

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Matheus Seif Reis

**Desenvolvimento de uma garra robótica para veículos submarinos
operados remotamente (ROV's) utilizando otimização topológica**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Anderson Pereira

Rio de Janeiro
Dezembro de 2020

*Aos meus pais e irmão, que sempre foram
grandes incentivadores dos meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde e força proporcionadas ao longo desses anos de curso.

Aos meus pais, José e Estrela, pelo amor e apoio incondicional, pelo incentivo aos estudos e por me proporcionarem estudar Engenharia Mecânica em uma faculdade de excelência como a PUC-Rio.

Ao meu irmão, Thiago, por toda amizade, carinho e apoio ao longo desses anos e por sempre me incentivar em novos desafios.

À toda minha família pelo carinho, pelo apoio emocional e pela confiança em minhas decisões acadêmicas e profissionais.

Ao meu professor orientador, Anderson Pereira, pelas contribuições, conselhos e dedicação ao longo desses três anos que trabalhamos juntos, desde a iniciação científica até o presente projeto de graduação.

Ao corpo docente da PUC-Rio que contribuiu para meu desenvolvimento acadêmico e profissional com elevado conhecimento e profissionalismo.

A todos os meus colegas de curso, em especial ao Filipe Papa e ao Rodrigo Lomonte, pelo apoio e cooperação mútua durante esses anos.

A PUC-Rio por me proporcionar uma educação de alta qualidade e experiências extracurriculares que serão essenciais na minha carreira profissional.

Aos meus colegas da Baker Hughes, pela oportunidade de estágio e pelos conhecimentos e experiências adquiridos ao longo desses anos.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a minha formação e conclusão do curso.

RESUMO

Desenvolvimento de uma garra robótica para veículos submarinos operados remotamente (ROV's) utilizando otimização topológica

Com processos cada vez mais automatizados, o desenvolvimento de robôs que sejam robustos sem perder a precisão dos movimentos, ou seja, capazes de desempenhar suas funções sem comprometimento estrutural, é um grande desafio. O atual projeto visa utilizar ferramentas computacionais para maximizar a rigidez de uma garra robótica para veículos submarinos operados remotamente (ROV's) durante suas operações típicas (movimentação de carga e aplicação de torque) por meio da otimização topológica, respeitando restrições de volume e manufatura. Por fim, esse estudo fornecerá a melhor distribuição de material na garra de modo que o objetivo proposto e as restrições impostas sejam atendidos.

Palavras-chave: Otimização Topológica. Análise Estrutural. Desenvolvimento de Produto. Garra Robótica. Veículo Submarino Operado Remotamente (ROV).

ABSTRACT

Development of a robotic gripper for remotely operated underwater vehicles (ROV's) utilizing topological optimization

With the increasing automation of processes, the development of robots that are robust without losing the precision of movements, i.e., capable of performing their functions without structural loss, is a great challenge. The current project intends to use computational tools to maximize the stiffness of a robotic gripper for remotely operated underwater vehicles (ROV's) during their typical operations (load movement and torque application) through topological optimization, meeting volume and manufacturing constraints. Finally, this study will provide the best material distribution in the gripper to fulfill the proposed objective and the imposed restrictions.

Keywords: Topological Optimization. Structural Analysis. Product Development. Robotic Gripper. Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplos de manipuladores de ROV (modelos RigMaster e TITAN 4 da TechnipFMC).....	11
Figura 2: Otimização topológica de uma garra robótica	12
Figura 3: Tipos de Produção de Petróleo	14
Figura 4: Exemplo de ROV da Oceaneering (modelo Magnum® Plus).....	16
Figura 5: Manipulador de ROV (modelo Oceaneering Atlas)	17
Figura 6: Exemplo de processo de otimização topológica	18
Figura 7: Diferentes tipos de otimização estrutural e suas soluções	19
Figura 8: Procedimento típico utilizando o método otimização topológica	20
Figura 9: Garras paralelas do manipulador TechnipFMC TITAN 4	22
Figura 10: Módulo de análise estrutural no ANSYS (projeto convencional)	28
Figura 11: Geometria da garra paralela do manipulador TITAN 4.....	29
Figura 12: Dimensões principais da geometria da garra	30
Figura 13: Geração de malha da geometria da garra convencional.....	31
Figura 14: Distribuição dos carregamentos ao longo do tempo	32
Figura 15: Definição do local de aplicação dos carregamentos (dentes e interface, respectivamente).....	33
Figura 16: Tensões de von Mises do projeto convencional da garra	34
Figura 17: Deformações de von Mises do projeto convencional da garra	35
Figura 18: Deslocamentos do projeto convencional da garra	35
Figura 19: Visão geral da implementação do problema no ANSYS (projeto mecânico otimizado).....	37
Figura 20: Geometria inicial definida para a otimização topológica da garra	38
Figura 21: Geração de malha da geometria inicial (problema de otimização).....	39
Figura 22: Configurações da otimização topológica da garra.....	41
Figura 23: Otimização topológica da garra de ROV	42
Figura 24: Visualização da região otimizada da garra de ROV	43
Figura 25: Geometria do projeto otimizado de garra	45
Figura 26: Vista de seção (lateral) da geometria otimizada da garra	45
Figura 27: Vista de seção (posterior) da geometria otimizada da garra	46
Figura 28: Geração de malha do projeto otimizado de garra	47

Figura 29: Tensões de von Mises do projeto otimizado da garra	48
Figura 30: Deformações de von Mises do projeto otimizado da garra	48
Figura 31: Deslocamentos do projeto otimizado da garra	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características técnicas do manipulador TechnipFMC TITAN 4	23
Tabela 2: Principais propriedades mecânicas da Liga Ti 6Al-4V (23 °C)	23
Tabela 3: Resultados da simulação da garra convencional	35
Tabela 4: Resultados da simulação da garra otimizada	49
Tabela 5: Resultados da otimização topológica	51

LISTA DE ABREVIATURAS

AUV	-	Veículo Submarino Autônomo
MEF	-	Método dos Elementos Finitos
OT	-	Otimização Topológica
PUC-Rio	-	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
ROV	-	Veículo Submarino Operado Remotamente
2D	-	Bidimensional
3D	-	Tridimensional

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	MOTIVAÇÃO	11
1.2.	OBJETIVOS	12
1.3.	METODOLOGIA	13
2.	ANÁLISE TEÓRICA.....	14
2.1.	VEÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE (ROV)	14
2.1.1.	Indústria de Óleo e Gás	14
2.1.2.	Veículos Submarinos Não Tripulados	15
2.2.	MANIPULADORES DE ROBÔS SUBMARINOS.....	16
2.3.	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	17
2.3.1.	Método de Otimização Topológica (MOT)	17
2.3.2.	Procedimento da Otimização	20
3.	PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA GARRA	22
3.1.	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	22
3.2.	OBJETO DE ESTUDO	22
3.3.	MATERIAL	23
3.4.	CENÁRIO DE OPERAÇÃO	24
3.5.	CARACTERÍSTICAS DA OTIMIZAÇÃO	25
3.6.	CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS	26
4.	MODELO NUMÉRICO COMPUTACIONAL	28
4.1.	PROJETO MECÂNICO CONVENCIONAL.....	28
4.1.1.	Definição da Geometria	28
4.1.2.	Configuração do Modelo	30
4.1.3.	Resultado da Simulação	33
4.2.	PROJETO MECÂNICO OTIMIZADO	37

4.2.1.	Análise Estrutural Inicial.....	37
4.2.2.	Otimização Topológica	40
4.2.3.	Análise Estrutural da Garra Otimizada	44
5.	CONCLUSÃO	52
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Robôs são dispositivos essenciais em diversos ramos da indústria, tanto na automatização de linhas de produção quanto na realização de tarefas humanas. Nesse âmbito, a indústria de óleo e gás é ampla utilizadora desses dispositivos para monitoração e operação de equipamentos submarinos instalados em profundidades muito elevadas. Os Veículos Submarinos Operados Remotamente (ROV's), são projetados para serem compactos e realizarem funções operacionais, como por exemplo a abertura e fechamento de válvulas.

Na Figura 1, em que são ilustrados manipuladores típicos de ROV (comercializados pela empresa TechnipFMC) [22], pode-se verificar que as garras desses equipamentos são semelhantes a pinças, facilitando a precisão dos movimentos. O principal desafio na confecção desses dispositivos é garantir que consigam realizar essas operações mesmo com peças de tamanho reduzido.

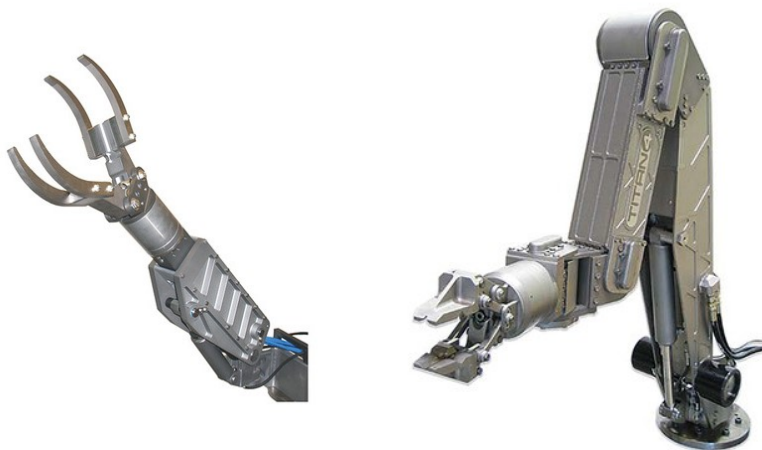


Figura 1: Exemplos de manipuladores de ROV (modelos RigMaster e TITAN 4 da TechnipFMC)

Fonte: TechnipFMC, 2018 [22].

Por outro lado, tal necessidade não se trata de uma novidade na indústria, visto que cada vez mais é necessário reduzir a quantidade de material e aumentar a resistência mecânica de peças ou equipamentos. A otimização topológica é uma

excelente ferramenta para a determinação da melhor distribuição de material em um corpo, para que esse atinja um objetivo específico, como a redução de massa ou aumento da resistência mecânica. Nesse estudo, objetivos e restrições são definidos e algoritmos computacionais são utilizados para gerar a melhor geometria da estrutura para alcançar tais especificações.

A Figura 2 indica um exemplo de otimização topológica em garras robóticas na divisão de simulação da Autodesk [2], podendo ser verificado como a reorganização de material ocorre nesse tipo de otimização.

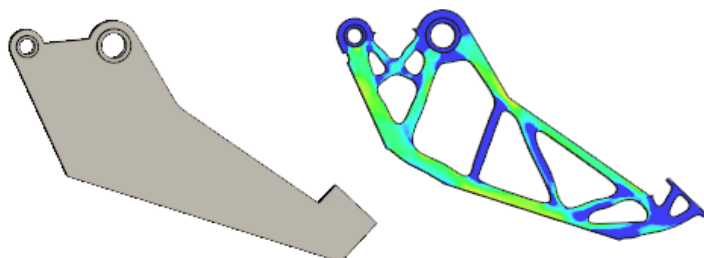


Figura 2: Otimização topológica de uma garra robótica

Fonte: Autodesk, 2020 [2].

1.2. OBJETIVOS

O presente projeto possui como objetivo principal o desenvolvimento de uma garra robótica, para aplicações submarinas, utilizando o método da otimização topológica. Os objetivos específicos são: (a) estudar o comportamento mecânico de uma garra de ROV convencional (não-otimizada) durante sua operação; (b) utilizar a otimização topológica para a obtenção de uma geometria ótima para a garra; (c) estudar o comportamento mecânico da nova garra durante a operação; (d) comparar os resultados e verificar a influência da otimização topológica na resposta.

1.3. METODOLOGIA

O atual trabalho é desenvolvido de acordo com a seguinte metodologia: (a) realização da revisão bibliográfica detalhada visando o entendimento da parte teórica do problema que se deseja resolver, ou seja: o problema de desenvolvimento de uma garra de ROV que possua sua geometria otimizada para resistir a carregamentos durante sua operação; (b) estudo sobre otimização topológica; (c) pesquisa sobre as principais geometrias de garras de ROV disponíveis no mercado e sobre os tipos de operação que realizam; (d) definição do modelo de garra a ser utilizado, do cenário de operação e das características da otimização; (e) escolha das ferramentas computacionais adequadas e realização das análises na garra antes e depois da otimização topológica; (g) apresentação e análise dos resultados obtidos.

2. ANÁLISE TEÓRICA

2.1. VEÍCULO SUBMARINO OPERADO REMOTAMENTE (ROV)

2.1.1. Indústria de Óleo e Gás

Após a Segunda Revolução Industrial, o petróleo passou a desempenhar um papel fundamental como matriz energética mundial e, conseqüentemente, promoveu as diversas atividades relacionadas a esse produto. A indústria de óleo e gás abrange todas as atividades ao longo da cadeia de produção do petróleo, como perfuração de poços, produção, refino e distribuição.

O processo de extração de petróleo pode ser dividido entre *on-shore* e *off-shore*, de acordo como o local onde esse ocorre. A produção *on-shore* é aquela realizada no continente, utilizando o processo de elevação artificial por meio de bombas mecânicas de sucção. Por outro lado, a produção *off-shore* é realizada em alto mar, com ajudas de plataformas (fixas e móveis), principalmente em águas profundas (superiores a 2.000 metros de profundidade). A Figura 3 ilustra esses dois tipos de produção de petróleo. (CBIE, 2020) [5].

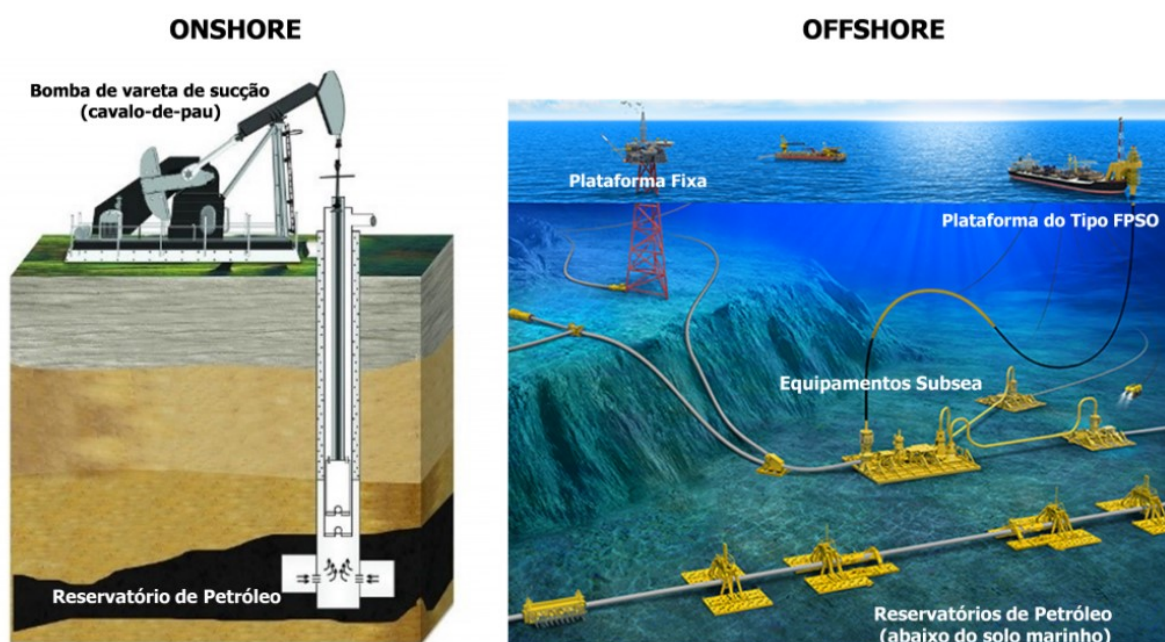


Figura 3: Tipos de Produção de Petróleo

Fonte: CBIE, 2020 [5].

