixação	Detalhes de acessório de fixação		
Fixo-1		Entidades: 4 face(s) Tipo: Geometria fixa		
Forças resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Força de reação(N)	-0,0335236	-14.710	-0,19878	14.710
Momento de reação(N.m)	0	0	0	0

Nome da carga	Carregar imagem	Detalhes de carga
Força-1		Entidades: 2 face(s) Referência: Aresta< 1 > Tipo: Aplicar força Valores: ---; ---; -1.500 kgf

Informações de malha

Tipo de malha	Malha sólida
Gerador de malhas usado:	Malha padrão
Transição automática:	Desativada
Incluir loops de malha automáticos:	Desativada
Pontos Jacobianos	4 Pontos
Tamanho do elemento	4,1882 mm
Tolerância	0,20941 mm
Plotagem de qualidade de malha	Alta

Informações de malha - Detalhes

Total de nós	14963
Total de elementos	8279
Proporção máxima	16,167
% de elementos com Proporção < 3	95,4
% de elementos com Proporção < 10	0,217
% de elementos distorcidos(Jacobiana)	0
Tempo para conclusão da malha (hh:mm:ss):	00:00:06
Nome do computador:	YPY-ENG-CVS



Forças resultantes

Forças de reação

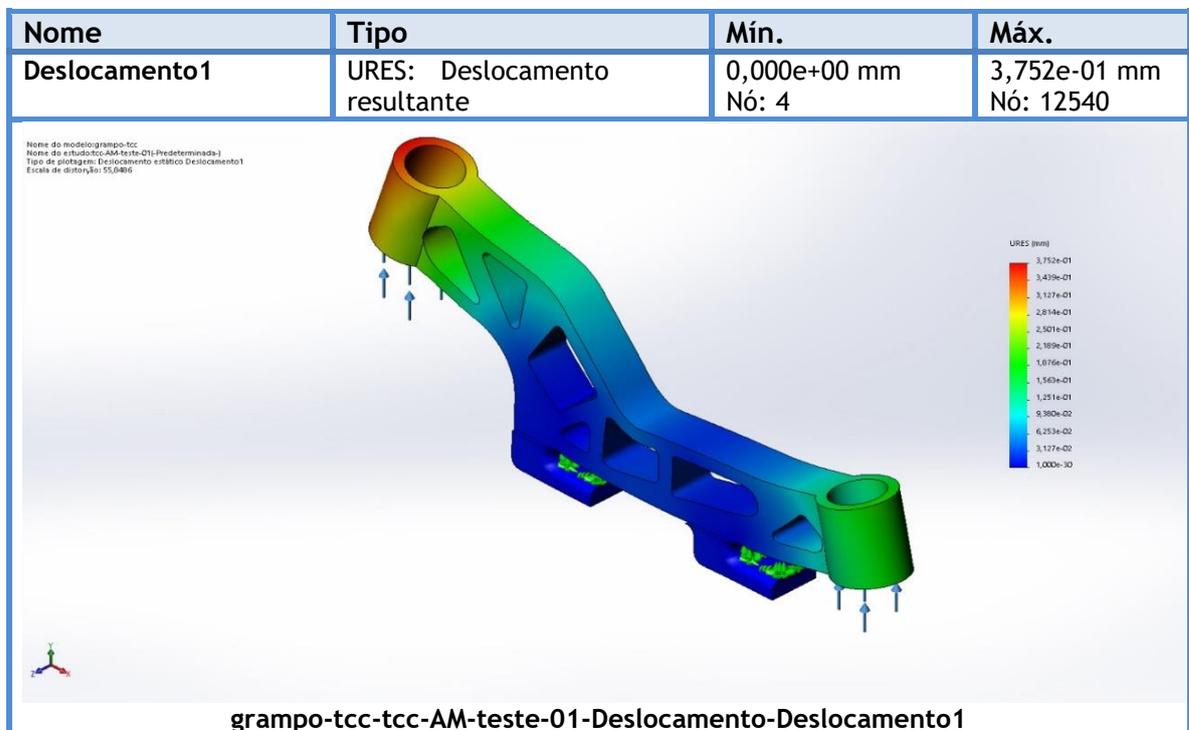
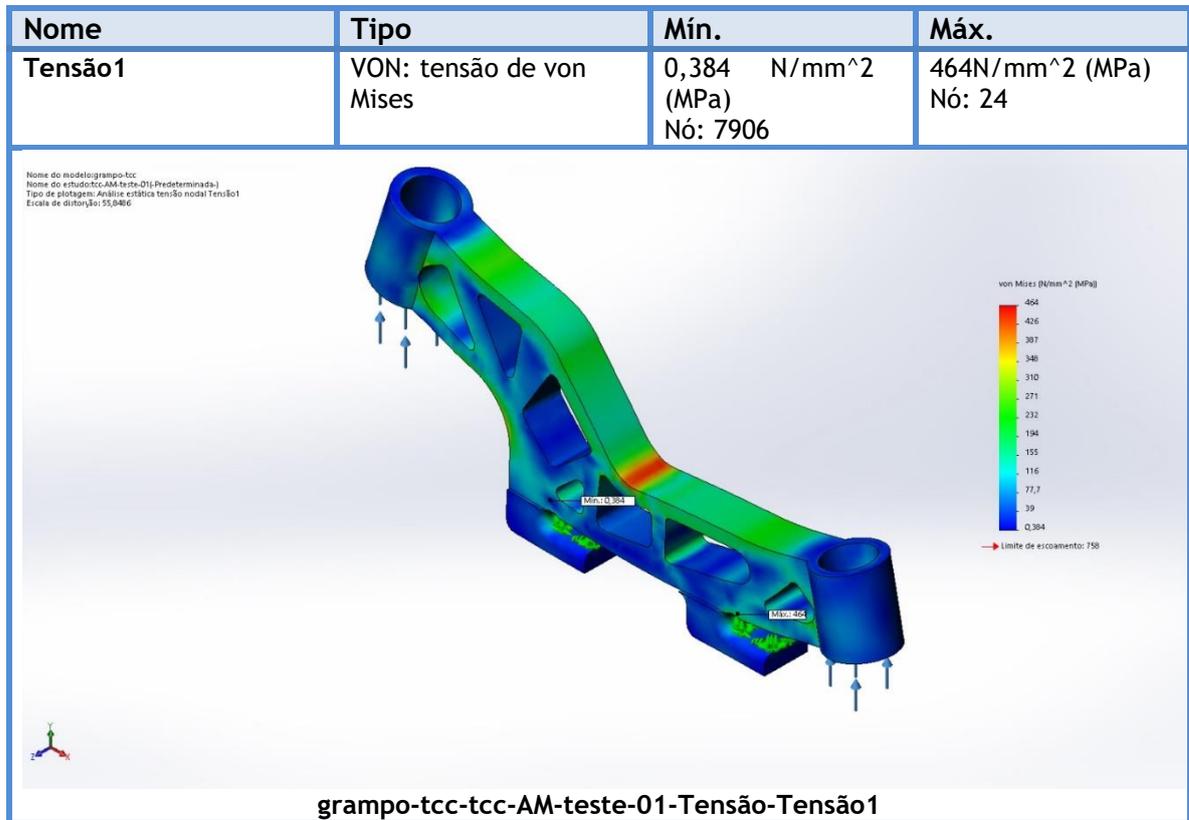
Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N	-0,0335236	-14.710	-0,19878	14.710

