

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

THAIS CRISTINA GAINO

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA SUBAQUÁTICA PARA REMOÇÃO
DE ESPÉCIE INVASORA

Joinville

2023

THAIS CRISTINA GAINO

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA SUBAQUÁTICA PARA REMOÇÃO
DE ESPÉCIE INVASORA

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Naval do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Andrea Piga Carboni.

Coorientadora: Dra. Bárbara Segal Ramos.

Joinville

2023

THAIS CRISTINA GAINO

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA SUBAQUÁTICA PARA REMOÇÃO
DE ESPÉCIE INVASORA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de junho de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Andrea Piga Carboni
Orientador / Presidente

Prof.^a. Dra. Bárbara Segal Ramos
Coorientadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Marcos Alves Rabelo
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Marcelo Schuler Crivellaro
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
Através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Gaino, Thais Cristina

Desenvolvimento de uma ferramenta subaquática para remoção de espécie invasora / Thais Cristina Gaino ; orientador, Andrea Piga Carboni, coorientadora, Bárbara Segal Ramos, 2023.

100 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Graduação em Engenharia Naval, Joinville, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Naval. 2. Coral-sol. 3. Martetele elétrico. 4. Invasão biológica. 5. Controle. I. Carboni, Andrea Piga. II. Ramos, Bárbara Segal. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Naval. IV. Título.

AGRADECIMENTOS

À Karoon Energy pelo financiamento ao projeto, aos integrantes da ICMBio e toda equipe PACS Arvoredo por todo suporte e lições compartilhadas.

Ao meu pai, meu irmão e à minha mãe, Maria Célia, exemplo de força e coragem que apesar de todas as dificuldades me educou para que eu pudesse escolher qualquer caminho. Sua dedicação e amor incondicional moldaram meu caráter e me ensinaram a enfrentar os desafios da vida com perseverança.

Ao meu esposo Ary por nunca duvidar do meu potencial, estar ao meu lado diariamente, compartilhando conquistas e apoiando-me nos desafios. Seu incentivo constante é um presente que valorizo profundamente, e sou grata por tê-lo encontrado para dividir a vida. Ao Pipoca, meu companheirinho que tornou meus dias mais felizes, por vezes dormiu em meus pés nas madrugadas de estudo e hoje deixa um vazio em meu coração.

Aos meus tios, tias, primos, sobrinhos, avós e amigos que mesmo sem entenderem, aceitaram e lidaram com minha ausência durante todos estes anos e torceram para que este dia chegasse. Em especial ao meu tio Laércio e minha tia Ana que me acolheram, riram, choraram e me abraçaram longe ou perto e ao meu avô Eurides (*in memoriam*) que fez parte da minha criação e educação e contribuiu para a construção de uma pessoa curiosa, mão na massa e atenta.

Agradeço ao meu Professor orientador, Andrea Piga, pela oportunidade de aprendizado, por acreditar em meu potencial, desenvolver minhas habilidades e pela eximia liderança com confiança. À minha coorientadora Bárbara Segal pelo acolhimento e desenvolvimento, aos meus parceiros Arthur, Hélio, Bruno e Matheus por todo conhecimento compartilhado durante o tempo de LaSub (e ajuda em lixar as peças 3D) e aos meus amigos Lívia e Luiz pelo apoio, conversas e jantares, vocês tornaram esse período mais leve.

Por fim, agradeço aos professores, servidores, técnicos e equipe terceirizada da Universidade Federal de Santa Catarina em especial do Centro Tecnológico de Joinville, por todo suporte durante meu tempo de UFSC, não seria possível sem a participação, comprometimento e trabalho de vocês.

RESUMO

A adaptação de espécies marinhas exóticas invasoras no litoral brasileiro, devido à maior movimentação de transporte marítimo e volume de cargas, tem trazido desafios quanto à preservação da biodiversidade local e ao controle e manejo adequado. Uma das mais importantes espécies que causam sérios desafios é o coral-sol, as espécies *Tubastraea coccinea* e *Tubastraea tagusensis* ameaçam a diversidade e estão atualmente difundidas por sete Estados do país. O principal método de controle dessas espécies marinhas atualmente é a remoção manual, com a utilização de marreta e talhadeira realizado por mergulhadores autônomos. É um procedimento lento, muito trabalhoso e de baixa eficiência especialmente para locais em que a invasão já está avançada. Nesse contexto, buscou-se desenvolver uma ferramenta de impacto do tipo martelete elétrico específica para esse procedimento, com o objetivo de aumentar a taxa de remoção do coral-sol e, portanto, viabilizar um melhor manejo e controle desses invasores. Para essa atividade foi utilizada a metodologia ágil para o desenvolvimento rápido de produtos. As etapas consistiram na revisão bibliográfica dos métodos e ferramentas que já foram utilizados para fins semelhantes, engenharia reversa de um martelete terrestre comercial, produção de protótipos vedados para uso subaquático e por fim, teste laboratório para coleta de parecer e nova rodada de melhorias. O resultado deste trabalho é um protótipo usinado de uma ferramenta subaquática de impacto que visa a remoção de coral-sol espécie *Tubastraea coccinea* desenvolvido por meio da metodologia ágil e espera-se que o desenvolvimento da ferramenta contribua para o controle mais efetivo da espécie invasora.

Palavras-chave: Coral-sol. Martelete elétrico. Invasão biológica. Controle.

ABSTRACT

The adaptation of exotic invasive marine species along the Brazilian coast, due to increased maritime transportation and cargo volume, has posed challenges for the preservation of local biodiversity and proper control and management. One of the most significant species causing serious challenges is the sun coral (*Tubastraea coccinea* and *Tubastraea tagusensis*), which threatens diversity and is currently widespread across seven states in the country. The primary method for controlling these marine species currently involves manual removal, using hammers and chisels performed by autonomous divers. This procedure is slow, labor-intensive, and of low efficiency, especially in areas where the invasion is already advanced. In this context, the aim was to develop a specific electric impact hammer tool for this procedure, with the goal of increasing the removal rate of the sun coral and thus enabling better management and control of these invaders. Agile methodology was employed for the rapid development of the product. The stages involved a literature review of methods and tools previously used for similar purposes, reverse engineering of a commercial terrestrial impact hammer, production of sealed prototypes for underwater use, and finally, laboratory testing to gather feedback and initiate a new round of improvements. The result of this work is a machined prototype of an underwater impact tool designed for the removal of the sun coral species *Tubastraea coccinea*, developed using agile methodology. It is expected that the development of this tool will contribute to more effective control of the invasive species.

Keywords: Sun-coral. Electric hammer. Biological invasion. Control

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Colônia de coral-sol <i>Tubastraea coccinea</i>	15
Figura 2 - Distribuição histórica dos registros da <i>T. coccinea</i> (vermelho), <i>T. tagusensis</i> (laranja) e quando ambas (verde).	16
Figura 3 – Registros acumulados das espécies <i>Tubastraea</i> no Brasil.	17
Figura 4 - Ciclo iterativo na metodologia ágil.....	18
Figura 5 - Colônias de <i>Tubastraea coccinea</i> (a) e <i>Tubastraea tagusensis</i> (b).	21
Figura 6 - <i>Tubastraea coccinea</i>	22
Figura 7- Cronologia da detecção de colônias de coral-sol na Rebio Arvoredo.	22
Figura 8 - Controle de atividades e colônias eliminadas por localidade.	24
Figura 9 - Manejo e controle do coral-sol com marreta e talhadeira.	25
Figura 10 - Marreta e talhadeira.	25
Figura 11 – Costão recoberto de coral- sol na Ilha dos Búzios (SP).	26
Figura 12 - Vista interna dos componentes do martelete elétrico.....	27
Figura 13 - Martelete pneumático em operação submersa.	28
Figura 14 – Síntese dos métodos de remoção e suas principais características.	31
Figura 15 - O'ring.	32
Figura 16 - Abreviações padrão de elastômeros conforme ISO 1629:1995.	32
Figura 17 - Parâmetros para dimensionamento dos alojamentos (piston e rod).	33
Figura 18 - Instalação do tipo axial.....	34
Figura 19 - Valores de referência para a carga uniforme de O-Rings FKM e EPDM levando em consideração a seção transversal do O-Ring, tipo de material, dureza do material e sua compressão.	35
Figura 20 – Extrusão (principal modo de falha) sob alta pressão e resultado da falha no O'ring.....	36
Figura 21 – Ligas metálicas e suas divisões.	38
Figura 22 - Propriedades mecânicas dos aços baixa liga.	39
Figura 23 - Propriedades mecânicas para aços inoxidáveis.	40
Figura 24 – Custo de alguns materiais.	40
Figura 25 - Organograma dos processos de fabricação.	41
Figura 26 - Peça produzida com manufatura aditiva.	43
Figura 27 – Etapas da prototipagem rápida por manufatura aditiva.....	43
Figura 28 - Método de fabricação aditiva FDM.....	44