Por estarem localizados em terra firme, a exploração *on-shore* apresenta custos de construção, produção e manutenção consideravelmente menores em comparação à *off-shore*, enquanto a produtividade dos poços garante vantagem às produções em alto mar. Essas reservas submarinas de petróleo são abundantes e atrativas financeiramente devido a quantidade de produto que pode ser extraído de um determinado campo, entretanto apresentam implementação complexa e logística avançada, necessitando que os projetos do setor *off-shore* da indústria de petróleo tenham suas etapas minimamente calculadas de modo a garantir simultaneamente a produção diária desejada e evitar acidentes. (CBIE, 2020) [5].

2.1.2. Veículos Submarinos Não Tripulados

Um dos maiores desafios da indústria *off-shore* de óleo e gás está relacionado com as operações de monitoramento, manutenção e contingência que devem ser realizadas nos equipamentos instalados no leito marinho. Por ser uma solução com alto custo e elevados riscos a vida humana, a ação de exploradores no fundo do mar foi substituída por veículos não tripulados. Existem atualmente dois tipos de veículos não tripulados utilizados em equipamentos submarinos: os veículos submarinos operados remotamente (ROV's) e os veículos submarinos autônomos (AUV's). (OCEAN EXPLORATION AND RESEARCH) [12].

Os veículos submarinos operados remotamente (ROV's) são robôs controlados por operadores a bordo de um navio na superfície. Por serem equipados com câmeras, manipuladores e ferramentas, os ROV's podem desempenhar diversas funções, como por exemplo o monitoramento de irregularidades nos equipamentos submarinos, a coleta de amostras do leito marinho, o transporte de equipamentos ou o acionamento de válvulas utilizando ferramentas específicas. As funcionalidades e características desses robôs variam de acordo com o fabricante e com o tipo de exploração a ser realizada. A Figura 4 mostra um exemplo de ROV da Oceaneering [14], empresa reconhecida pela qualidade e tecnologia de seus robôs submarinos.



Figura 4: Exemplo de ROV da Oceaneering (modelo Magnum® Plus)

Fonte: Oceaneering, 2020 [14].

Por outro lado, os veículos submarinos autônomos (AUV's) podem funcionar sem esses operadores, sendo majoritariamente utilizados para o monitoramento das atividades submarinas e na coleta de dados e amostras. Os AUV's são programados para realizarem suas operações antes de serem submersos, entretanto atualmente esses robôs podem se comunicar com os operadores do fundo do oceano para envio de dados ou recebimento de novas instruções.

2.2. MANIPULADORES DE ROBÔS SUBMARINOS

Além de serem robôs controlados remotamente, os ROV's se diferenciam dos AUV's pela presença de manipuladores, capazes de realizar ações como a movimentação de objetos ou o acionamento de válvulas. Dessa forma, os manipuladores dos ROV's devem ser muito bem projetados para que consigam realizar as operações especificadas e suportar as cargas de trabalho de forma segura.

Assim como os robôs, os manipuladores variam suas características (número de graus de liberdade, tipo de acionamento etc.) de acordo com a aplicação. Tratando especificamente da parte estrutural, esses podem ser divididos em braço e garra (ou pinça). O braço garante a sustentação e movimentação da garra, enquanto a pinça é utilizada na fixação e sustentação do objeto a ser manipulado. Na Figura 5, pode-se verificar um modelo típico de manipulador para ROV com 7 graus de liberdade. (SIVČEV et al., 2018) [18].



Figura 5: Manipulador de ROV (modelo Oceaneering Atlas)

Fonte: Oceaneering, 2016 [13].

Os manipuladores utilizam uma alimentação hidráulica (ou elétrica) e um sistema de comunicação proveniente do ROV para realizar as suas funções. Dessa forma, vale destacar que seus componentes estruturais (braço e garra) devem ser projetados de modo a resistir aos carregamentos máximos especificados, ou seja, são necessárias estruturas cada vez mais otimizadas permitindo unir resistência mecânica e compactação. Existem diversas formas de promover essa melhoria nos componentes dos manipuladores, sendo a otimização topológica uma das formas mais inteligentes e modernas de projetar peças mais leves com melhores propriedades mecânicas.

2.3. OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

2.3.1. Método de Otimização Topológica (MOT)

O manipulador de robôs submarinos é apenas um exemplo de uma necessidade cada vez mais presente na indústria: produtos que sejam resistentes mecanicamente e, ao mesmo tempo, sejam acessíveis e leves. Entretanto, essas características são conflitantes, visto que a adição de massa nas peças aumenta a rigidez. A definição da geometria ideal da peça deve ser preferencialmente realizada com auxílio de ferramentas computacionais, sendo mais barata e rápida em relação a testar corpos de provas com diferentes geometrias.

Nesse âmbito, a otimização topológica é um dos mais famosos métodos empregados na obtenção de uma geometria ideal. Trata-se de um procedimento computacional utilizado para definir a distribuição de material mais adequada em uma estrutura dentro de um domínio inicial, definidos seus carregamentos e apoios (ou outras condições de contorno), de modo a melhorar seu desempenho e satisfazer as restrições impostas. Esse método utiliza a resposta do modelo inicial aos carregamentos para verificar e redistribuir os elementos do domínio (malha) que não colaboram para a função estrutural (ou para outro objetivo específico). (VETTURAZZI, 2017) [23].

Portanto, a otimização topológica combina basicamente algoritmos de otimização com o Método de Elementos Finitos. A Figura 6 exemplifica o procedimento de otimização, iniciando com uma geometria genérica até a obtenção de uma peça otimizada a partir desse domínio.

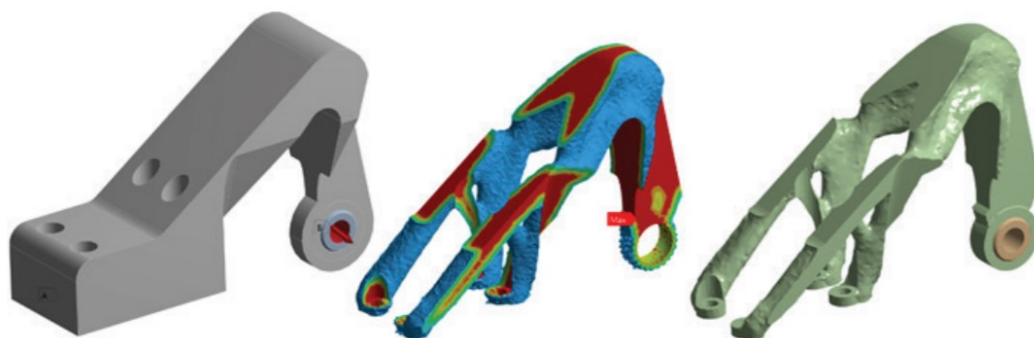


Figura 6: Exemplo de processo de otimização topológica

Fonte: ESSS, 2017 [23].

A otimização topológica é uma ferramenta bastante recente, entretanto existem outros métodos de otimização estrutural, como a paramétrica e a de forma. A otimização paramétrica utiliza diversas dimensões específicas de referência (diâmetro, altura etc.) para definir a geometria ideal sem alterar a configuração geral da geometria. Por outro lado, a otimização de forma busca alterar de maneira suave as formas e contornos da estrutura sem modificar suas características principais, sendo muito utilizada na redução de arrasto em sistemas aerodinâmicos. (OTMZA, 2019) [15].

Diferentemente dessas duas otimizações, a otimização topológica busca definir uma topologia ideal, redistribuindo material de regiões que não contribuem para o objetivo global (como a maximização da rigidez), conferindo uma diminuição do peso (ou volume) da estrutura. Esse método é bastante utilizado em projetos que buscam minimizar o peso sem comprometimento estrutural, como é o caso dos setores aeronáutico e automotivo. Na Figura 7 são mostradas as diferentes formas de otimização para maximização de rigidez de um determinado domínio com carregamentos especificados.

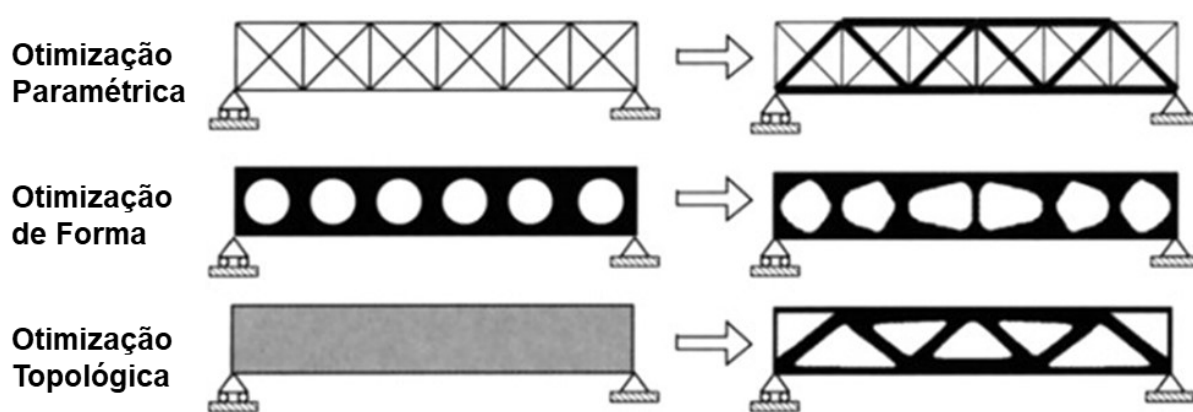


Figura 7: Diferentes tipos de otimização estrutural e suas soluções

Fonte: Bendsøe; Sigmund, 2011 [3].

Vale destacar que o procedimento de otimização topológica vem se tornando uma realidade cada vez mais presente na indústria, principalmente com os avanços da engenharia de software, possibilitando processos mais rápidos e intuitivos, e o crescimento da tecnologia de impressão 3D, garantindo uma integração entre o produto otimizado e seu protótipo criado pela manufatura aditiva.

Detalhes adicionais do método de otimização topológica, bem como suas formulações e aplicações, podem ser encontrados nos artigos dos professores Anderson Pereira e Ivan de Menezes, do Departamento de Engenharia Mecânica e do Instituto Tecgraf da PUC-Rio. Nesses trabalhos, é apresentado um código geral de otimização topológica no MATLAB (TALISCHI *et al.*, 2012) [20] e são testados problemas de escoamento de fluidos nesse programa (TALISCHI *et al.*, 2016) [21].

2.3.2. Procedimento da Otimização

O procedimento da otimização topológica se inicia com a definição das condições de contorno (esforços, restrições etc.) e de uma geometria inicial de projeto. O domínio inicial deve possuir o maior tamanho possível, respeitando os requisitos de geometria, de modo a não limitar a atuação do algoritmo. Com essas definições, é realizada uma simulação no modelo inicial e as reações do sistema serão utilizadas como dados de entrada para o algoritmo de otimização.

Com os resultados da simulação inicial, o algoritmo avalia e redistribui os elementos da malha que não possuem função estrutural (ou que não atendem os requisitos estabelecidos pelo usuário) por meio de um processo iterativo. Vale destacar que, dependendo do método utilizado, o algoritmo pode tanto redistribuir quanto remover tais elementos. Por fim, é realizada uma nova avaliação estrutural para validar a geometria otimizada e os resultados das duas simulações são comparados. Na Figura 8 são ilustradas cada uma das etapas de uma otimização topológica realizada em um domínio genérico.

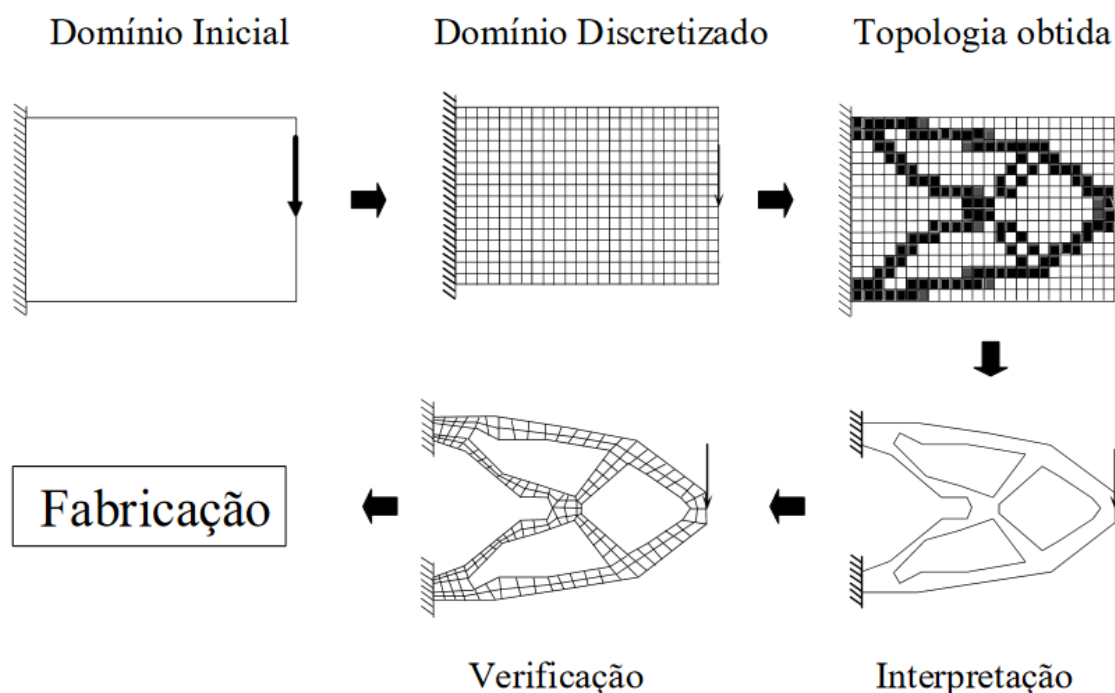


Figura 8: Procedimento típico utilizando o método otimização topológica

Fonte: Silva, 2016 [17].

Existem configurações importantes a serem definidas na otimização: a função objetivo e as restrições. O objetivo da otimização está relacionado com os parâmetros que devem ser maximizados (ou minimizados) durante o processo, como por exemplo maximizar rigidez, maximizar frequências naturais, minimizar massa ou minimizar volume. Por outro lado, a restrição de resposta limita a otimização de modo a garantir a funcionalidade da estrutura, podendo ser dividida em massa, volume, tensões de von Mises ou frequências naturais. Na formulação clássica do método da otimização topológica, o objetivo é a maximização de rigidez e a restrição é a massa. (SOUZA; LIMA, 2020) [19].

Para uma melhor definição da topologia final, deve-se também garantir que a malha de elementos finitos seja suficientemente boa, visto que o algoritmo utilizará essa divisão para classificar os elementos entre importantes e não importantes. Um domínio corretamente discretizado poderá conferir vantagens por permitir uma seleção mais criteriosa em relação a cada ponto do domínio (o que não seria possível caso a malha possuísse poucos elementos). Além dessas configurações, é fundamental definir as regiões de otimização e de exclusão, sendo regiões onde o algoritmo deve ou não atuar.

3. PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA DE UMA GARRA

3.1. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Realizada uma revisão teórica sobre os conceitos de robôs submarinos, manipuladores e otimização topológica, pode-se formular o problema proposto no atual trabalho: desenvolver uma garra de ROV utilizando o método de otimização topológica. Neste capítulo são apresentados o layout utilizado na otimização, as condições de operação, o material escolhido e outras informações necessárias para a definição completa do problema.

3.2. OBJETO DE ESTUDO

O objeto de estudo é uma garra robótica para operações submarinas. Como comentado na seção 2.2, existem diversos manipuladores de ROV disponíveis no mercado *off-shore* e, conseqüentemente, inúmeros são os modelos de garra desses mecanismos. As garras paralelas de 4" do manipulador TITAN 4 da empresa TechnipFMC [6], mostradas na Figura 9, foram escolhidas para o projeto atual.

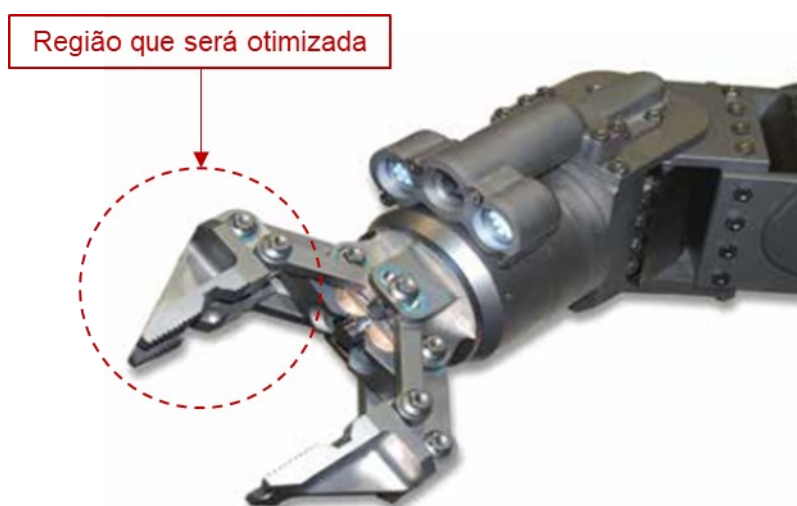


Figura 9: Garras paralelas do manipulador TechnipFMC TITAN 4

Fonte: FMC Technologies, 2014 [6].

A escolha por esse modelo se deve ao fato de ser um manipulador robusto com elevada precisão e atingir profundidades de até 7.000 metros de coluna d'água. Dessa forma, a garra será desenvolvida com base nas características obtidas no *datasheet* do produto e listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características técnicas do manipulador TechnipFMC TITAN 4

Categoria de Uso	Trabalho pesado
Sistema de Força	Hidráulico
Material	Titânio (principal)
Profundidade Máxima de Trabalho	7.000 m
Opção de Garra	Paralela 4"
Força de Preensão (Nominal)	4.092 N
Torque (Nominal)	170 N·m

Fonte: FMC Technologies, 2014 [6].

3.3. MATERIAL

O *datasheet* indica que o material utilizado no corpo do manipulador (garra e braço) é uma liga de alumínio genérica. Para o projeto foi considerada a utilização da liga alfa-beta de titânio (liga 6Al-4V), com 6% de alumínio e 4% de vanádio, cujas propriedades mecânicas se encontram na Tabela 2.

Tabela 2: Principais propriedades mecânicas da Liga Ti 6Al-4V (23 °C)

Módulo de Elasticidade (E)	111,2 GPa
Limite de escoamento (S_Y)	845,7 MPa
Resistência máxima a tração (S_R)	918,0 MPa
Massa específica (ρ)	4.429 kg/m ³
Coefficiente de Poisson (ν)	0,3387

Fonte: Ansys Inc., 2020 [1].

3.4. CENÁRIO DE OPERAÇÃO

Os ROV's podem realizar diversas atividades no fundo do mar e, portanto, deve-se definir quais operações são realizadas no atual projeto. Por ser um manipulador robusto, são consideradas as operações de movimentação de equipamentos submarinos e de torque em ferramentas ou no acionamento de válvulas. Dessa forma, no atual projeto, a garra estará restrita à aplicação de força nos seus dentes (para a simulação dos carregamentos) e à aplicação de força e torque em sua cavidade inferior (para a simulação da operação de torque).

Para garantir uma simulação mais completa e capaz de representar corretamente todas as operações, a aplicação de forças e momentos é dividida em três etapas. A etapa inicial consiste na aplicação da força nos dentes da garra (representando a operação de movimentação de cargas). As duas outras etapas consistem na aplicação de forças e momentos nas faces da cavidade inferior (representando a operação de torque), tendo como única diferença o sentido de aplicação do torque. A necessidade da aplicação de torque em ambos os sentidos se deve ao fato de o modelo atual de garra também operar nos dois sentidos, garantindo que o resultado da otimização topológica seja uma geometria simétrica.

Com essas definições, pode-se detalhar o carregamento de cada uma das etapas. Na etapa inicial, verifica-se que a garra robótica deve resistir às forças aplicadas nas regiões onde os objetos serão segurados (faces inferiores dos dentes das pinças). A força aplicada na garra pode ser definida como 4 kN (aproximadamente igual a força de preensão máxima do manipulador), sendo uma força superior à necessária para movimentar grande parte dos objetos submarinos.

No caso das duas outras etapas, a garra robótica deverá resistir a forças e momentos aplicados nas regiões onde as ferramentas de torque serão seguradas (faces internas da cavidade inferior da pinça – própria para esse tipo de operação). A força aplicada nas faces, como na etapa anterior, é definida como 4 kN e o torque aplicado pode ser definido como 170 N·m (torque nominal do manipulador).

Vale destacar que as forças aplicadas em uma garra de ROV irão variar de acordo com a necessidade, portanto é importante definir os esforços de operação do presente projeto como os esforços máximos previstos para o sistema. Por ser um problema com múltiplos carregamentos e o método utilizado trabalhar com equações lineares-elásticas, a proporção entre as magnitudes das forças e torques aplicados será essencial no algoritmo de otimização. Além disso, pode-se destacar que as regiões de aplicação, a direção e o sentido dos carregamentos são as definições importantes da atual seção, pois essas também irão influenciar diretamente na atuação do algoritmo para criar uma geometria ótima para a garra.

Outro carregamento importante em projetos submarinos está associado com a pressão hidrostática aplicada pela coluna d'água. Entretanto, as pressões aplicadas em cada uma das faces serão próximas (a maior diferença será entre as faces superior e inferior que distam milímetros entre si), o que praticamente torna o efeito da pressão hidrostática desprezível quando comparado aos 4.000 N de força e aos 170 N·m de torque aplicados na parte inferior da pinça.

3.5. CARACTERÍSTICAS DA OTIMIZAÇÃO

Definidas as características e o cenário de atuação da garra, pode-se decidir os parâmetros relacionados à otimização topológica, como indicado na seção 2.3.2 do presente documento. Por estar sendo projetada uma garra robótica capaz de resistir a carregamentos pesados e que deve possuir estabilidade em suas operações, o objetivo da otimização foi a minimização de *compliance* (maximização da rigidez). Vale destacar que *compliance* (ou flexibilidade) é o inverso da rigidez, portanto minimizar o *compliance* de uma estrutura é equivalente a maximizar a sua rigidez.

Por outro lado, como está sendo projetada uma garra otimizada em relação a outro modelo disponível no mercado, a restrição atual da otimização será o volume da pinça, visto que o produto otimizado deverá ter um volume menor ou igual ao volume do modelo comercial. Portanto, o volume da garra final possui o valor absoluto máximo restringido ao volume da garra paralela da TechnipFMC.

A região de otimização é toda a garra, visto que será necessário remover a maior quantidade de material possível para atender ao objetivo e à restrição. Por outro lado, as regiões de exclusão são aquelas que não podem ser modificadas ou removidas por contribuírem para a fixação da peça, para o contato com outros objetos (onde os carregamentos são aplicados) ou para o funcionamento de algum mecanismo. No atual projeto, as regiões de exclusão serão as regiões onde a garra será fixada (quatro furos nas laterais), as regiões onde a força será aplicada (seção inferior da garra) e as regiões que garantem espessuras mínimas para fixação e integridade da peça. Essas regiões podem ser mais bem visualizadas no Capítulo 4, sendo indicadas nos desenhos da Figura 22.

3.6. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Formulado o problema de otimização topológica de uma garra robótica para operações submarinas, pode-se comentar algumas considerações importantes sobre o projeto que será realizado. As simulações, bem como a otimização, serão realizadas com apenas uma das garras, visto que isso simplificará consideravelmente o problema e facilitará a convergência da solução. Utilizando apenas uma garra ao invés de duas, pode-se melhorar a qualidade do domínio e, conseqüentemente, melhorar a qualidade da simulação e da resposta do sistema.

Como em outros problemas numéricos computacionais, a geração de malha é uma etapa essencial para o procedimento de otimização topológica, visto que seu algoritmo opera em cada elemento dessa malha, ou seja, quanto maior o número de elementos, melhor será a representação da topologia. Dessa forma, deve-se definir uma malha que represente o domínio de forma precisa, principalmente em pontos do contorno e em superfícies mais complexas.

No trabalho atual, duas simulações serão comparadas: a simulação da garra comercial e a simulação da garra otimizada. Para a obtenção da topologia otimizada, também será realizada outra simulação da garra (com volume maior do que o modelo comercial), servindo como base para a atuação do algoritmo. Vale destacar que, desde que respeite os limites de projeto, esse domínio deverá ser o maior possível pelo fato de a otimização topológica trabalhar com a remoção de material.

Por último, pode-se ressaltar que o procedimento de otimização topológica atua com o conjunto de dados fornecidos pelo usuário (domínio inicial, condições de contorno, configurações da otimização etc.) e, portanto, o produto otimizado será específico para essas determinadas configurações. Isso implica na impossibilidade de haver uma geometria ótima para todas as situações e, dessa forma, torna-se importante definir as condições de operação (mais usuais ou para um determinado cenário) que sejam próximas da realidade.

4. MODELO NUMÉRICO COMPUTACIONAL

Neste capítulo são apresentados os modelos numéricos computacionais do problema definido anteriormente. Esses modelos foram configurados no software ANSYS (versão 2020 R2) que possui um módulo específico para a otimização topológica. A seção 4.1 apresenta a análise estrutural do modelo comercial de garra e a seção 4.2 apresenta o procedimento de otimização topológica e a análise estrutural do projeto otimizado.

4.1. PROJETO MECÂNICO CONVENCIONAL

A Figura 10 representa o layout do atual problema no programa, em que se utiliza o módulo de análise estrutural no projeto mecânico convencional (do modelo comercial de garra), onde são geradas definições da geometria, configurações do modelo e os resultados da simulação.

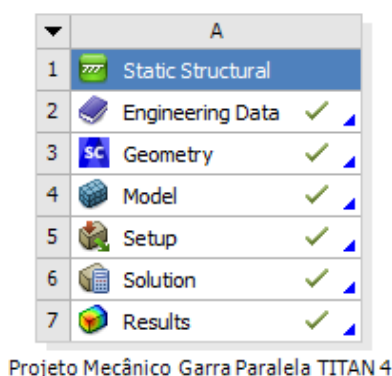


Figura 10: Módulo de análise estrutural no ANSYS (projeto convencional)

4.1.1. Definição da Geometria

A definição da geometria é a primeira etapa da implementação do projeto da garra convencional no programa de simulação. Como comentado na seção 3.2, as garras paralelas de 4" do manipulador TITAN 4 são as peças utilizadas no presente estudo. Para a correta simulação do comportamento mecânico desse modelo de garra, foi necessário modelar sua geometria no aplicativo SpaceClaim 2020 R2.

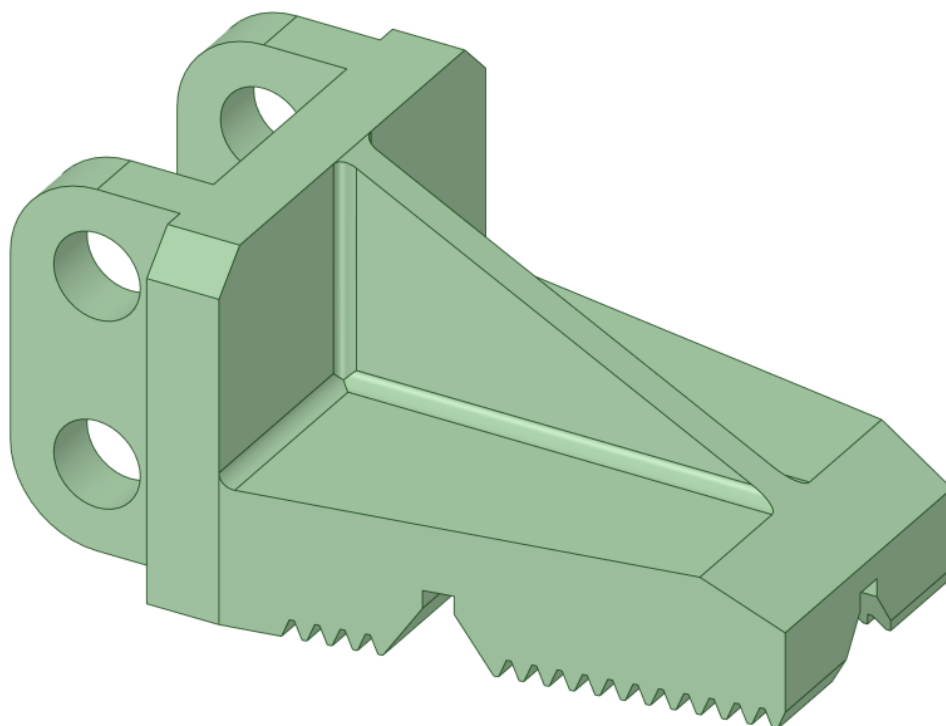


Figura 11: Geometria da garra paralela do manipulador TITAN 4

A Figura 11 mostra a geometria criada com base nas dimensões obtidas no *datasheet* do manipulador e nas fotos disponíveis do modelo em operação. Vale destacar que, apesar da figura representar de forma bastante próxima a garra robótica em questão, não foi possível obter todas as dimensões desse modelo de garra da TechnipFMC, visto que não foram encontrados desenhos mecânicos do componente.

Vale ressaltar também que a geometria acima reproduz os detalhes apresentados no modelo comercial da garra, como furos, dentes e interface para ferramentas, sendo esses fundamentais para as operações realizadas. Na parte inferior da garra, os dentes são utilizados para manipulação de objetos submarinos e as interfaces central e lateral são utilizadas para operação de ferramentas de torque. Na Figura 12, são visualizadas as principais dimensões da geometria modelada.