Momentos de reação

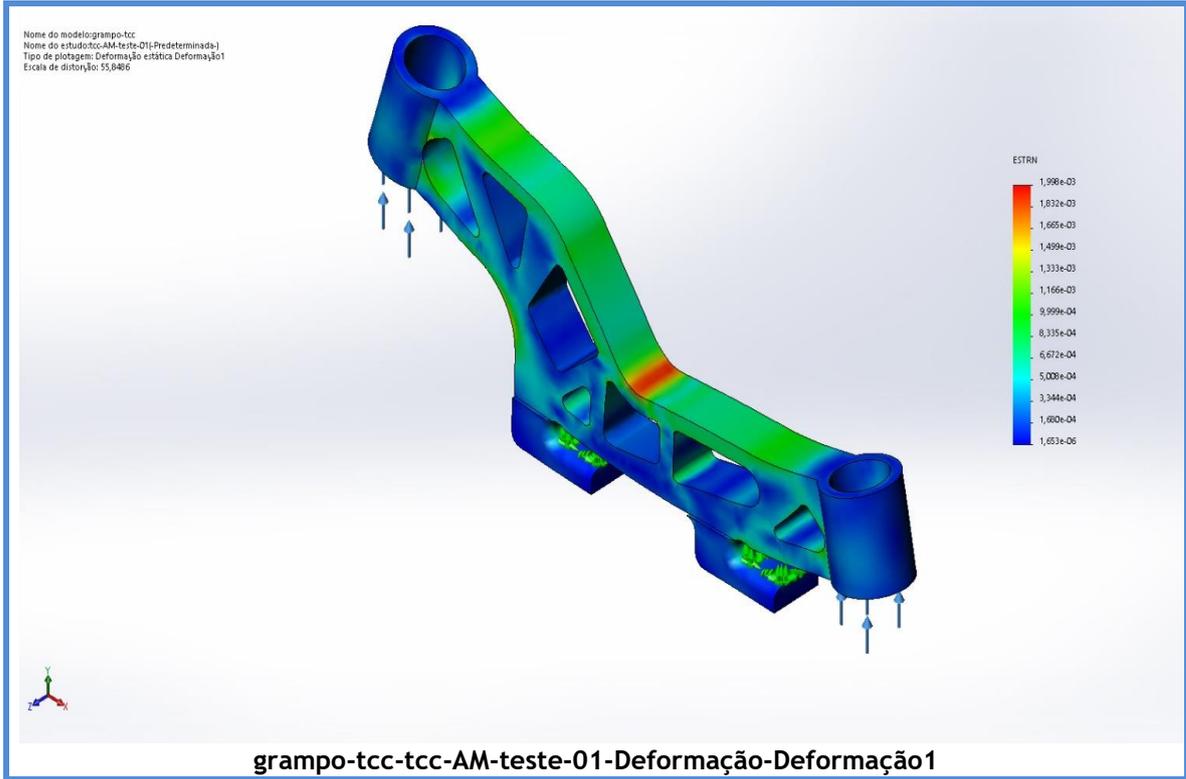
Conjunto de seleção	Unidades	Soma X	Soma Y	Soma Z	Resultante
Modelo inteiro	N.m	0	0	0	0



RESULTADOS DO ESTUDO



Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Deformação1	ESTRN : Deformação equivalente	1,653e-06 Nó: 7906	1,998e-03 Nó: 24



Nome	Tipo	Mín.	Máx.
Fator de segurança1	Tensão de von Mises máxima	1,634e+00 Nó: 24	2,000e+00 Nó: 1