Figura 29 - Principais propriedades entre ABS e PLA.....	45
Figura 30 - Modelo PRODIP.....	46
Figura 31 - Matriz da Qualidade.....	47
Figura 32 - Iterações na metodologia ágil.....	49
Figura 33 - Planejamento da metodologia ágil.....	50
Figura 34 – Processo de desenvolvimento de produto (seriado <i>versus</i> integrado)...	52
Figura 35 - Subdivisões do processo de desenvolvimento de produto.....	53
Figura 36 - Metodologia de projeto de máquinas.....	55
Figura 37 - Necessidades do cliente <i>versus</i> requisitos de projeto.....	56
Figura 38 - Matriz QFD do projeto.....	57
Figura 39 - Iterações do projeto na metodologia ágil.....	59
Figura 40 – Iteração 1 na metodologia ágil.....	60
Figura 41 - Martelete comercial e componentes após desmontagem.....	61
Figura 42 – Modelagem da versão 1 do martelete elétrico.....	62
Figura 43 - Micro retífica ARV 175 Vonder.....	62
Figura 44 - Corte para vista interna da montagem do protótipo versão 1.....	63
Figura 45 - Pontos positivos e de melhoria da versão 1 a próxima iteração.....	64
Figura 46 – Iteração 2 na metodologia ágil.....	64
Figura 47 - Corte de seção da versão 2 do martelete elétrico.....	66
Figura 48 - Modelagem no Solidworks da versão 2 do martelete elétrico.....	66
Figura 49 - Alojamento dos O'rings na versão 2.....	69
Figura 50 - Elementos de fixação no protótipo versão 2.....	70
Figura 51 - Gastos por categoria para a versão 2.....	70
Figura 52 - Pontos positivos e de melhoria da versão 2 para a próxima iteração.....	71
Figura 53 - Iteração 3 na metodologia ágil.....	72
Figura 54 - Sistema de acionamento e tampa empunhadura da versão 3.....	72
Figura 55 - Cabo PP externo 2 vias usado para cabeamento.....	73
Figura 56 - Vista de corte e modelagem da versão 3 do martelete elétrico.....	74
Figura 57 – Pontos positivos e de melhorias da versão 3 para a próxima iteração...	75
Figura 58 – Iteração 4 na metodologia ágil.....	76
Figura 59 - Detalhe do botão de acionamento da versão 4.....	76
Figura 60 - Vista de corte para detalhe do sistema de acionamento e tampa da empunhadura da versão 4.....	77
Figura 61 - Vista de corte e completa da modelagem do protótipo versão 4.....	78

Figura 62 - Versão 4 usinada.	81
Figura 63 – Diâmetro irregular na câmara de impacto.	82
Figura 64 – Diâmetro irregular no fim do curso da câmara de impacto do pino impactador.....	82
Figura 65 – Soldagem realizada entre o corpo do motor e a empunhadura.	83
Figura 66 – Peças usinadas e detalhe para O’ring danificado.	84
Figura 67 - Pontos positivos e de melhorias da versão 4 para a próxima iteração. ..	85
Figura 68 – Gastos por versão com manufatura aditiva ou usinagem.	86
Figura 69 – Ferramenta usinada versão 4.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Taxa de remoção de coral-sol com talhadeira e marreta.	18
Tabela 2 - Comparação entre o Shore A e a Dureza sensitiva.	35
Tabela 3 – Valores aproximados de compressão para O’rings com seção transversal de 1,78 mm e 5 N/mm de carga uniforme aplicada.	36
Tabela 4 – Valores de alongamento para alguns materiais.	37
Tabela 5 - Aços baixa liga.	38
Tabela 6 - Aço alta liga (inoxidável).	39
Tabela 7 - Propriedades do ABS e do PLA.	45
Tabela 8 - Processo de usinagem <i>versus</i> prototipagem rápida.	45
Tabela 9 - Comparação entre metodologia ágil e metodologia tradicional.	51
Tabela 10 - Necessidades do cliente.	52
Tabela 11 - Síntese dos trabalhos encontrados.	58
Tabela 12 - Produto concorrente no mercado.	59
Tabela 13 - Parâmetros do martetele elétrico comercial.	61
Tabela 14 - Síntese das discussões sobre alguns processos de manufatura.	65
Tabela 15 - Parâmetros para dimensionamento da ranhura do O’ring.	67
Tabela 16 – Principais critérios utilizados para bom dimensionamento do alojamento do O’ring.	68
Tabela 17 - Componentes e materiais escolhidos para manufatura.	79
Tabela 18 – Resultados de deformação do pino impactador.	80
Tabela 19 - Tensões de escoamento [MPa] de alguns materiais.	81
Tabela 20 – Volume das versões de protótipos.	86
Tabela 21 - Peso no ar e peso submerso da versão 4.	87
Tabela 22 – Protótipos obtidos <i>versus</i> requisitos de projetos.	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
CAD	Desenho assistido por computador
DAFOR	Dominante, Abundante, Frequente, Ocasional e Raro
DIP	Desenvolvimento Integrado de Produtos
EEl	Espécie exótica invasora
EG	Engenho
ESC	Eletronic Speed Controller
FDM	Fused Deposition Modeling
FKM	Fluorelastômeros
GI	Ilha Galé
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IPM	Impactos por minuto
LaSub	Laboratório de tecnologia subaquática
LID	Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos
MAArE	Monitoramento Ambiental da Reserva do Arvoredo e Entorno
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PACS	Plano de Ação para Prevenção e Controle do Coral-Sol
PDP	Processo de desenvolvimento do produto
PE	Polietileno
PEEK	Poli(éter éter cetona)
PLA	Polylactic Acid
PMI	Project Management Institute
PRODIP	Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos
PS	Poliestireno
QFD	Matriz da casa da qualidade
REBio	Reserva Biológica
RJ	Rio de Janeiro
RN	Rancho Norte
SF	Saco do Farol

STL	Standard Triangle Language
SV	Saco do Vidal
T.	<i>Tubastraea</i>
UC	Unidade de conservação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Corrente
b_1	Altura do alojamento do O'ring
d_1	Diâmetro interno do anel O'ring
d_{10}	Diâmetro externo (aplicação piston)
d_2	Diâmetro da seção transversal do anel do O'ring
d_3	Diâmetro interno da ranhura (aplicação piston)
d_4	Diâmetro do pistão (aplicação piston)
d_5	Diâmetro do pistão (aplicação rod)
d_6	Diâmetro externo da ranhura (aplicação rod)
d_7	Diâmetro externo da ranhura (aplicação axial)
d_8	Diâmetro interno da ranhura (aplicação axial)
d_9	Diâmetro do pistão (aplicação piston)
dB	Decibel
E	Empuxo
g	Espaço para extrusão (<i>gap</i>)
J	Joule
Kg	Quilograma
m	metro
mm	milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
P_a	Peso aparente
P_{ar}	Peso no ar
r	Raio do alojamento
s	segundo
t	Profundidade radial total do alojamento
V	Tensão
W	Watt

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. OBJETIVOS	19
1.1.1. Objetivo Geral	19
1.1.2. Objetivos Específicos	19
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. BIOINVASÃO DO CORAL-SOL	20
2.2. FERRAMENTAS E MÉTODOS DE REMOÇÃO DO CORAL-SOL	24
2.3. VEDAÇÃO	31
2.4. MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO	37
3. METODOLOGIA	46
3.1. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE PRODUTOS	46
3.1.1. Macrofase: planejamento	46
3.1.2. Macrofase: projeção	47
3.1.3. Macrofase: implementação	48
3.2. METODOLOGIA ÁGIL E OS CICLOS DE DESENVOLVIMENTO	49
3.3. PRODIP E A METODOLOGIA ÁGIL	51
3.4. REQUISITOS DO CLIENTE	52
4. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	57
4.1. PROTÓTIPOS DESENVOLVIDOS	59
4.1.1. Protótipo versão 1 (engenharia reversa)	60
4.1.2. Protótipo versão 2 (vedação)	64
4.1.3. Protótipo versão 3 (acionamento)	71
4.1.3. Protótipo versão 4 (usinagem)	75
4.2. DISCUSSÕES	85
5. CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE A	98

1. INTRODUÇÃO

O equilíbrio ambiental garante a harmonia do ecossistema, resultando no controle da população de diversas espécies e a manutenção da biodiversidade local. A proteção das espécies nativas reflete, também, na economia do país, seja pelo uso sustentável dos recursos ou impacto nas atividades de recreação e turismo (BRASIL, 2018).

Foi constatada a presença na década de 1980, no litoral brasileiro, de duas espécies exóticas de coral-sol, *Tubastraea* (T.) *coccinea* (Figura 1) e *T. tagusensis*, onde as condições ambientais e falta de predadores têm contribuído para o estabelecimento e proliferação (BOURROUL, 2016).

Figura 1 - Colônia de coral-sol *Tubastraea coccinea*.



Fonte: Lindner et al. (p. 244, 2017).

Os primeiros indícios da espécie no Brasil são datados da década de 1980, quando a presença de coral-sol foi registrada nas plataformas de petróleo da Bacia de Campos, Rio de Janeiro (RJ). Acredita-se que os principais vetores de dissipação desta espécie, originária dos oceanos Pacífico e Índico, foram os cascos dos navios principalmente plataformas de petróleo (BRASIL, 2018).