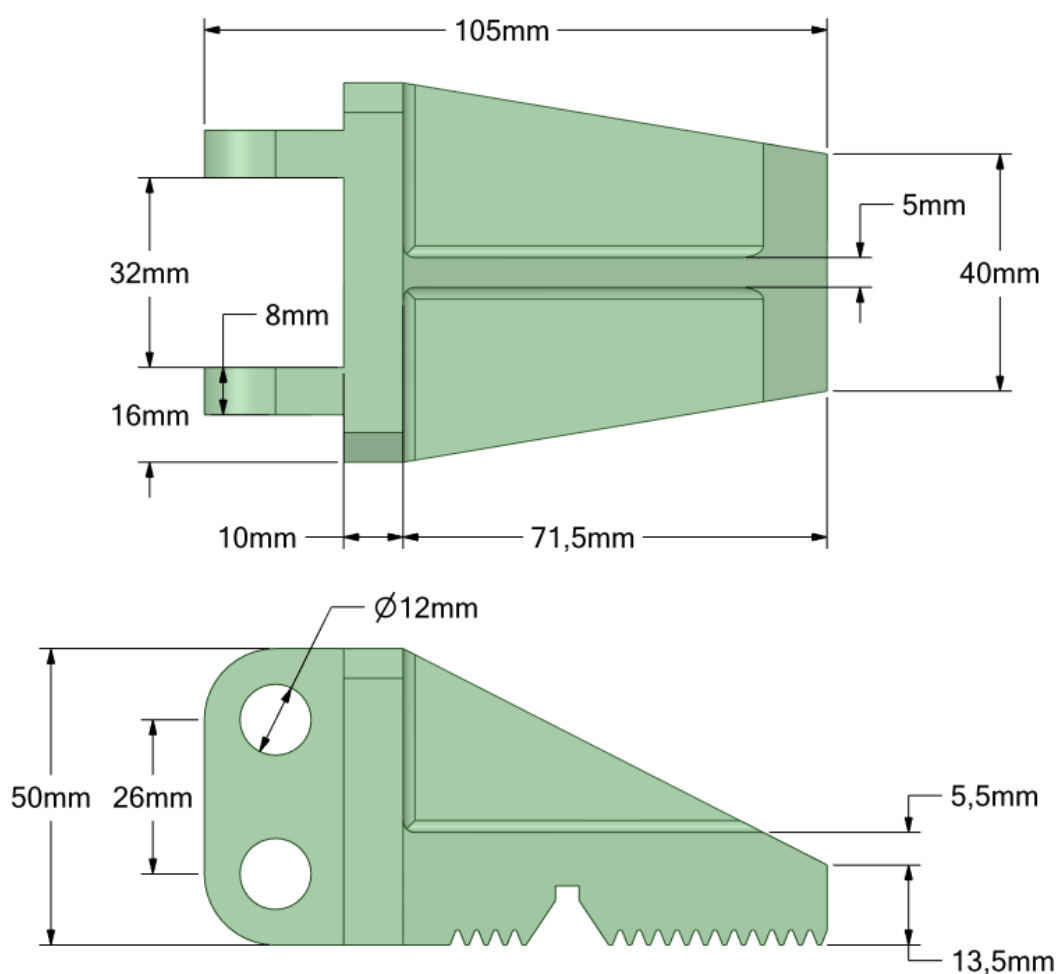


Figura 12: Dimensões principais da geometria da garra

4.1.2. Configuração do Modelo

Definida a geometria da garra no programa, deve-se configurar um modelo que esteja apto a simular de forma precisa o problema em questão. É necessário definir o material, a malha, as condições de contorno e as respostas desejadas da estrutura antes de realizar a simulação no modelo. O material escolhido para a estrutura foi a liga Ti 6Al-4V, conforme seção 3.3.

A geração da malha é a próxima etapa do procedimento. Para garantir uma malha com alto refinamento, foram utilizados o método dos tetraedros e a resolução máxima do tamanho dos elementos (maior quantidade de elementos que permitiu o programa rodar no computador). Essa configuração torna a solução mais lenta, porém aumenta o número de pontos a serem avaliados e, consequentemente, a precisão da

resposta. Na Figura 13, pode-se observar a malha gerada para a geometria inicial da garra robótica, totalizando mais de 76 mil elementos representando o domínio.

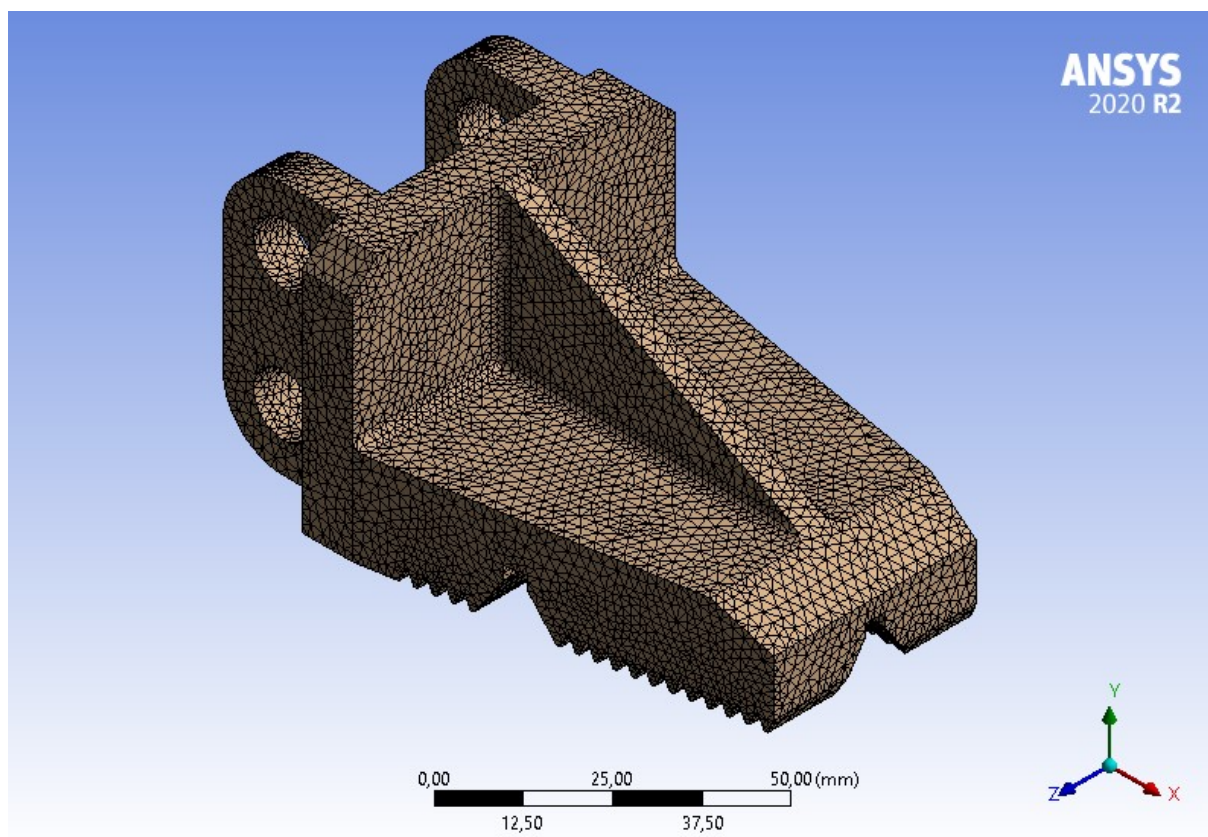


Figura 13: Geração de malha da geometria da garra convencional

As condições de contorno (suportes e força aplicada) são definidas em seguida. As superfícies internas dos quatro furos serão suportes cilíndricos fixados nas direções radial e axial e com liberdade de movimentação na direção tangencial, ou seja, serão suportes que permitem a rotação da peça em torno dos dois furos (sem outras movimentações). Com relação aos carregamentos, o problema foi dividido em 11 passos, para garantir a aplicação de cada uma das forças e momentos de forma separada, como as três etapas comentadas na seção 3.4.



Figura 14: Distribuição dos carregamentos ao longo do tempo

A Figura 14 indica a variação da magnitude das forças e do momento ao longo do tempo e dos 11 passos definidos na simulação. O primeiro gráfico indica a aplicação de força para o carregamento de objetos e equipamentos submarinos e, portanto, essa está sendo aplicada perpendicular às faces mais externas dos 32 dentes da pinça. Por outro lado, os dois outros gráficos estão representando a aplicação de torque e força nos canais próprios para ferramenta de torque, sendo aplicadas nas 6 faces que compõem esses canais (as forças são aplicadas na direção perpendicular de cada plano e os torques são aplicados na direção X). A Figura 15 ilustra as regiões onde cada um desses carregamentos é aplicado.

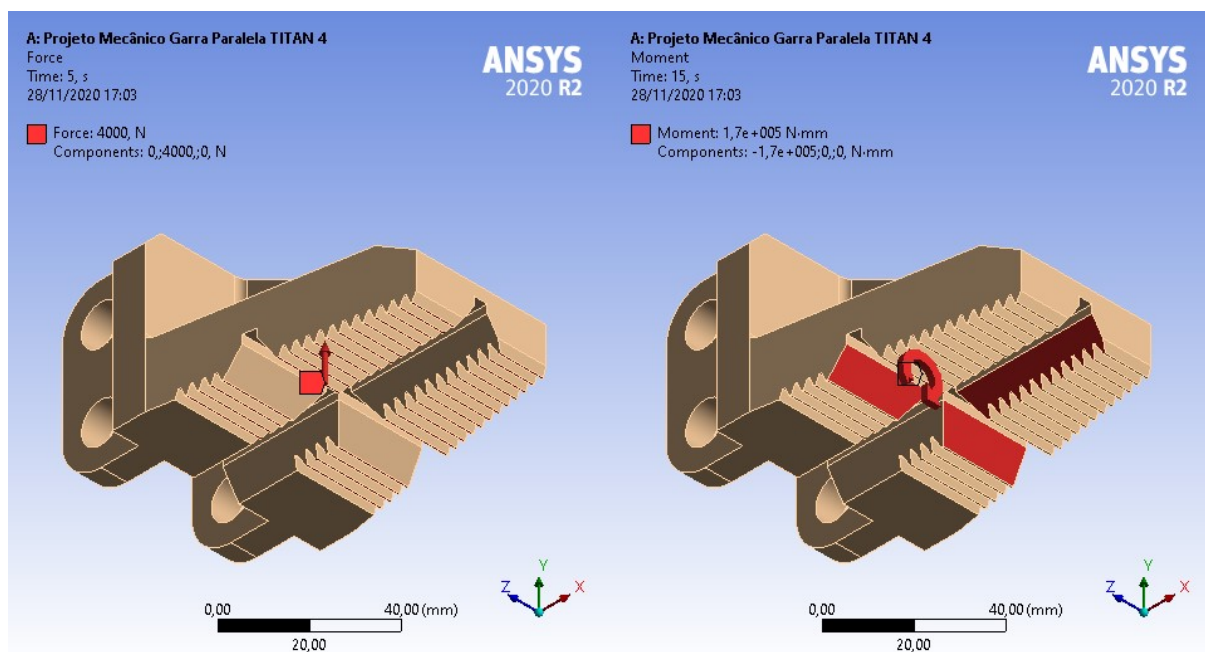


Figura 15: Definição do local de aplicação dos carregamentos (dentes e interface, respectivamente)

Por último, foram definidas as respostas desejadas, servindo de comparação entre o modelo convencional e o otimizado. Para cada elemento do domínio foram calculadas a tensão equivalente de von Mises, a deformação equivalente de von Mises e o deslocamento total naquele ponto. Na próxima seção, os resultados são calculados e analisados.

4.1.3. Resultado da Simulação

Definidas as configurações da geometria e do modelo da garra de ROV, pode-se realizar a simulação do sistema. Vale destacar que esse resultado será importante não só para a verificação dos esforços e deformações presentes durante a operação da garra, como também na identificação das regiões e operações críticas.

Para facilitar a visualização, ao longo do presente projeto, os resultados das simulações são mostrados em dois tempos distintos: 5 e 25 segundos. No tempo de 5 segundos a garra resiste a forças aplicadas em seus dentes, enquanto no tempo de 25 segundos a garra resiste a força e torque aplicados na interface inferior. Vale destacar que a etapa intermediária (aplicação de torque no sentido oposto) possui resultados simétricos aos obtidos na etapa final (25 segundos).

As figuras abaixo representam as respostas do sistema, nesses dois instantes de tempo, em relação ao carregamento aplicado: a Figura 16 indica a distribuição das tensões equivalentes de von Mises ao longo do domínio da garra, a Figura 17 indica a distribuição das deformações equivalentes de von Mises e a Figura 18 indica a distribuição dos deslocamentos. As simulações à esquerda das figuras representam a etapa inicial de carregamento (5 segundos) e as simulações à direita das figuras representam a etapa final de carregamento (25 segundos).