Com abrangência em mais de três mil quilômetros da costa brasileira, a espécie se espalhou por mais de 20 municípios de sete estados (Figura 2) (OIGMAN-PSZCZOL et al., 2017). Em Santa Catarina, na Reserva Biológica (REBIO) Marinha do Arvoredo, foi identificado em 2012, precocemente, a presença apenas da espécie *Tubastraea coccinea* (BRASIL, 2012).

Figura 2 - Distribuição histórica dos registros da *T. coccinea* (vermelho), *T. tagusensis* (laranja) e quando ambas (verde).



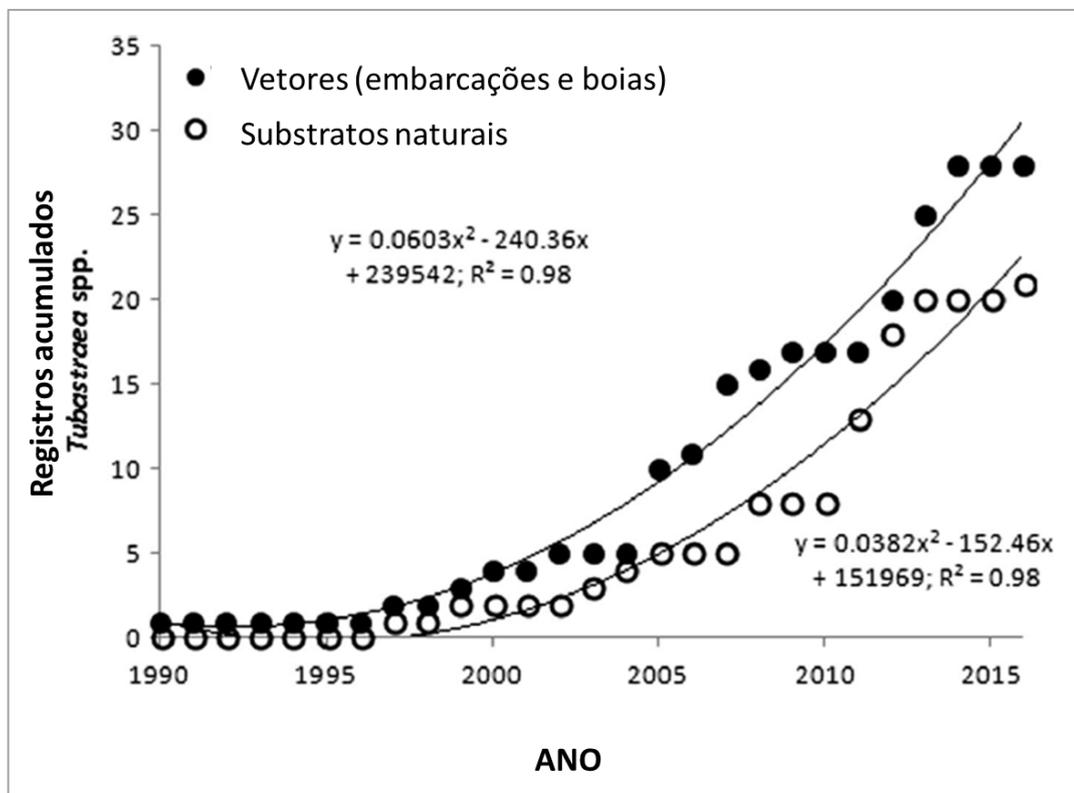
Fonte: Creed et al., 2017.

Realizada por mergulhadores autônomos, a principal forma de controle utilizada dá-se pela retirada manual das colônias com o auxílio de uma talhadeira e marreta, e quando em grandes paredões, em algumas localidades há o uso do martelete pneumático. O principal desafio é a luta contra o tempo, para que haja o

controle da proliferação e, se possível erradicação, uma vez que o processo de remoção é moroso e exige uma quantidade razoável de mergulhadores e expedições para remoção da coral-sol (CASTRO, 2021).

As espécies *Tubastraea* podem ser encontradas em substratos naturais ou artificiais (Figura 3). Define-se como substratos artificiais aqueles ambientes estranhos à espécie como plataformas de petróleo, monoboias ou demais estruturas, enquanto os substratos naturais compreendem nas estruturas naturais de fixação como as rochas (MANGELLI; CREED, 2012).

Figura 3 – Registros acumulados das espécies *Tubastraea* no Brasil.



Fonte: Traduzido de Creed et al. (2017).

É importante notar que o coral-sol é considerado uma espécie invasora, pois sua rápida reprodução e expansão podem competir com as espécies de corais nativos e prejudicar os ecossistemas marinhos. Portanto, medidas de controle e remoção são frequentemente tomadas para minimizar seus impactos.

Atualmente, o manejo manual apresenta limitações no controle da invasão, devido à baixa taxa de remoção de 23,14 kg por expedição por mergulhador (Tabela 1). No intuito de aumentar a taxa de remoção das colônias, propõe-se o

desenvolvimento de uma ferramenta do tipo martetele elétrico, que substitua a operação pelo manejo manual e o uso do martetele pneumático, funcionando de forma independente a cabos umbilicais ligados ao mergulhador e à embarcação de apoio.

Tabela 1 - Taxa de remoção de coral-sol com talhadeira e marreta.

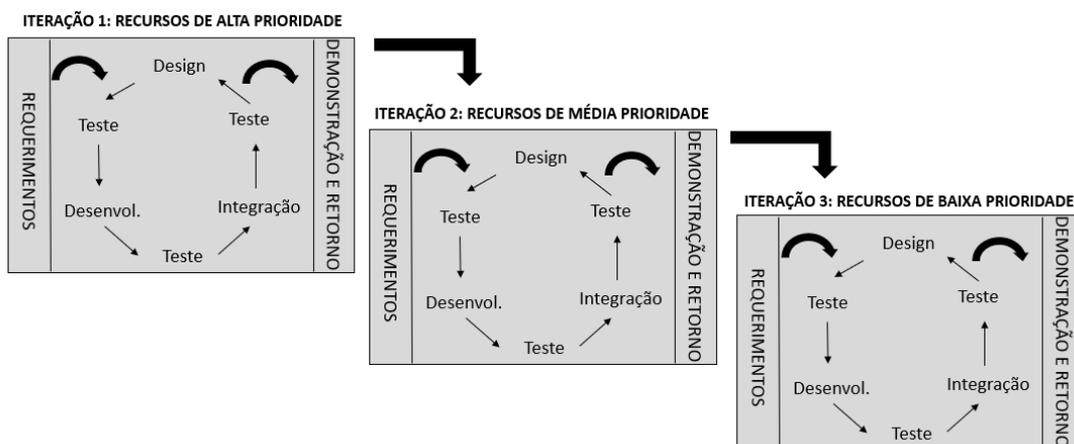
[Total em kg de coral sol removido]	972
[Expedições]	3
[Quantidade de mergulhadores]	14
Coral sol removido por mergulhador por expedição [kg]	23,14

Fonte: Tamoios News (2022).

Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica das ferramentas que poderiam ser utilizadas nesse cenário, engenharia reversa de uma ferramenta comercial terrestre e posterior projeto de um martetele elétrico marinizado para teste em campo e, então, possíveis melhorias para desenvolvimento de novo protótipo conforme parecer de operação dos mergulhadores.

A metodologia utilizada foi a Metodologia Ágil, que pela sua estrutura flexível, rápida, efetiva e iterativa é capaz de guiar a criação de um novo produto com o auxílio de iterações (Figura 4), cuja possibilidade de validação e melhoria pode ser realizada por rodadas até a entrega de um produto final que esteja alinhado às expectativas e requisitos definidos para cumprimento do projeto (SATPATHY, 2017).

Figura 4 - Ciclo iterativo na metodologia ágil.



Fonte: Traduzido de Layton, Ostermiller e Kynaston (2020).

Como resultado, foi desenvolvida uma ferramenta de impacto subaquática elétrica, que satisfaz os requisitos indicados pelo cliente, tornando o processo de manejo mais seguro e eficiente.

Este trabalho integra o PACS Arvoredo (Plano de Ação para Prevenção e Controle do Coral-Sol na REBIO Arvoredo e Entorno) é uma condicionante da Licença de Operação 1587/2020 emitida pelo IBAMA em 07/08/2020 referente ao Sistema de Desenvolvimento da Produção de Petróleo do Campo de Baúna, localizado na Bacia de Santos, sob concessão da Karoon Energy e tem como principal objetivo gerar conhecimento científico sobre a espécie *Tubastraea coccinea* (coral-sol) e desenvolver ferramentas e técnicas para a prevenção e o controle dessa espécie na REBIO Arvoredo e entorno.

1.1. OBJETIVOS

Com o intuito de substituir o método manual de remoção, que consiste em martete e talhadeira e obter maior taxa de remoção no manejo do coral-sol, propõe-se os seguintes objetivos.

1.1.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma ferramenta subaquática de impacto com alimentação de bateria, para remoção/desincrustação do invasor coral-sol *Tubastraea coccinea*.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Realizar busca bibliográfica, projeto conceitual e preliminar;
- Montar protótipo funcional completo;
- Testar mecânica da ferramenta;
- Implementar ciclos de melhorias e correções de pontos identificados;
- Investigar informações de entrada para nova iteração de protótipo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O coral-sol avança em diversos pontos do litoral brasileiro e a falta de predadores aliada à ausência de equipamentos eficazes para controle incentiva a permanência e a difusão das espécies invasoras. Em função disso, este capítulo descreve os fundamentos teóricos que foram utilizados para o desenvolvimento de uma ferramenta do tipo martetele elétrico, capítulo no qual foram descritas as características do coral-sol *T. coccinea*, principais formas de remoção e manejo da espécie invasora, princípios de funcionamento do martetele elétrico terrestre e os parâmetros considerados para o desenvolvimento do martetele elétrico marinizado.

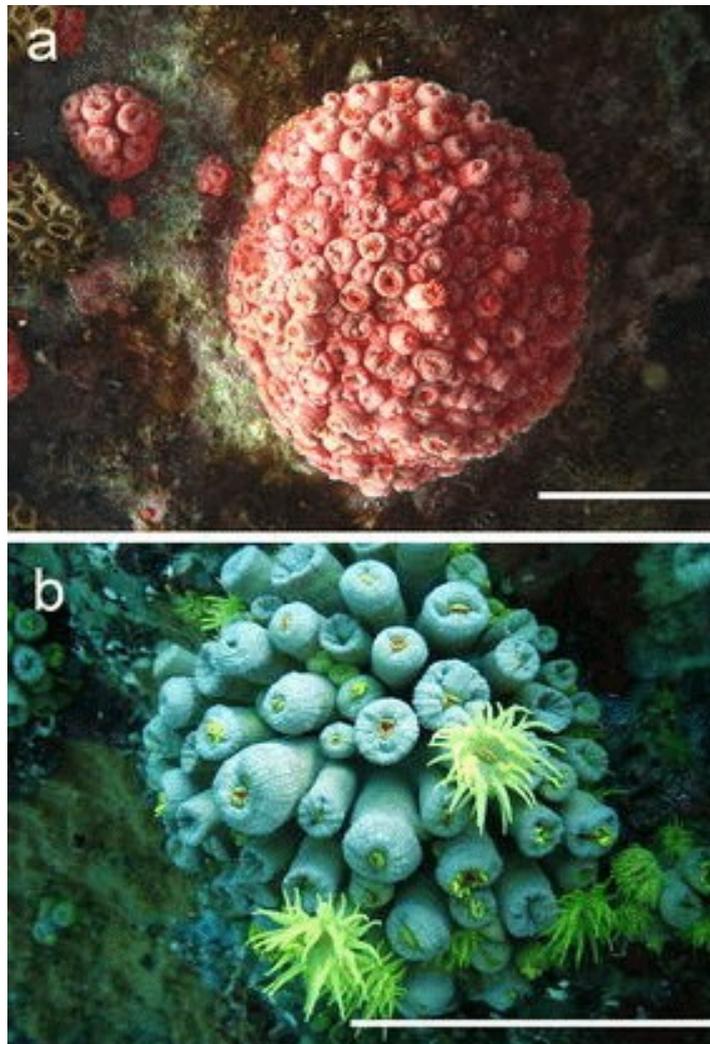
2.1. BIOINVASÃO DO CORAL-SOL

As espécies exóticas podem causar grandes impactos na biodiversidade local, pois muitas são capazes de incrementar a própria população devido à alta taxa de reprodução, falta de predadores e capacidade de se dispersar por longas distâncias, causando assim além do impacto social, cultural também a alteração do meio abiótico (BRASIL, 2018). São definidas como espécies exóticas invasoras (EEI's) quando há incidência fora do ambiente de distribuição natural ameaçando a biodiversidade local (BRASIL, 2022).

No Brasil, das 58 espécies marinhas exóticas, nove são consideradas como invasoras (LINDNER et al., 2017), nas quais duas – coral-sol (*Tubastraea spp.*) e o mexilhão-dourado (*Limnoperna fortunei*) e uma espécie não marinha o javali (*Sus scrofa*) - foram adicionadas aos Planos Nacionais de Prevenção, Controle e Monitoramento definido pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), cuja meta estabelecida é a mitigação do impacto na biodiversidade brasileira por meio do controle destas três espécies (BRASIL, 2018).

Originárias do Indo-Pacífico, as espécies do gênero *Tubastraea* comumente recebem o nome de coral-sol e no Brasil há registro de duas dessas espécies (Figura 5), a *T. tagusensis* (coloração amarela) e a *T. coccinea* (coloração alaranjada). Esses animais estão se dispersando pela costa do Brasil e já podem ser encontradas em ambientes naturais e artificiais fixadas em plataformas de petróleo, cascos de embarcações e boias (JUNIOR et al., 2022).

Figura 5 - Colônias de *Tubastraea coccinea* (a) e *Tubastraea tagusensis* (b).



Fonte: Creed et al. (2017).

A introdução das colônias de *Tubastraea* foi detectada em plataformas de petróleo offshore nos anos 80 na Bacia de Campos no Rio de Janeiro, sendo os navios, plataformas e estruturas de exploração e prospecção de petróleo apontadas como principais vetores na disseminação pela costa Brasileira. (CASTRO; PIRES, 2001; CREED et al., 2017). O levantamento contratado pelo MMA, apresentou ocorrências do *Tubastraea* em sete estados - Rio de Janeiro, Bahia, Espírito Santo, Santa Catarina, Ceará, São Paulo e Sergipe – sendo que não se dão na mesma magnitude e estágio (BRASIL, 2020).

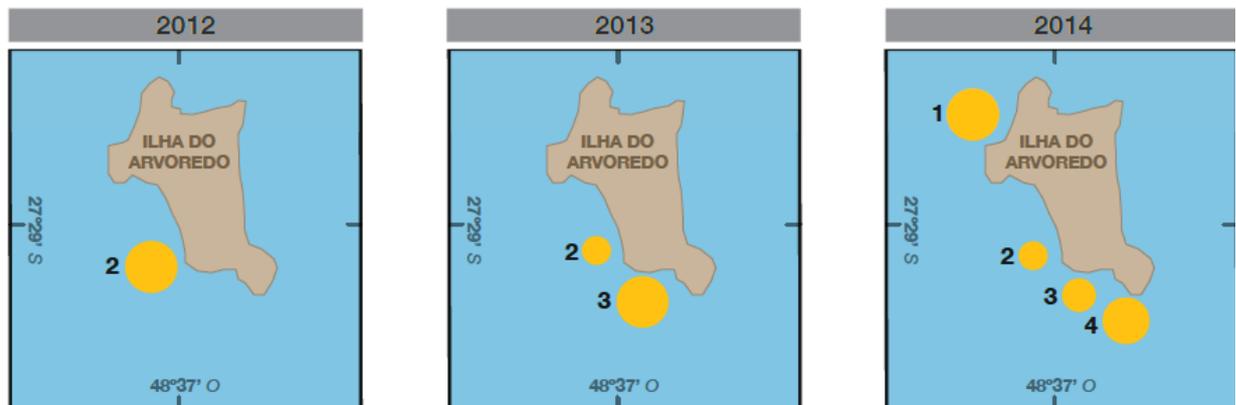
Figura 6 - *Tubastraea coccinea*.

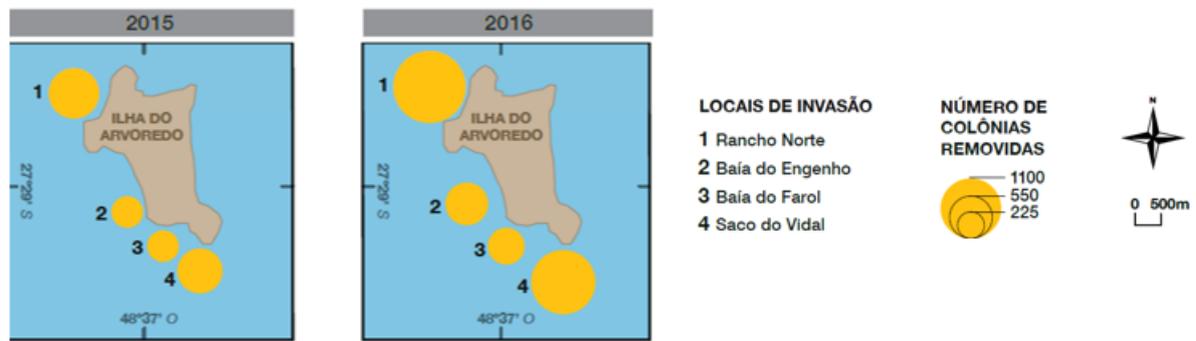


Fonte: Oigman-Pszczol et al. (2017).

No estado de Santa Catarina, há o registro apenas de *Tubastraea coccinea* (Figura 6) cuja presença foi observada pela primeira vez em 2012 durante um mergulho recreativo na Ilha do Arvoredo. Com o avançar dos anos, outras colônias foram sendo avistadas na região em diferentes pontos, inclusive na REBIO Arvoredo, localizada entre Florianópolis e Bombinhas, que abriga as Ilhas do Arvoredo, Galé, Deserta, Calhau de São Pedro (LINDNER et al., 2017), conforme Figura 7.