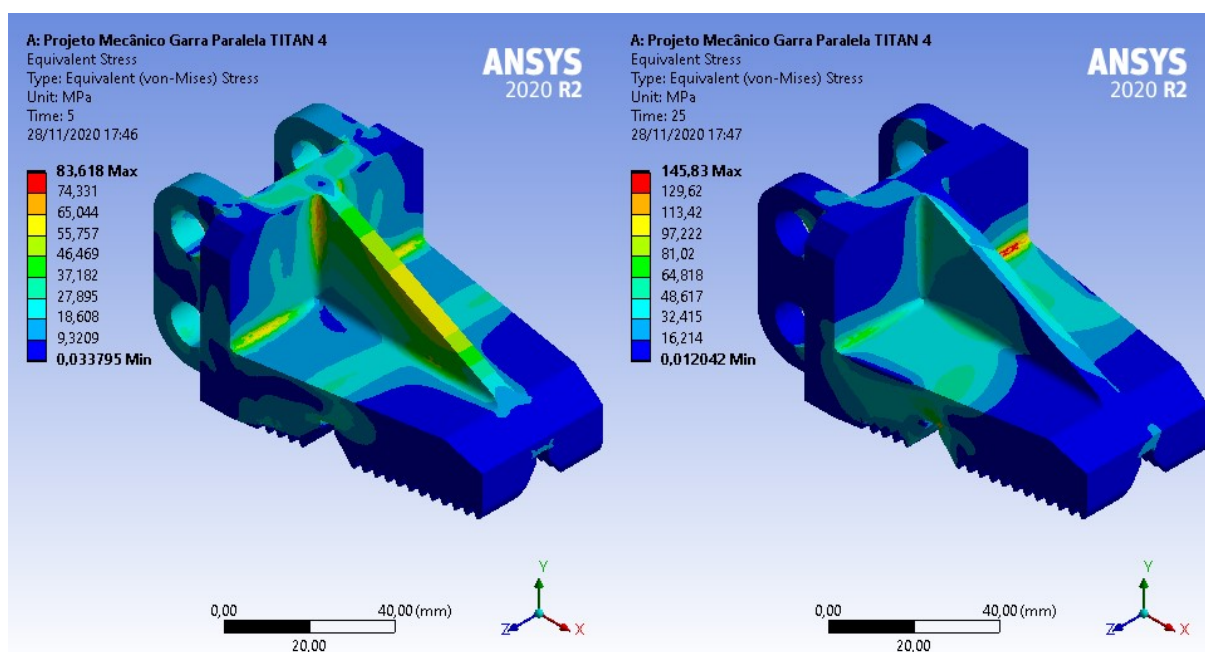


Figura 16: Tensões de von Mises do projeto convencional da garra

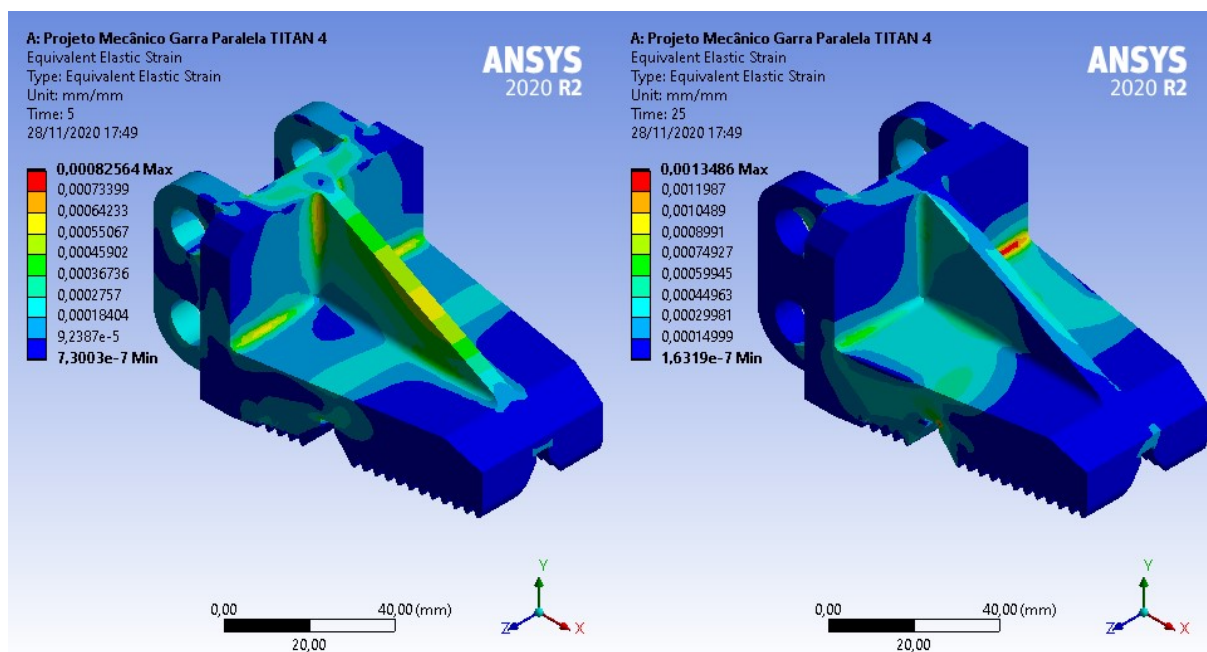


Figura 17: Deformações de von Mises do projeto convencional da garra

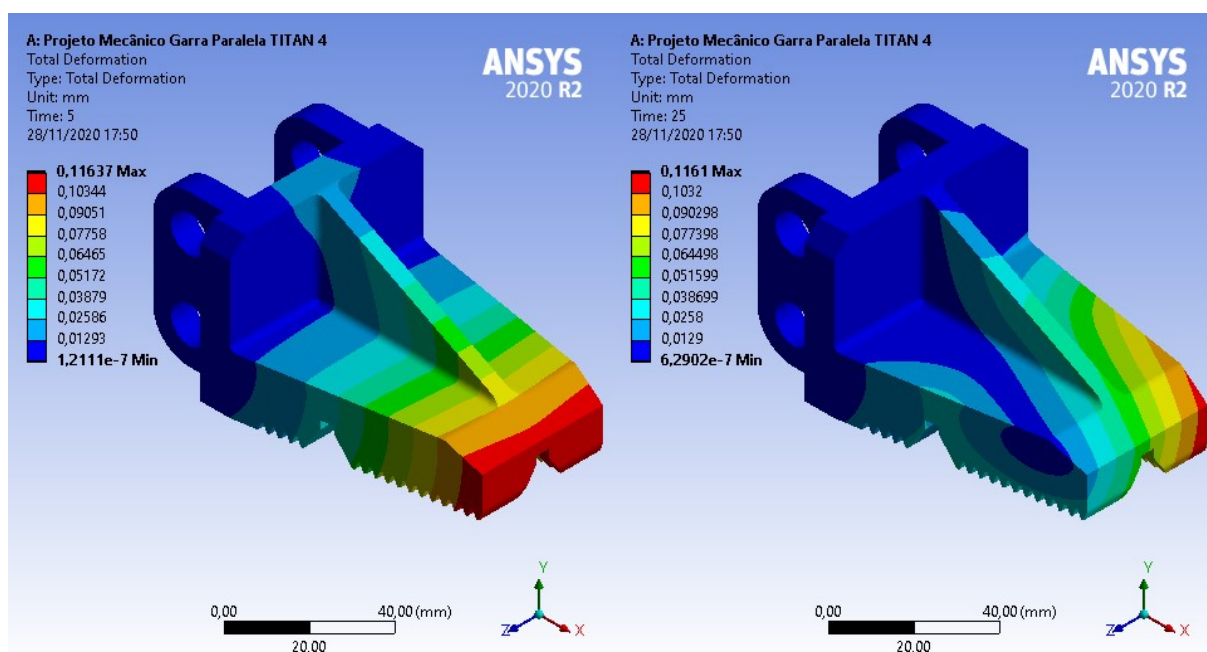


Figura 18: Deslocamentos do projeto convencional da garra

Tabela 3: Resultados da simulação da garra convencional

	Tensão Máxima	Deformação Máxima	Deslocamento Máximo
Etapas 1	83,6 MPa	0,000826	0,1164 mm
Etapas 2 e 3	145,8 MPa	0,001349	0,1161 mm

Observando as tensões equivalentes de von Mises, pode-se perceber que as operações de torque produzem tensões maiores no corpo da garra. A superposição do torque com as forças (etapa final) gerou uma tensão máxima de 145,8 MPa na garra, enquanto a força aplicada nos dentes da garra (etapa inicial) gerou uma tensão máxima de 83,6 MPa. Vale destacar que a tensão máxima no projeto convencional da garra ($\sigma_{\max} = 145,8 \text{ MPa}$) é inferior ao limite de escoamento da liga de titânio ($S_Y = 845,7 \text{ MPa}$), sendo obtido um fator de segurança de 5,8 contra o escoamento.

Pode-se perceber também que as maiores tensões estão posicionadas entre as regiões de aplicação dos carregamentos (parte inferior da garra) e as regiões de apoio (furos). Por outro lado, as tensões representadas em azul (principalmente na extremidade da garra) são bastante inferiores, contribuindo menos para a sustentação da estrutura, justamente por estarem mais afastadas dos apoios (furos) da pinça.

No caso das deformações equivalentes de von Mises, verifica-se um comportamento proporcional às tensões, visto que a garra atua no regime linear-elástico. Novamente, as deformações geradas pela etapa inicial de carregamento são menores do que as deformações geradas pela etapa final: a força aplicada nos dentes da garra (etapa inicial) gerou uma deformação máxima de 0,000826, enquanto a superposição do torque com as forças (etapa final) gerou uma deformação máxima de 0,001349 na garra.

Por último, vale destacar que a distribuição dos alongamentos é relativamente simples e esperada, principalmente para um problema onde as extremidades (furos) à esquerda são suportes fixos. A real importância desse gráfico está na comparação com os valores de deslocamentos da garra otimizada, visto que a peça final deve possuir uma rigidez mais elevada em comparação ao modelo atual.

4.2. PROJETO MECÂNICO OTIMIZADO

Realizada a análise estrutural da garra robótica convencional, pode-se implementar o projeto mecânico otimizado da garra. A Figura 19 representa o layout e a integração entre as etapas do atual problema, dividido em três módulos: análise estrutural da garra inicial, otimização topológica da geometria e análise estrutural (validação) da garra otimizada.

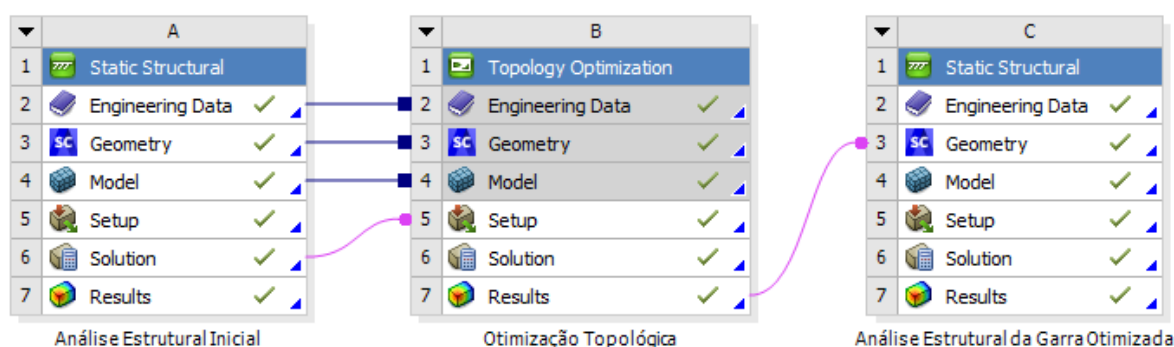


Figura 19: Visão geral da implementação do problema no ANSYS (projeto mecânico otimizado)

Nas próximas seções cada módulo será mais bem detalhado bem como os resultados das análises estruturais e da otimização topológica serão mostrados e discutidos. A seção 4.2.1 apresenta a análise estrutural inicial da garra (módulo A da Figura 19), a seção 4.2.2 apresenta a otimização topológica (módulo B) e a seção 4.2.3 apresenta a validação do projeto mecânico otimizado (módulo C).

4.2.1. Análise Estrutural Inicial

4.2.1.1. Definição da Geometria

A geometria utilizada na análise inicial do problema de otimização deve ser maior do que o modelo comercial da garra abordado na seção 4.1, uma vez que o programa atua com a remoção de material do domínio. Vale destacar que a definição do domínio na otimização topológica é uma das etapas mais importantes no estudo, visto que um domínio muito reduzido irá impactar no algoritmo de otimização do programa. A Figura 20 mostra a geometria inicial utilizada na primeira análise estrutural do atual problema.

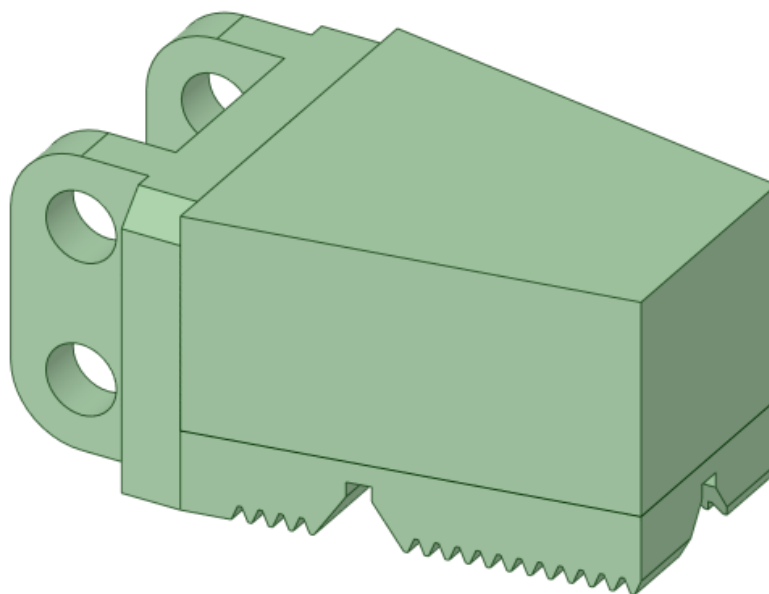


Figura 20: Geometria inicial definida para a otimização topológica da garra

Pode-se perceber que a geometria da garra é essencialmente a mesma (principalmente nos apoios e detalhes dos dentes e canais), com exceção do centro da figura, onde houve um maior preenchimento de material. Essa geometria de maior volume faz parte do problema de otimização, sendo um domínio de projeto onde o algoritmo ainda irá atuar. Por último, vale destacar que a divisão observada entre o bloco central e o restante da peça é utilizada para auxiliar a definição das regiões de exclusão nas características da otimização.

4.2.1.2. Configuração do Modelo

Novamente, definida a geometria inicial da garra, deve-se configurar o modelo para que esteja apto a simular de forma precisa o problema em questão. É necessário definir o material, a malha, as condições de contorno e as respostas desejadas da estrutura antes de realizar a simulação no modelo. Todas essas definições são idênticas às da simulação anterior, descritas na seção 4.1.2.

Na atual etapa, a correta definição e geração da malha influenciará diretamente nos resultados da otimização topológica, visto que quanto menor o tamanho de cada elemento, melhor será o critério de remoção adotado pelo algoritmo. Apesar da maximização da resolução da malha torna a solução mais lenta, tal opção será essencial na correta remoção de material da geometria. Na Figura 21, pode-se observar a malha gerada para a geometria inicial da garra robótica, totalizando mais de 410 mil elementos representando o domínio.

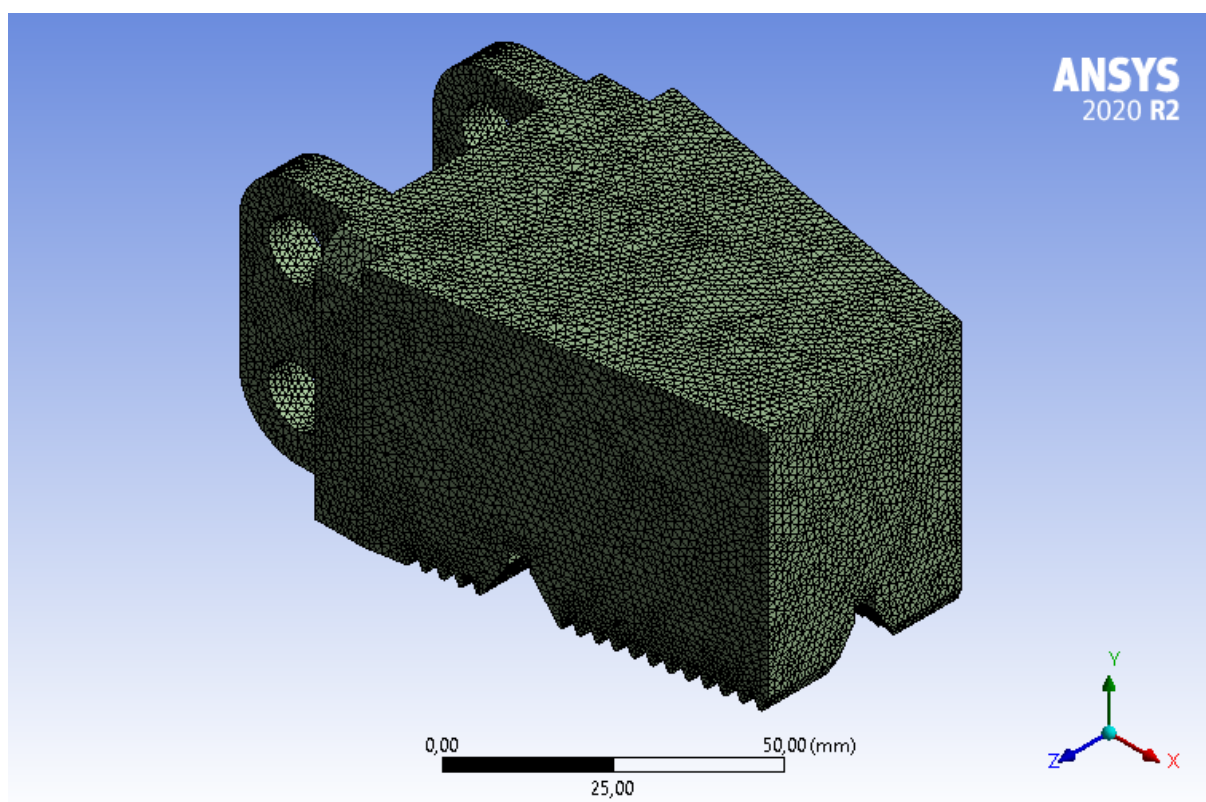


Figura 21: Geração de malha da geometria inicial (problema de otimização)

4.2.1.3. Resultado da Simulação

Definidas as configurações da geometria e do modelo da garra, pode-se realizar a simulação do sistema. Vale destacar que esse resultado será essencial como entrada para o módulo de otimização topológica (o programa irá verificar os elementos que não são essenciais estruturalmente). Com a obtenção do comportamento mecânico da garra, pode-se avançar para o módulo de otimização topológica do programa.