Figura 7- Cronologia da detecção de colônias de coral-sol na Rebio Arvoredo.





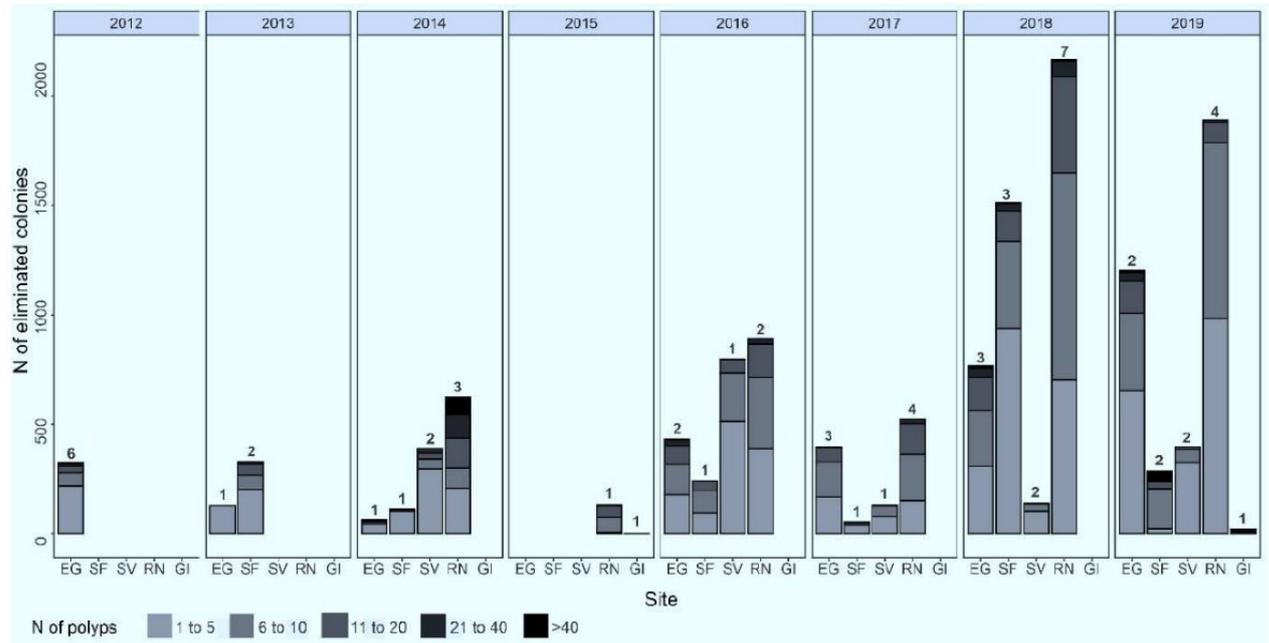
Fonte: Lindner et al. (p. 244, 2017).

A REBIO é uma unidade de conservação federal (UC), administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), criada em 1990 por meio do decreto federal nº 99.142, o objetivo é a proteção em função da diversidade e importância ecológica (LINDNER et al., 2017). Assim que avistada em janeiro de 2012 e identificada, iniciou-se o protocolo de monitoramento DAFOR, que é uma escala (Dominante, Abundante, Frequente, Ocasional e Raro), onde para cada espécie há 5 mergulhos paralelos ao costão, com duração de 1 minuto cada em apneia para que fosse possível estimar quantitativamente a infestação do *T. coccinea* (BRASIL, 2012; GOMES; BARROS; POMPEI, 2015).

A identificação precoce na REBIO Arvoredo, o contínuo monitoramento realizado pelo MAArE desde 2014 e o manejo sistemático com apoio de voluntários, pesquisadores da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ICMBio possibilitou a efetividade da gestão com base na disponibilidade de informações subsidiando as ações de manejo para minimizar os impactos (LINDNER et al., 2017).

Mesmo com as opções de controle e manejo limitadas, esforços utilizando o manejo manual tem sido realizado com o intuito de retardar e controlar a propagação da *T. coccinea* (CRIVELLARO et al., 2021) (Figura 8). O desenvolvimento de uma ferramenta que possa colaborar com este esforço é discutido e desenvolvido neste trabalho.

Figura 8 - Controle de atividades e colônias eliminadas por localidade.



Fonte: Crivellaro et al. (2021).

2.2. FERRAMENTAS E MÉTODOS DE REMOÇÃO DO CORAL-SOL

O principal método de manejo documentado no Brasil para a remoção do coral-sol têm sido o manejo manual com uso de marreta e talhadeira (Figura 9), aliado a sacolas que recolhem as colônias após extração para que sedimentos não fiquem livres e possam causar maior dispersão da espécie, atingindo o efeito contrário do pretendido (ABEL; CAPEL, 2019).

Conhecidas por apresentar maturidade reprodutiva precoce, a *Tubastraea* produz grande número de larvas ao longo de seu ciclo de vida ao mesmo tempo que há poucos predadores e competidores naturais. Estima-se que durante 15 anos uma única colônia produziu 216.827 larvas (*T. coccinea*) e 73.353 larvas (*T. tagusensis*), sendo estes valores proporcionais ao tamanho da colônia e da área submersa com incidência de colônias, variando de forma crescente com o tempo (OIGMAN-PSZCZOL et al., 2017).

A combinação destes fatores culminou na potencialização da capacidade de invasão e proliferação da espécie na costa Brasileira, tornando fundamental o controle das populações de *Tubastraea* (OIGMAN-PSZCZOL et al., 2017).

Figura 9 - Manejo e controle do coral-sol com marreta e talhadeira.



Fonte: Nadaletto (p. 1, 2020).

A talhadeira consiste em uma ferramenta de corte com corpo geralmente circular, uma das extremidades é afiada e possui tratamento de têmpera e a outra extremidade receberá o golpe da marreta (Figura 10), que quando associados realizará a extração, rompimento ou corte do material requerido (MASSARI, 2020).

Figura 10 - Marreta e talhadeira.



Fonte: Ferramentas Kennedy (2023).

Ainda que seja o principal método, há locais onde a invasão já abrange uma área tão elevada (Figura 11) que se buscou outra alternativa para realização do manejo visando obter maior taxa de remoção, o martetele pneumático, que está sendo utilizado com sucesso (TAMOIOS, 2022). De forma análoga à combinação da marreta e talhadeira, o martetele pneumático possui o mesmo objetivo (remoção por impacto), porém a alimentação se dá por ar comprimido, aumentando a taxa de remoção devido a velocidade alcançada com o sistema da ferramenta (RODRIGUES, 2022).

Figura 11 – Costão recoberto de coral- sol na Ilha dos Búzios (SP).



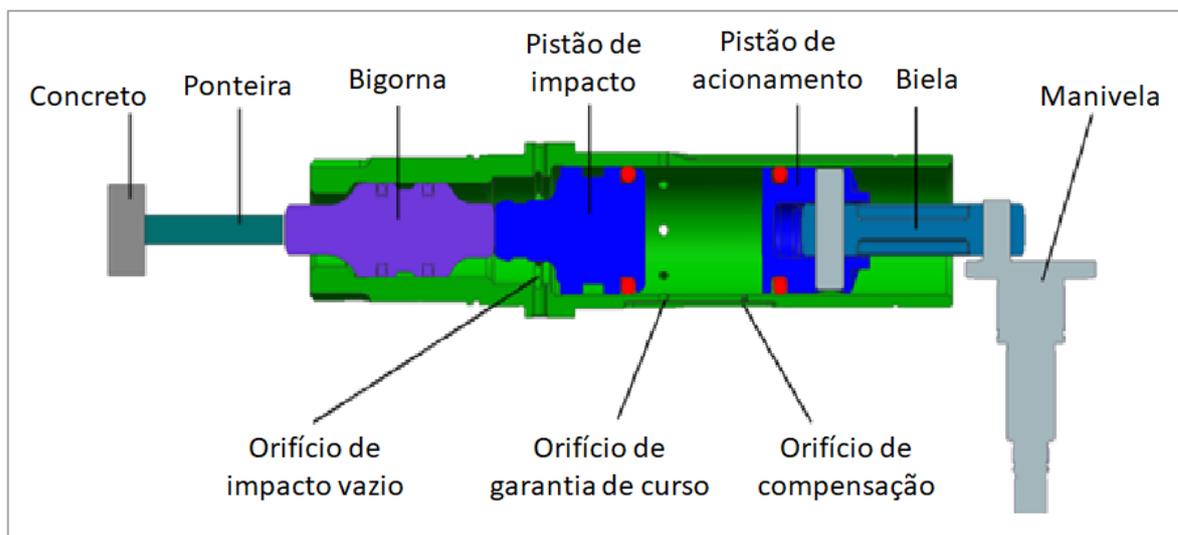
Fonte: Lídice (2021).

Com mecânica semelhante ao pneumático por ambas usarem pistões oscilantes e aplicarem força na superfície usando cinzel, o martetele elétrico usa eletricidade (seja conectado à energia elétrica ou com bateria) para realizar a atividade desejada de remoção por impacto (TAMESON, 2023 e MILLER, 2021), enquanto o martetele pneumático consiste na entrada do ar comprimido pela ferramenta por meio de uma mangueira ligada a uma fonte de ar em pressão para o cilindro onde está o pistão.

No martelete elétrico convencional, o sistema de engrenagens conecta o motor do martelete à biela e a manivela, que fará o pistão de acionamento ser acionado realizando um movimento alternativo senoidal gerando um estado cíclico alternado de compressão-expansão do volume de gás na câmara (YAN; HUANG; ZOU, 2016).

O pistão de impacto será acionado contra a bigorna devido à diferença de pressão dentro da câmara e por sua vez, a bigorna transferirá sua energia cinética para a ponteira (talhadeira) na forma de onda de choque mecânica (Figura 12), ondas estas que causarão a perfuração do objeto de interesse (YAN et al., 2016).

Figura 12 - Vista interna dos componentes do martelete elétrico.



Fonte: Traduzido de Yan et al. (p. 2, 2016).

Três tipos de orifícios são projetados para garantir a operação contínua de impacto e a saída precisa de energia de impacto na câmara de gás. O orifício de compensação de gás tem a função de fornecer ar externo da atmosfera para compensar o gás que pode vazar do anel de vedação de borracha, orifício de garantia de curso elimina a resistência adicional à pressão do gás no pistão possibilitando o movimento de retorno do pistão de impacto, por fim, o orifício de impacto vazio (Figura 12), quando na condição de não carga muda o mecanismo de impacto para o modo de bloqueio sem saída de energia de impacto (YAN et al., 2016).

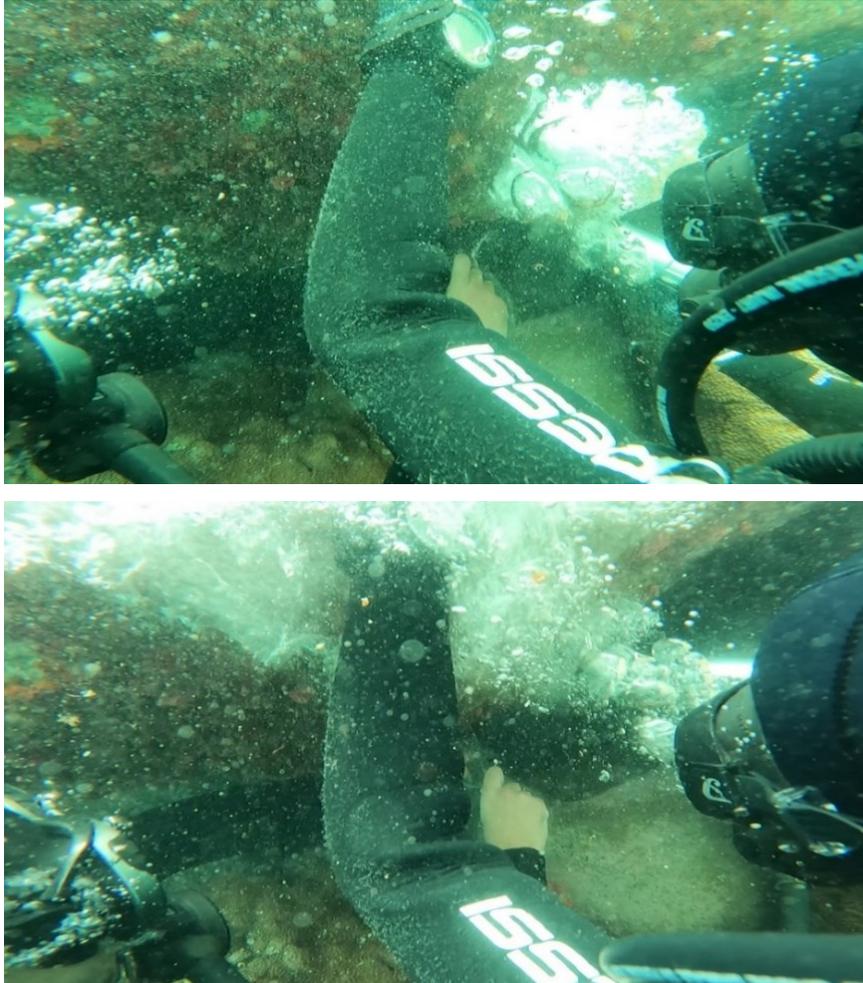
Alguns parâmetros são importantes para realizar a escolha de um martelete que se adeque ao objetivo pretendido, sendo eles, massa, tamanho, golpes por

minuto, pressão de operação, consumo de ar ou energia e os acessórios que serão utilizados (WEEKS, 2022). Isto porque se deseja que a energia de cada golpe seja suficiente para a remoção completa da colônia do coral-sol, tendo a menor quantidade de fragmentos possíveis, bem como seja um equipamento leve e ergonômico para a operação do mergulhador.

O uso do martelete pneumático associado à um compressor de vazão adequada em uma embarcação de apoio, ligado a mangueiras que acompanham o mergulhador implicam em dificuldades de operação e movimentação do operador no manejo do coral-sol. Os principais desafios na operação submersa estão associados à limitação da área manejada devido a restrição de movimentação do operador, baixa visibilidade na remoção devido à expulsão de bolhas de ar (Figura 13), ruído excessivo, perda de fio da talhadeira, ergonomia da ferramenta para operações longas e além disso a corrosão do equipamento, pois a formação de finas camadas de óxido provoca quase de forma imediata a paralisação do ferramenta devido às baixas dimensões de interferência para projeto dos componentes internos.

Figura 13 - Martelete pneumático em operação submersa.





Fonte: Crivellaro (2023).

Dos parâmetros para desenvolvimento do martelete, as seguintes definições são importantes para compreensão do projeto:

- **Energia de impacto:** energia cinética, que é assumida transferida integralmente à talhadeira como energia de impacto do pistão de impacto (Figura 12) para a bigorna (DIDIER, 2013).

Equação 1 - Equação energia de impacto [J].

$$\text{Energia de impacto [J]} = \frac{1}{2} m_{\text{pistão de impacto}} v_{\text{pistão de impacto}_{n-1}}^2 (1 - e^2)$$

Fonte: Didier (2013).

Sendo m a massa [Kg] e v a velocidade [m/s] do pistão de impacto.

- **Impactos por minuto (IPM):** quantidade de vezes que a bigorna atinge o cinzel (golpes) por minuto (DIDIER, 2013).
- **Potência:** é a taxa na qual a força realiza trabalho sobre um objeto, representada usualmente pelo trabalho realizado no intervalo de tempo (HALLIDAY, 2012).

A potência elétrica em um circuito é obtida pelo produto de tensão (energia requerida para mover uma carga de um ponto para outro em um campo elétrico) e corrente (fluxo de carga elétrica em um circuito), conforme Equação 2.

Equação 2 – Definição de potência em um circuito.

$$P [W] = v * i = \text{tensão [V]} * \text{corrente [A]}$$

Fonte: Nilsson; Riedel (2009).

A síntese das particularidades e vantagens de cada método de remoção abordado está descrita na Figura 14.

Figura 14 – Síntese dos métodos de remoção e suas principais características.



Fonte: a autora (2023).

2.3. VEDAÇÃO

A vedação em sistemas subaquáticos é essencial para garantir a eficiência do sistema e evitar vazamentos ou a entrada de algum fluido. Os materiais mais comuns utilizados são a base de elastômeros, que apresentam boa resistência ao calor e ao contato com fluidos hidráulicos e contaminantes, parâmetros nos quais são decisivos para a escolha do material de utilização no projeto (FLITNEY, 2014).

Entre os diferentes tipos de vedação, destaca-se o O'ring, que é caracterizado pelo formato de anel e possui uma seção circular. É definido pelo diâmetro interno (d_1) e pelo diâmetro da seção transversal (d_2) e é amplamente utilizado em aplicações estáticas e dinâmicas devido à sua vedação eficiente e à ampla gama de materiais disponíveis para fabricação. Além disso, o O'ring (Figura 15) é uma opção econômica para os projetistas, uma vez que é produzido a um custo relativamente baixo e é capaz

de vedar praticamente todos os tipos de meios líquidos e gasosos (TRELLEBORG, 2022).

Figura 15 - O'ring.



Fonte: GLOBAL SEALS (2023).

Flitney (2014) destaca que, além da escolha do material adequado (Figura 16), é importante considerar o tipo de aplicação, a geometria e a tolerância dimensional das peças que compõem o sistema hidráulico. O dimensionamento do alojamento deve ser cuidadosamente planejado para acomodar a vedação de forma adequada, sem que sofra deformações ou seja submetida a tensões excessivas.

Figura 16 - Abreviações padrão de elastômeros conforme ISO 1629:1995.