4.2.2. Otimização Topológica

Realizada a análise estrutural da geometria inicial, pode-se aplicar o módulo de otimização topológica do programa (módulo B na Figura 19). Esse módulo utiliza os resultados obtidos nessa análise, considerando as condições de contorno da geometria, e avalia os elementos do domínio que não contribuem efetivamente para a rigidez da estrutura durante a operação. A próxima seção aborda as principais configurações adotadas no procedimento de otimização topológica do programa.

4.2.2.1. Configurações da Otimização

A definição das configurações adotadas na simulação é essencial para uma representação precisa e próxima ao cenário de atuação; analogamente, no módulo da otimização de topologia, devem ser escolhidas as opções mais adequadas ao problema em questão. Para a aplicação do algoritmo no programa, é necessário definir as regiões de otimização, regiões de exclusão, objetivo da otimização e restrição de resposta. Essas características são especificadas previamente na seção 3.5 e os detalhes das suas implementações no programa são abordados nesta seção.

Como comentado anteriormente, o objetivo da otimização é a minimização da flexibilidade da geometria (maximização da rigidez), enquanto a restrição de resposta é o volume com um valor absoluto igual ao volume da garra comercial. O volume do modelo comercial da garra é $108,17 \text{ cm}^3$, sendo, portanto, o valor máximo absoluto que a garra otimizada deve assumir. Além dessa, foi adicionada uma restrição de manufatura da peça, considerando como 5 mm a espessura mínima do membro, evitando a geração de regiões muito finas e difíceis para fabricar.

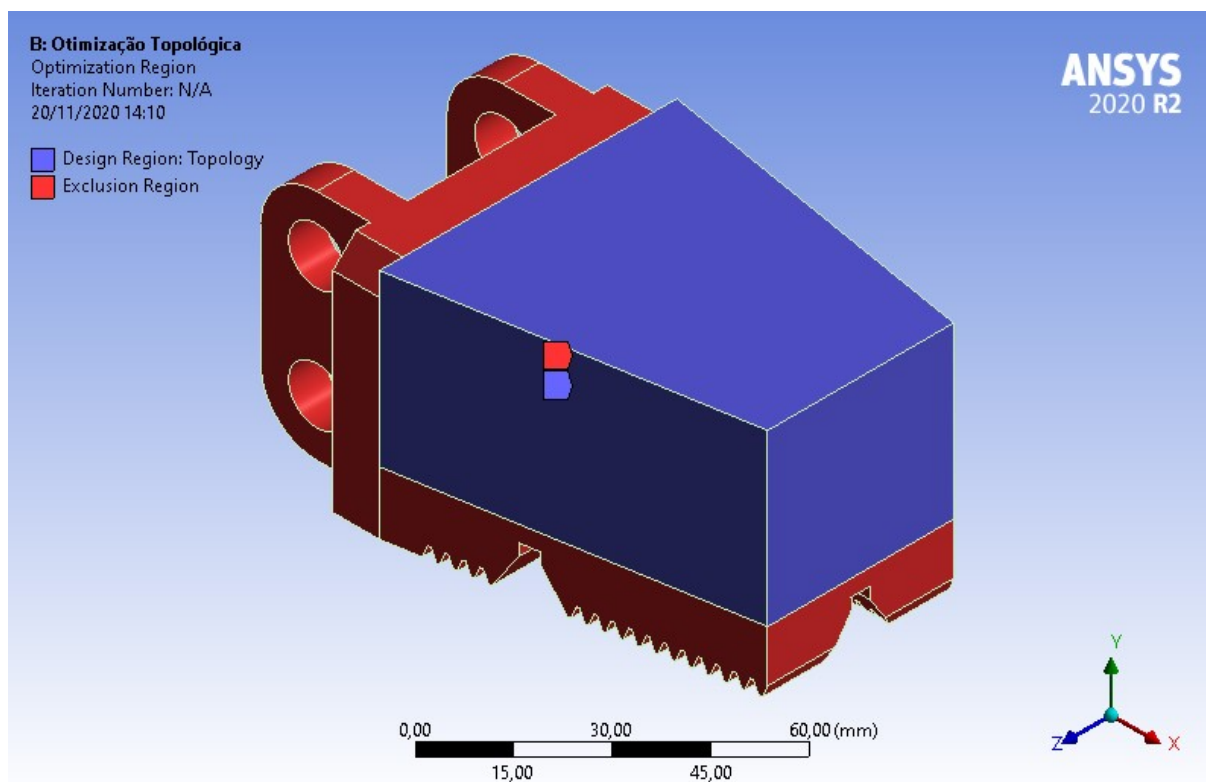


Figura 22: Configurações da otimização topológica da garra

A Figura 22 contempla as configurações adotadas para as regiões de otimização e exclusão, de forma ilustrativa, ao longo da estrutura inicial da garra. A região de otimização é definida como toda a região da garra e a região de exclusão é definida como as regiões que não podem ser removidas da geometria (pelas funções de suporte e operação da garra) – representadas em vermelho.

As regiões próximas aos furos são regiões importantes como suporte da peça, uma vez que irão promover a interface entre a garra e o restante do manipulador, e as regiões na parte inferior da peça são aquelas essenciais nas operações realizadas pela garra, sendo necessária uma espessura mínima para seu correto funcionamento. Portanto, com as configurações acima, o algoritmo de otimização se restringe a atuar na remoção de material do bloco azul (região onde o material pode ser retirado).

Com a definição das configurações da otimização e os resultados da análise estrutural da geometria não-otimizada, pode-se aplicar o algoritmo de otimização topológica do programa para a obtenção da geometria ideal do atual projeto de garra. Na próxima seção, os resultados desse módulo são calculados e analisados.

4.2.2.2. Resultado da Otimização

O resultado obtido no algoritmo de otimização topológica é uma das etapas mais importantes do atual projeto, visto que a geometria gerada nesse módulo irá representar o melhoramento da estrutura em relação ao modelo inicial de garra. As Figuras 23 e 24 representam a geometria otimizada da garra de ROV, resultado do algoritmo de otimização topológica do programa aplicado na simulação inicial com as configurações da seção anterior.

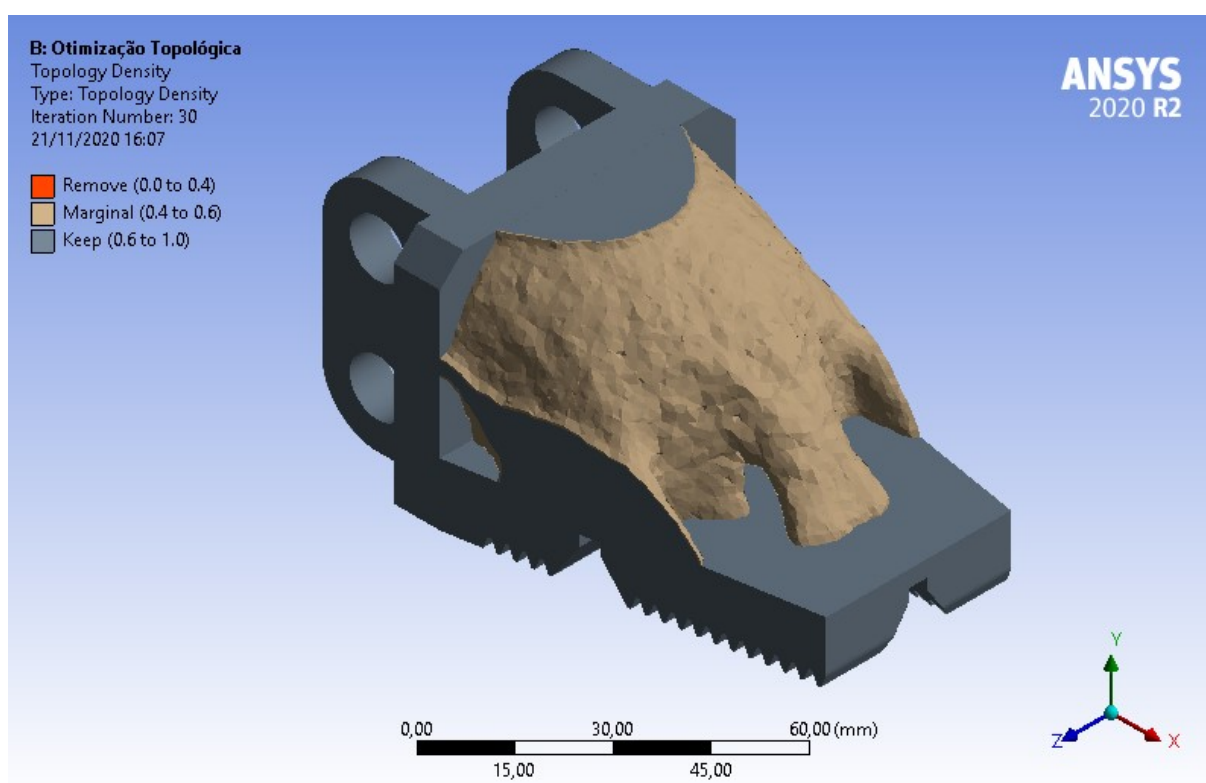


Figura 23: Otimização topológica da garra de ROV

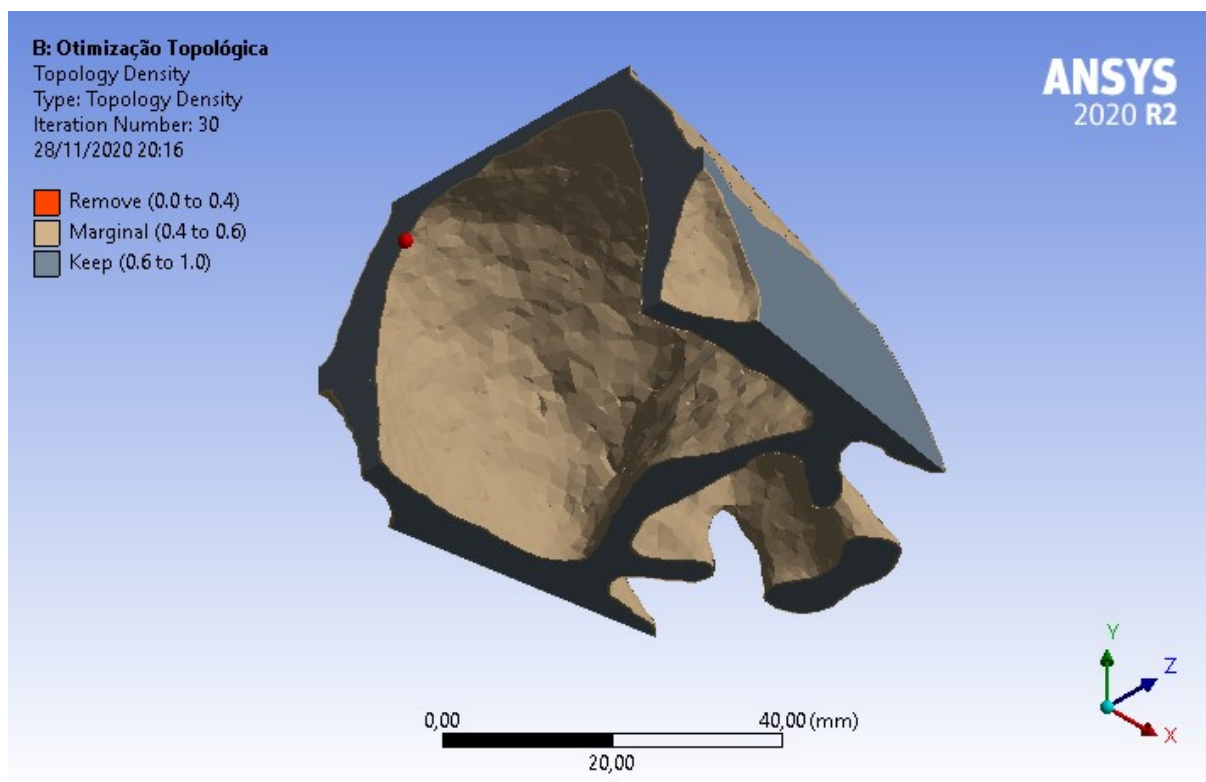


Figura 24: Visualização da região otimizada da garra de ROV

Antes de analisar os resultados do algoritmo propriamente ditos, pode-se entender melhor o significado da figura acima e de suas legendas. As três regiões (representadas por diferentes cores) ilustram a atuação do código ao longo do domínio, sendo definindo um valor mínimo para o qual um elemento é mantido. Em uma escala em que o valor 0 representa a remoção do elemento e o valor 1,0 representa a permanência do mesmo, define-se tradicionalmente como 0,5 o valor limite para a remoção de um elemento (valor de corte).

As regiões marcadas em cinza representam os elementos do domínio que permanecem após a otimização, ou seja, são regiões que possuem uma importante função estrutural na garra. No outro extremo, as regiões em vermelho representam os elementos do domínio removidos após o procedimento (por isso não aparecem no domínio), ou seja, são regiões que possuem pouca influência na rigidez da peça. Por último, as regiões marcadas em marrom representam os elementos do domínio que ficaram próximos ao critério de remoção (valores entre 0,4 e 0,6), ou seja, assumem valores medianos de importância nas funções estruturais da peça, podendo ser ajustadas pelo usuário de acordo com as preferências.

Entendendo melhor o significado das regiões da figura, pode-se comentar sobre o resultado obtido. Como era esperado, as zonas onde as tensões equivalentes de von Mises eram baixas foram majoritariamente reduzidas, sendo essas as regiões mais afastadas dos apoios e dos carregamentos (na extremidade da garra). Por outro lado, as regiões entre os furos e a interface inferior foram mantidas, devido a uma maior influência dessas regiões na sustentação das estruturas.

O resultado da otimização topológica formou um “casco” ligando a parte lateral da garra com a parte inferior. Isso se deve ao fato dos múltiplos carregamentos que são aplicados na peça em questão, visto que essa precisará resistir a forças e torques distintos. Pode-se destacar também a transição suave da geometria otimizada, evitando regiões com possíveis acúmulos de tensão e, ainda, colaborando para o aumento da rigidez. Para o melhor entendimento da garra otimizada, deve-se realizar uma análise estrutural dessa peça com as mesmas condições de contorno do problema inicial.

4.2.3. Análise Estrutural da Garra Otimizada

4.2.3.1. Definição da Geometria

Obtida a geometria otimizada no módulo de otimização topológica do programa (módulo B), pode-se utilizar essa nova peça como entrada do módulo de análise estrutural (módulo C) para a validação dos resultados obtidos na seção anterior. As Figuras 25, 26 e 27 mostram a geometria da garra otimizada já convertida para o módulo final do programa.