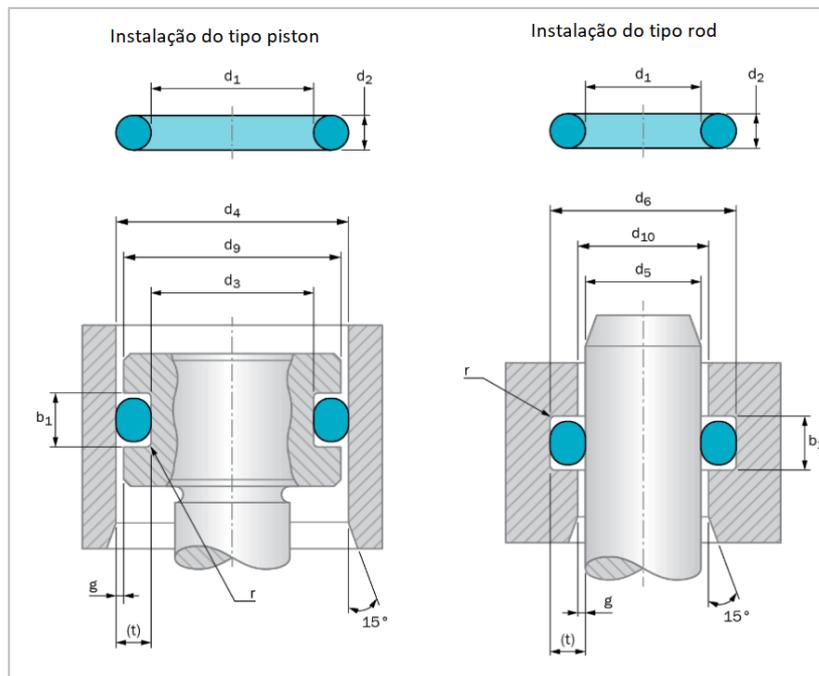
ISO	Borrachas
EPDM	Terpolímero de etileno, propileno e um dieno em cadeia lateral
FPM (FKM, FFKM, TFE/P)	Borrachas que contêm flúor, alquil flúor ou flúor alcoxi na cadeia principal
NBR	Copolímero de acrilonitrilo butadieno
NR	Homopolímero de isoprene (borracha natural)
SBR	Copolímero de estireno e butadieno
EPM	Copolímero de etileno e propileno

Fonte: CAETANO (2010 – 2022).

As vedações com a utilização de O'rings podem mais comumente ser divididas entre estáticas e dinâmicas, as vedações estáticas são caracterizadas quando não há movimento relativo entre as superfícies enquanto as vedações dinâmicas possuem movimento relativo entre si (PARKER SEALS, 1997).

De acordo com o catálogo da Trelleborg (2022), fornecedora de soluções em vedações, o dimensionamento do alojamento (Figura 17) consiste em radial (piston e rod) e axial. Na instalação radial (estáticas e dinâmicas), o O'ring pode ser instalado na ranhura do pistão, portanto o d_1 do O'ring deve ser menor ou igual ao diâmetro interno da ranhura (d_3) enquanto na instalação tipo rod o anel será pressionado contra a parede do pistão então o diâmetro externo do O'ring ($d_1 + 2 * d_2$) deve maior ou igual ao diâmetro externo da ranhura (d_6).

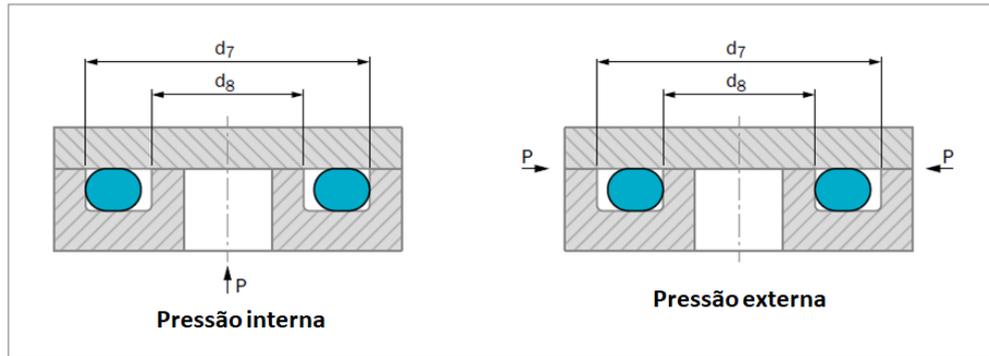
Figura 17 - Parâmetros para dimensionamento dos alojamentos (piston e rod).



Fonte: Trelleborg Calculator (2023).

Para a instalação radial (aplicações estáticas), onde a seção transversal do anel de vedação será comprimida na parte superior e inferior, um fator que deve ser levado em consideração é a direção da pressão, se a pressão for interna o diâmetro externo do O'ring deve ser maior ou igual ao diâmetro externo da ranhura axial (d_7), entretanto caso a pressão seja externa o d_1 terá que ser menor que o diâmetro interno da ranhura axial (d_8) (TRELLEBORG, 2022) (Figura 18).

Figura 18 - Instalação do tipo axial.



Fonte: Trelleborg (2022).

Ainda em relação às aplicações, a Trelleborg (2022) ressalta que os O-rings são usados em sua maioria para vedação estática, sendo a radial utilizada em tubos, pistões, cilindros e hastes enquanto a axial é utilizada em flanges, tampas e placas. As aplicações dinâmicas são recomendadas apenas em condições moderadas de serviço, limitados principalmente pela velocidade e pressão contra a vedação, sendo assim indicados em situações nas quais há vedação de êmbolos e pistões de baixa carga ou eixos e pistões em baixas velocidades, geralmente até 0,5 m/s (TRELLEBORG, 2022).

Associado à escolha do material para fabricação do anel de vedação, está a dureza Shore A. O durômetro Shore A consiste em um apalpador que realiza a leitura da dureza em uma escala de 0 – 100 (PARKER SEALS, 1997), segundo Callister a dureza é uma propriedade mecânica do material que está associado à sua resistência à deformação plástica, refletindo na capacidade deste em manter sua forma original quando submetido à carga ou pressão, assim quanto mais macio o material menor será o valor na escala de dureza (CALLISTER, 2016).

A propriedade de dureza é uma das mais amplamente utilizadas na Indústria da Borracha e, por ser uma propriedade altamente tangível tem uma relação significativa com a verdadeira dureza da borracha (Shore A), assim Caetano (2010 – 2022) apresenta uma relação sensível entre esses dois parâmetros.

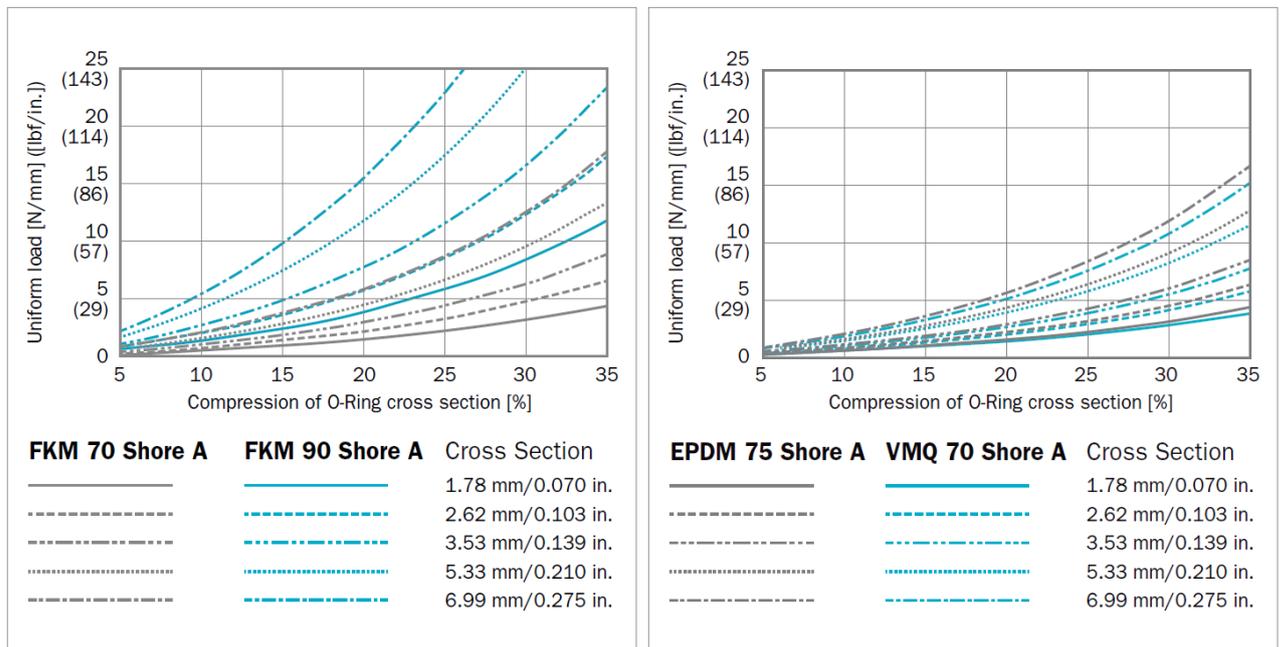
Tabela 2 - Comparação entre o Shore A e a Dureza sensitiva.