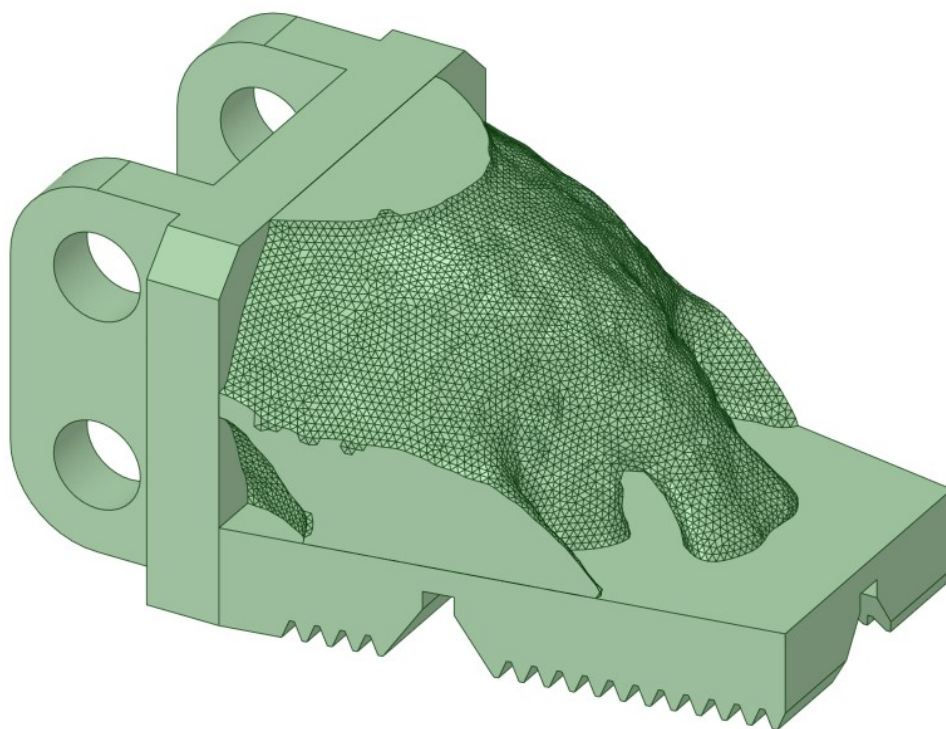


Figura 25: Geometria do projeto otimizado de garra

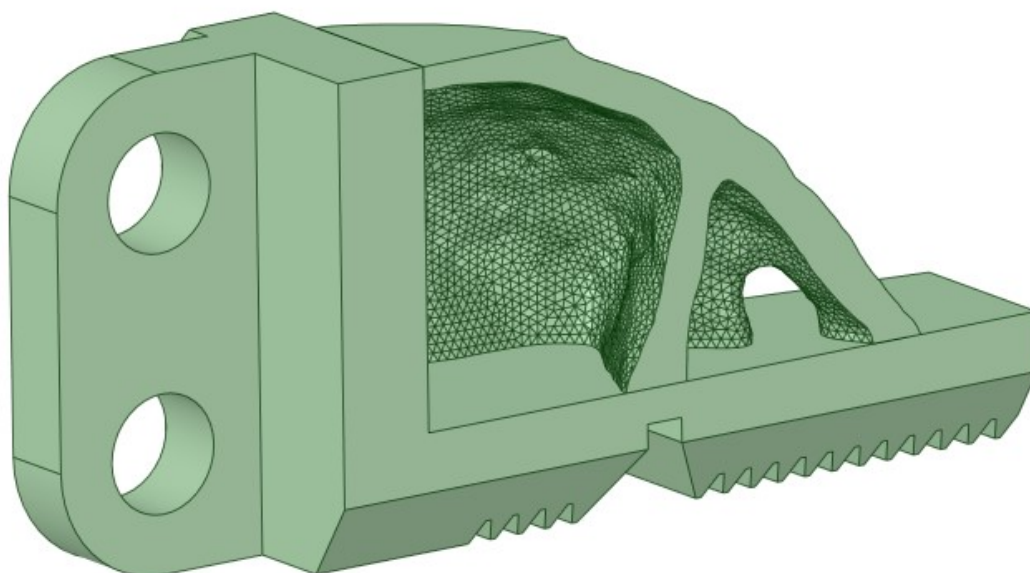


Figura 26: Vista de seção (lateral) da geometria otimizada da garra



Figura 27: Vista de seção (posterior) da geometria otimizada da garra

Pode-se destacar que, ao converter a estrutura gerada pelo o programa para uma nova peça, foi realizada um melhorar na sua geometria. Os contornos gerados pelo módulo anterior foram suavizados e algumas imperfeições removidas, prevenindo que a análise fosse influenciada por baixa definição ou falhas do domínio.

Utilizando as ferramentas do programa SpaceClaim, pode-se também realizar a medida do volume da peça otimizada para verificar se esse é menor ou igual ao volume da garra paralela do manipulador TITAN 4. O volume estimado da peça final é $108,15 \text{ cm}^3$, valor menor do que o volume da garra comercial ($108,17 \text{ cm}^3$), indicando que a restrição da otimização é respeitada.

4.2.3.2. Configuração do Modelo

Definida a geometria da garra otimizada, deve-se configurar o modelo para que esteja apto a simular de forma precisa o problema em questão. É necessário definir o material, a malha, as condições de contorno e as respostas desejadas da estrutura antes de realizar a simulação no modelo. Assim como na simulação do modelo inicial (módulo A), todas essas definições são idênticas às da simulação da

garra comercial, descritas na seção 4.1.2. Na Figura 28, pode-se observar a malha gerada para a geometria inicial da garra robótica, totalizando mais de 403 mil elementos representando o domínio.

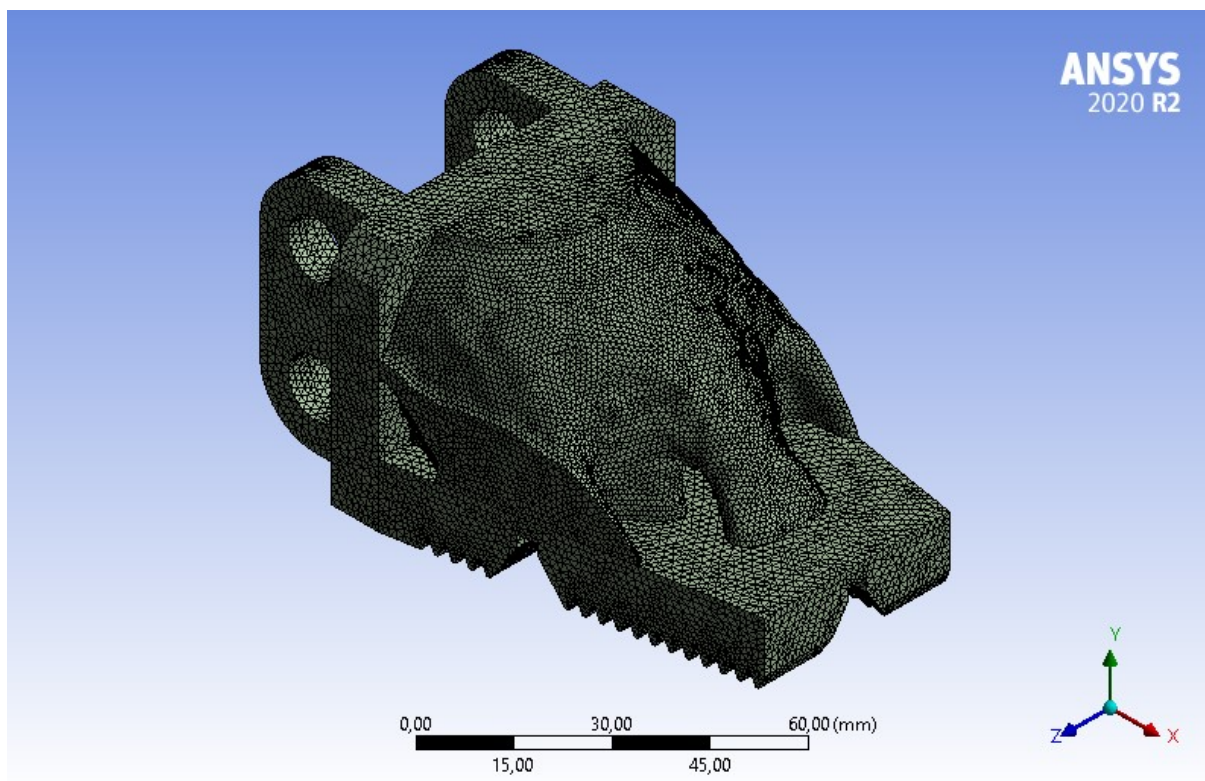


Figura 28: Geração de malha do projeto otimizado de garra

4.2.3.3. Resultado da Simulação

Definidas as configurações da geometria e do modelo da garra, pode-se realizar a simulação do sistema. Vale destacar que tal resultado será essencial na validação do projeto otimizado da garra, visto que esse poderá ser comparado com os resultados da simulação da garra comercial, indicando os efeitos da otimização nas análises. As figuras abaixo representam as respostas do sistema em relação aos carregamentos aplicados: a Figura 29 indica a distribuição das tensões de von Mises ao longo do domínio inicial da garra, a Figura 30 indica a distribuição de deformações de von Mises e a Figura 31 indica a distribuição de deslocamentos.

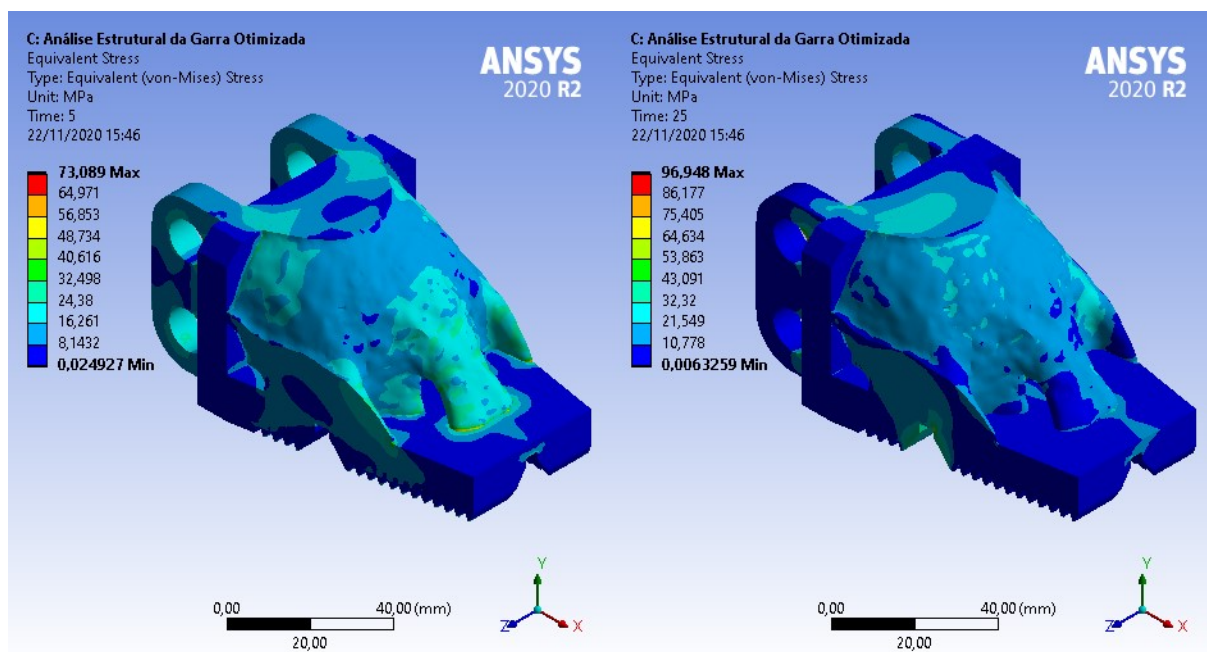


Figura 29: Tensões de von Mises do projeto otimizado da garra

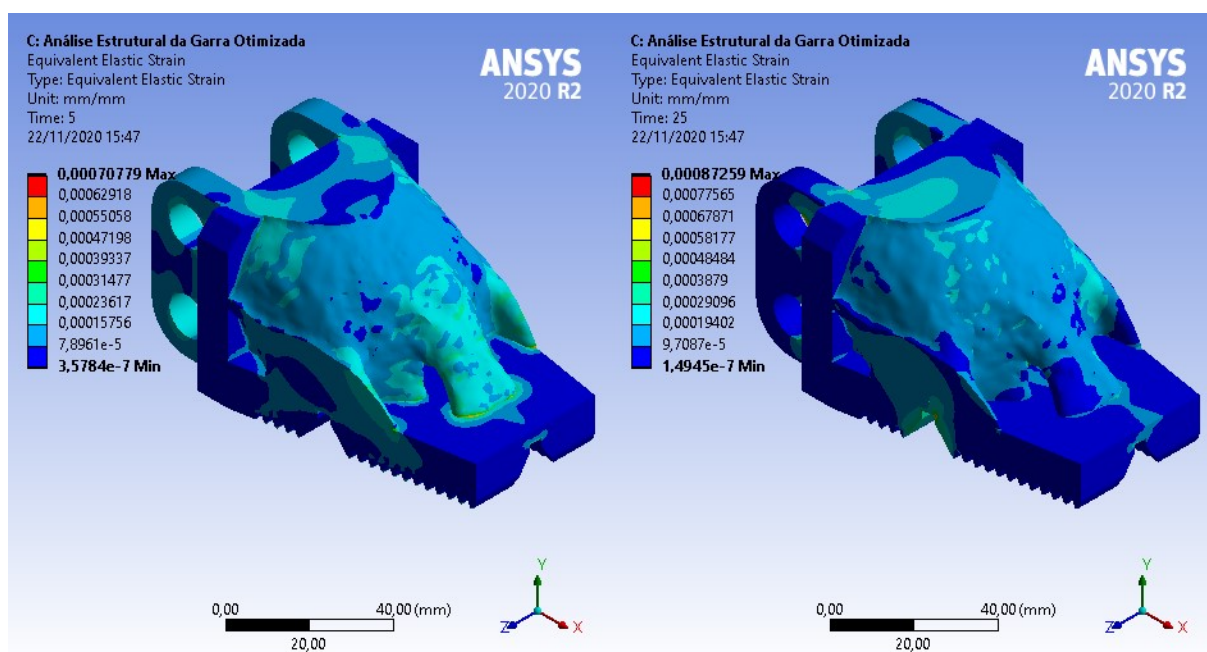


Figura 30: Deformações de von Mises do projeto otimizado da garra

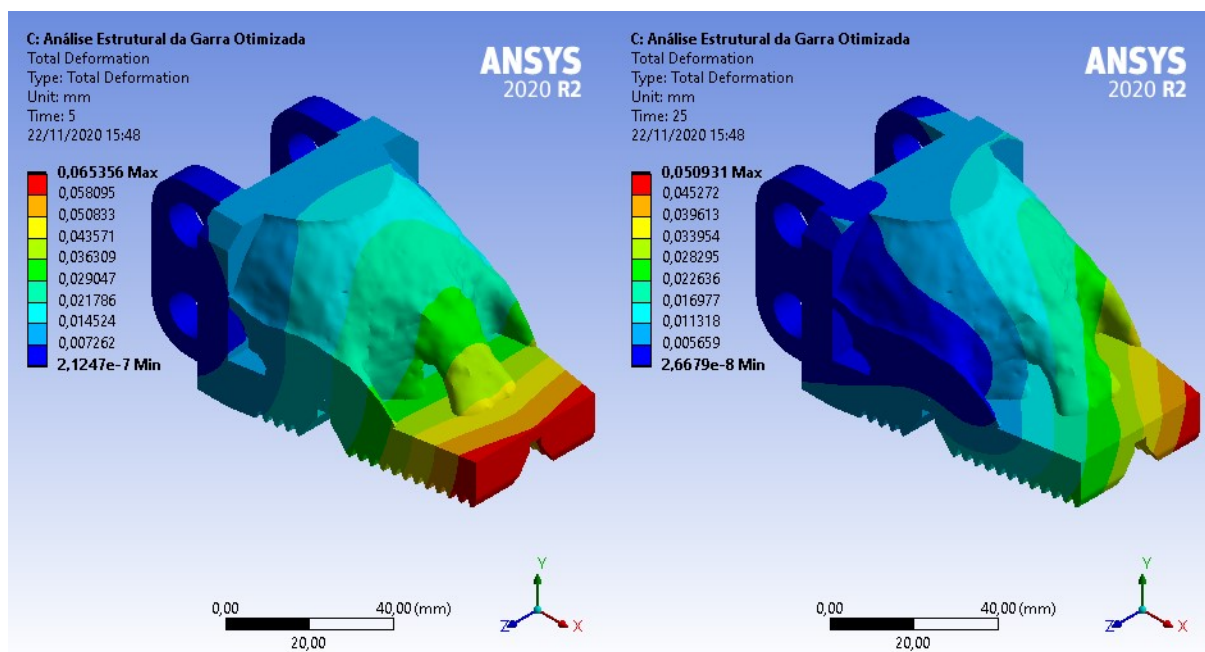


Figura 31: Deslocamentos do projeto otimizado da garra

Tabela 4: Resultados da simulação da garra otimizada

	Tensão Máxima	Deformação Máxima	Deslocamento Máximo
Etapas 1	73,1 MPa	0,000708	0,0654 mm
Etapas 2 e 3	96,9 MPa	0,000873	0,0509 mm

Observando as figuras e a tabela acima, pode-se destacar que a performance da garra otimizada melhorou consideravelmente em relação ao modelo convencional. Como verificado na análise estrutural da garra comercial, a etapa final (aplicação de força e torque nas interfaces) era a atividade mais crítica e, portanto, foi etapa em que o algoritmo mais atuou. A tensão máxima da etapa final foi reduzida de 145,8 MPa para 96,9 MPa, o que representa uma diminuição de 33,5% entre as duas simulações. A geometria em forma de casco auxilia na melhor distribuição de tensões ao ser aplicado torque nas interfaces da garra, visto que essa nova estrutura permite mais pontos de conexão entre as laterais da garra e a sua base (conexão inexistente no modelo convencional).

Por outro lado, na garra atual, a tensão máxima na etapa inicial é 73,1 MPa, valor abaixo da tensão máximo para a garra inicial (83,6 MPa), o que indica que

também houve melhora de desempenho na primeira atividade (movimentação de carga). Portanto, pode-se destacar que, apesar de não ser o objetivo principal do procedimento, o algoritmo de otimização topológica colaborou para a redução das tensões equivalentes na etapa inicial e, paralelamente, diminuiu levemente as tensões equivalentes relacionadas à etapa inicial. Vale destacar que o fator de segurança contra o escoamento passa a ser 8,7 no atual modelo, consideravelmente maior do que o da garra anterior (5,8).

Como era esperado em uma análise linear-elástica, a distribuição das deformações equivalentes foi bastante próxima do comportamento das tensões. As deformações máximas na etapa inicial passaram de 0,000826 no modelo anterior para 0,000708 no atual modelo, representando uma leve diminuição no caso de carregamento nos dentes da garra. Por outro lado, na etapa final, houve uma redução considerável da deformação máxima: 0,001349 no modelo comercial para 0,000873 no modelo otimizado (redução de 35,3%).

Vale destacar que as distribuições de tensões e deformações foram bem mais homogêneas na região de otimização, não predominando nem tensões tão elevadas nem tão baixas. Isso indica que as regiões que não contribuíam para a sustentação da estrutura foram devidamente removidas.

Por outro lado, pode-se constatar o aumento da rigidez da garra observando os deslocamentos máximos da garra. Em ambas as etapas (inicial e final), houve uma considerável redução dos valores dos deslocamentos ao longo do domínio da peça, sendo possível associar esse comportamento ao objetivo principal da otimização, visto que corpos mais rígidos tendem a se deslocar menos. O alongamento máximo reduziu de 0,116 mm para 0,065 mm na etapa inicial (redução de 43,8%) e de 0,116 mm para 0,051 mm na etapa final (redução 56,1%).

Uma observação importante a ser realizada está no aumento da complexibilidade da estrutura da garra. Se por um lado a garra inicial pode ser fabricada facilmente com os processos típicos de usinagem disponíveis na indústria, o modelo de garra otimizado é consideravelmente mais complexo, principalmente na região de otimização. Entretanto, pode-se destacar que técnicas de manufatura

aditiva, como a impressão 3D, tornam essas peças viáveis, principalmente com as restrições de manufatura impostas nas configurações e com o melhoramento da geometria pelo SpaceClaim.

Tabela 5: Resultados da otimização topológica

Resultado	Projeto Convencional	Projeto Otimizado	Diferença
Volume	108,17 cm ³	108,15 cm ³	- 0,18%
Fator de Segurança (Escoamento)	5,8	8,7	+ 50,5 %
Tensão Máxima (Etapa Inicial)	83,6 MPa	73,1 MPa	- 12,6 %
Tensão Máxima (Etapa Final)	145,8 MPa	96,9 MPa	- 33,5 %
Deformação Máxima (Etapa Inicial)	0,000826	0,000708	- 14,3 %
Deformação Máxima (Etapa Final)	0,001349	0,000873	- 35,3 %
Alongamento Máximo (Et. Inicial)	0,116 mm	0,065 mm	- 43,8 %
Alongamento Máximo (Et. Final)	0,116 mm	0,051 mm	- 56,1 %

A Tabela 5 sintetiza os resultados do procedimento de otimização realizado, verificando de forma mais direta a influência desse método em cada uma das variáveis analisadas. Portanto, além da considerável melhora da rigidez da estrutura (objetivo principal da otimização), verifica-se uma melhora na performance geral da garra com a diminuição das tensões e deformações percebidas na peça.

5. CONCLUSÃO

A execução do projeto mecânico de uma garra robótica para aplicações submarinas, utilizando a otimização topológica, resultou em uma geometria final com melhora geral da performance e que atende ao objetivo principal estabelecido: o aumento da rigidez da estrutura. Com um volume praticamente igual ao do modelo comercial (garra paralela do manipulador TITAN 4 da TechnipFMC), foi possível gerar uma geometria otimizada aos carregamentos especificados (movimentação de cargas e operações de torque).

Os valores máximos de tensão equivalente no projeto da garra foram reduzidos em 12,6% e 33,5% nas etapas inicial e final, respectivamente, sendo bastante semelhantes ao comportamento das deformações equivalentes (por ser um modelo linear-elástico). A maior redução percebida nas atividades de torque se deve ao fato de ser o cenário crítico observado na simulação do modelo comercial da garra. Além disso, vale destacar o aumento do fator de segurança contra o escoamento de 5,8 para 8,7, indicando a melhora geral da distribuição de tensão na estrutura ao longo das diferentes etapas de carregamento.

No caso dos alongamentos, a garra otimizada apresentou valores 43,8% e 56,1% menores nas etapas inicial e final, respectivamente, em relação ao modelo comercial. Esse resultado mostra que os elementos do domínio da garra se deslocam consideravelmente menos após a otimização, indicando que a nova geometria da garra possui maior resistência a se deformar, ou seja, trata-se de um produto com uma maior rigidez, garantindo que o objetivo principal da otimização foi atendido.

O esforço empregado na correta definição das configurações das simulações e da otimização foi fundamental para a obtenção dos resultados supracitados, entretanto vale destacar que a presente simulação teve seu desempenho restrito ao computador utilizado (a resolução e refinamento do domínio foi utilizado com base na capacidade máxima computacional da máquina). Apesar dos resultados terem sido bastante satisfatórios, uma melhora na capacidade de processamento poderia gerar malhas ainda mais refinadas e com mais elementos, conferindo uma precisão maior nos resultados obtidos.

Vale destacar também que as técnicas de impressão 3D viabilizam a manufatura do atual projeto, visto que a melhora da performance da estrutura implicou diretamente em uma complexidade maior em sua definição, sendo muito dificultada sua produção com os processos de fabricação tradicionais. Com o iminente crescimento das tecnologias de manufatura aditiva, os procedimentos de otimização de estrutura representam uma ótima alternativa para o melhoramento de projetos.

Dessa forma, verifica-se que a otimização topológica é um excelente método para a determinação da melhor distribuição de material em um corpo para atingir um determinado objetivo (como o aumento da rigidez) e restrições impostas (como as limitações de volume e manufatura). Essa ferramenta permite uma forma de repensar as geometrias e produtos existentes de modo a não se limitar aos projetos tradicionais. Entretanto, deve-se utilizar o método de otimização topológica em fases preliminares da elaboração do produto, visto que o layout final deve passar por refinamentos, suavizações e reduções das imperfeições decorrentes desse procedimento.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para uma otimização mais completa dos manipuladores de ROV, sugere-se, em trabalhos futuros, a realização do procedimento de otimização topológica também no braço do manipulador de modo a possibilitar uma melhora do conjunto completo a ser acoplado no robô submarino. Além disso, com os braços e as garras otimizados, propõem-se a realização de uma simulação completa do conjunto e de seus mecanismos, representando de forma precisa e próxima da realidade a atuação dos componentes e, conseqüentemente, os esforços percebidos nas estruturas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANSYS INC. **Ansys GRANTA Materials Data for Simulation**. 2020. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/materials/ansys-granta-materials-data-for-simulation>>. Acesso em: 31 outubro 2020.

[2] AUTODESK KNOWLEDGE NETWORK. **Tutorial: Shape optimization analysis**. 23 jun. 2020. Disponível em: <https://knowledge.autodesk.com/search-result/caas/CloudHelp/cloudhelp/ENU/Fusion-Simulate/files/tutorials/GUID-8A71026A-6453-4267-A415-9A42C8D4AF94-html.html>. Acesso em: 27 jun. 2020.

[3] BENDSØE, Martin Philip; SIGMUND, Ole. **Topology optimization: Theory, methods and applications**. 2. ed. Berlim: Springer, 2011. 384 p.

[4] BYKERK, L. LIU, D. WALDRON, K. **A topology optimization based design of a compliant gripper for grasping objects with irregular shapes**. 2016 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), Banff, AB, Canadá, pp. 383-388, 2016.

[5] CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA (CBIE). **Quais as diferenças entre os tipos de Produção de Petróleo?** 2020. Disponível em: <<https://cbie.com.br/artigos/quais-as-diferencas-entre-os-tipos-de-producao-de-petroleo/>>. Acesso em: 25 outubro 2020.

[6] FMC SUBSEA TECHNOLOGIES. **Schilling Robotics TITAN 4 Manipulator: Project Datasheet**. 2014. Disponível em: <<https://toolpusher.com/wp-content/uploads/2018/05/TITAN-4-Datasheet-1.pdf>>. Acesso em: 31 outubro 2020.

[7] FORT WAYNE METALS. **Ti 6Al-4V ELI**. 2020. Disponível em: <<https://fwmetals.com.br/services/resource-library/ti-6al-4v-eli/>>. Acesso em: 31 outubro 2020.

[8] KIYONO, C. **Método de Otimização Topológica aplicado ao Projeto de Sonotrodos para Transdutores Piezelétricos**. 2008, p. 161. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2008.

[9] LIMA E SILVA, Rafael A. **Projeto Mecânico de Biela Automotiva Baseado em Otimização Estrutural**. 2013. p.165. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2013.

[10] LIU, C. CHEN, T. CHIU, C. HSU, M. CHEN, Y. PAI, T. PENG, W. e CHIANG, Y. **Optimal Design of a Soft Robotic Gripper for Grasping Unknown Objects**. *Soft Robotics*, p. 452-465, ago. 2018.

[11] LIU, C. e CHIU, C. **Design and prototype of monolithic compliant grippers for adaptive grasping**. 2018 3rd International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), Nagoya, Japão, p. 51-55, 2018.

[12] OCEAN EXPLORATION AND RESEARCH. **Introduction to Remotely Operated Vehicles and Autonomous Underwater Vehicles**. Disponível em: <<https://oceanexplorer.noaa.gov/oceanos/edu/collection/media/hdwe-URintro.pdf>>. Acesso em: 22 outubro 2020.

[13] OCEANEERING. **Atlas Hybrid Manipulator**. 2016. Disponível em: <<https://www.oceaneering.com/datasheets/ROV-Atlas-Hybrid-Manipulator.pdf>>. Acesso em: 25 outubro 2020.

[14] OCEANEERING. **ROV Systems**. 2020. Disponível em: <<https://www.oceaneering.com/rov-services/rov-systems/>>. Acesso em: 25 outubro 2020.

[15] OTMZA ENGENHARIA MECÂNICA. **O que é Otimização Estrutural?** 2019. Disponível em: <<https://www.otmza.com.br/otimizacao-estrutural-aplicacoes/>>. Acesso em: 23 outubro 2020.

[16] OTMZA ENGENHARIA MECÂNICA. **Otimização de Estruturas**. 2019. Disponível em: <<https://www.otmza.com.br/otimizacao-de-estruturas/>>. Acesso em: 22 outubro 2020.

[17] SILVA, E. C. N. **Técnicas De Otimização Aplicadas no Projeto De Peças Mecânicas**. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2016.

[18] SIVČEV, S. COLEMAN, J. OMERDİC, E. DOOLY, G. e TOAL, D. **Underwater manipulators: A review**. Ocean Engineering, Irlanda, p. 163. 431-450, jun. 2018.

[19] SOUZA, J.; LIMA, L. **Webinar sobre Otimização Topológica**. Disponível em: <<https://www.esss.co/typ/alshtbaf9c112/>>. Acesso em: 01 outubro 2020.

[20] TALISCHI, C.; PAULINO, G. H.; PEREIRA, Anderson; MENEZES, I. F. M. **PolyTop: a Matlab implementation of a general topology optimization framework using unstructured polygonal finite element meshes**. International Journal for Numerical Methods in Engineering, v.45, p. 329-357, 2012.

[21] TALISCHI, C.; PAULINO, G. H.; PEREIRA, Anderson; MENEZES, I. F. M.; Carvalho, M. S. **Fluid flow topology optimization in PolyTop: stability and computational implementation**. Structural and Multidisciplinary Optimization, v.54, p. 1345-1364, 2016.

[22] TechnipFMC. **Manipulator systems**. 2018. Disponível em: <https://www.technipfmc.com/en/what-we-do/subsea/Robotics/manipulator-systems>. Acesso em: 27 jun. 2020.

[23] VETTURAZZI, R. **Otimização Topológica: Como reduzir custos com matéria-prima e superar a crise**. 2017. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/otimizacao-topologica-como-reduzir-custos-com-materia-prima-e-superar-a-crise/>>. Acesso em: 22 outubro 2020.