Dureza (sensitiva)	Dureza Shore A
Muito Macia	Inferior a 40
Macia	40-60
Média	60-75
Dura	75-90
Muito Dura	90-100

Fonte: CAETANO (2010 – 2022).

Em relação ao O'ring, fatores como o material, a dureza, o diâmetro interno, a seção transversal e extensão da força de compressão influenciam o percentual de compressão da seção transversal (Figura 19) (Trelleborg, 2022).

Figura 19 - Valores de referência para a carga uniforme de O-Rings FKM e EPDM levando em consideração a seção transversal do O-Ring, tipo de material, dureza do material e sua compressão.



Fonte: Trelleborg (2022).

Para fins de comparação, para a mesma seção transversal de 1,78 mm e uma carga uniforme de 5 N/mm os valores de compressão variam conforme material do O'ring e sua dureza Shore A, assim O'rings com maior dureza Shore A tendem a apresentar resistência a compressão maior (Tabela 3), sendo necessário mais força para serem comprimidos e realizarem a vedação de forma efetiva.

Tabela 3 – Valores aproximados de compressão para O’rings com seção transversal de 1,78 mm e 5 N/mm de carga uniforme aplicada.

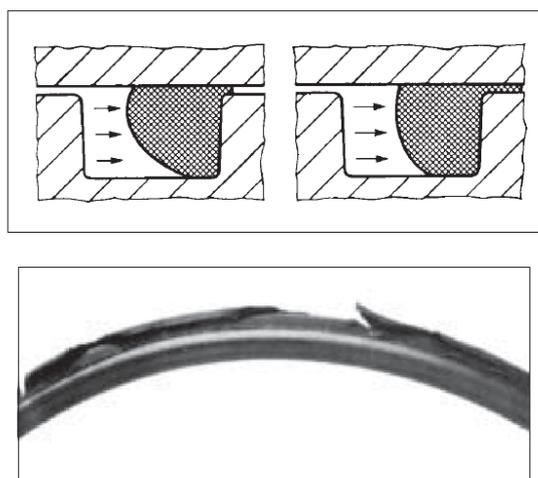
	% compressão da seção transversal
FKM 70 Shore A	35
FKM 90 Shore A	23
EPDM 75 Shore A	35
VMW 70 Shore A	34

Fonte: adaptado de Trelleborg (2022).

A escolha de um O’ring além de ser baseada na combinação dos parâmetros descritos acima (deformação axial ou radial, meio, variações de pressão, temperatura, dureza e material) também englobam o custo, a disponibilidade de fornecedores, dimensões e tolerâncias, espaço reduzido para instalação e simplicidade de sua forma geométrica e fabricação (PARKER, 1997).

Em relação aos principais tipos de falhas que um O’ring pode apresentar estão a extrusão que ocorre quando há entrada de material na folga projetada (Figura 20), O’ring retorcido e montagem inadequada, as causas e como evitar estão apresentadas no APÊNDICE A.

Figura 20 – Extrusão (principal modo de falha) sob alta pressão e resultado da falha no O’ring.



Fonte: Parker (1997).

2.4. MATERIAIS E PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

O protótipo é a representação física de um componente ou produto completo, que visa a validação de um conceito e discussão antes da produção comercial em larga escala, garantindo que sejam funcionais mesmo que possam ter algumas limitações (AZLIN et al., 2022).

No que se refere aos processos de usinagem, uma boa usinabilidade da peça é influenciada por diversas propriedades do material e significa obter aspectos como corte com energia mínima, baixo desgaste da ferramenta e bom acabamento superficial (SCHEY, 1987).

Quando um material pode ser submetido a grandes deformações antes de falhar, diz-se que é um material dúctil. A ductibilidade pode ser medida pelo percentual de alongamento (Tabela 4) ou redução da área no momento em que há a ruptura do material (HIBBELER, 2015). Assim, materiais com valor de alongamento maior que 5% são considerados dúcteis (NORTON, 2013) e indicam que possui boa usinabilidade enquanto os valores abaixo de 5% de alongamento indicam que o material é frágil e possui baixa ductibilidade (GUPTA; GUPTA; MITTAL, 2009).

Tabela 4 – Valores de alongamento para alguns materiais.

Material	Elongação do corpo de ensaio em 50mm [%]
Liga de alumínio 7075 (tratada termicamente)	11
Aço 1020 (laminado a frio)	25
Aço inox 304 (chapa recozida)	50
ABS	5 - 25

Fonte: Adaptado de Norton p. 987 - 993 (2013).

As propriedades de resistência ao cisalhamento e dureza (resistência ao desgaste) do material, quando apresentam valores baixos, minimizam a energia no corte. Por outro lado, o desgaste acelerado das ferramentas pode ocorrer quando compostos muito duros (como alguns óxidos) são adicionados à peça. Outra característica relevante é a temperatura de fusão do material a ser usinado, pois ao trabalhar com temperaturas de fusão baixas, acarretará que a ferramenta opere em temperatura inferior para que não haja o amolecimento da ferramenta ou elas reajam entre si (SCHEY, 1987).

A seleção de materiais consiste na escolha de um material com base na combinação de suas características e também na facilidade com que pode ser conformado. As ligas metálicas são geralmente divididas (Figura 21) em ligas ferrosas (quando o ferro é o principal elemento) e ligas não ferrosas (quando não contem o ferro como base) (CALLISTER, 2016).

Figura 21 – Ligas metálicas e suas divisões.



Fonte: Adaptado de Callister p. 422 (2016).

Classificados de acordo com a concentração de carbono em baixo, médio e alto teor (Tabela 5), os aços são ligas compostas principalmente por ferro e carbono podendo também possuir quantidades significativas de outros componentes (CALLISTER, 2016).

Tabela 5 - Aços baixa liga.

	% de carbono em peso	Pontos fortes	Pontos fracos	Aplicações	Tratamentos
Baixo teor de carbono	< 0,25	Ductilidade; Tenacidade; Usinável; Soldável; Produção barata.	Baixa dureza; Baixa resistência.	Aço estrutural; Partes de chassis automotivos;	Recozimento; Normalização; Têmpera; Revenimento
Médio teor de carbono	0,25 – 0,60	Quando tratadas termicamente, são mais resistentes que aço baixo carbono; Resistente à abrasão; Tenacidade.	Ductilidade.	Rodas de trem e trilhos; Engrenagens e virabrequins.	Têmpera; Revenimento.
Alto teor de carbono	0,60 – 1,4	Duros; Resistência ao desgaste.	Ductilidade.	Aços ferramenta; Lâminas.	Têmpera; Revenimento.

Fonte: Adaptado de Callister p. 422 (2016).

Conhecidas por sua versatilidade, as ligas ferrosas podem ser obtidas com uma gama de propriedade mecânicas (Figura 22) e físicas, porém muitas ligas são propensas à corrosão (CALLISTER, 2016).

Figura 22 - Propriedades mecânicas dos aços baixa liga.

Teor de carbono	AISI	Tratamento	Lim. de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [%al em 50mm]
Baixo	1020	Laminado a quente			
Médio	1040	Temperado e revenido			
Alto	1080	Temperado e revenido			

Fonte: Adaptado de Callister (2016).

A umidade, que contém oxigênio dissolvido, é o principal fator corrosivo. No entanto, há outras substâncias, como compostos de enxofre e cloreto de sódio, que também podem contribuir para a corrosão. Essa influência é particularmente relevante em ambientes marinhos, conhecidos por serem altamente corrosivos devido à presença de cerca de 3,5% de cloreto de sódio. Materiais como aço, alumínio, alguns aços inoxidáveis (Tabela 6) cobre e latão são indicados para uso em água doce, ao passo que materiais como titânio, latão, alguns bronzes e ligas níquel-cromo-molibdênio para uso em água do mar (CALLISTER, 2016).

Tabela 6 - Aço alta liga (inoxidável).

	%p Cromo	PONTOS FORTES	PONTOS FRACOS	APLICAÇÕES	TRATAMENTOS
ALTA LIGA	>11	Resistência à corrosão; Uso em ambientes em temperatura elevada e condições severas.	Custo e disponibilidade.	Turbinas a gás; Caldeiras de vapor.	Recozimento; Têmpera; Revenimento.

Fonte: Adaptado de Callister (2016).

Os aços inoxidáveis são classificados conforme sua microestrutura, sendo em martensíticos, austeníticos, ferríticos, duplex e aços endurecidos por precipitação. A descoberta do aço inoxidável propiciou a indústria uma nova classe de materiais mais adequada às necessidades do ramo químico e em ambientes à altas temperaturas (LOUREIRO, 2010).

Compostos principalmente de ferro, cromo e carbono (sistema ferro-cromo-carbono) ou ferro, cromo e níquel (sistema ferro-cromo-níquel), os aços inoxidáveis também podem conter adições de outros elementos de liga, como molibdênio, manganês, silício, cobre, titânio, nióbio, vanádio e nitrogênio (LOUREIRO, 2010). Essas adições de elementos de liga podem modificar suas microestruturas e propriedades, conferindo características específicas a eles (Figura 23).

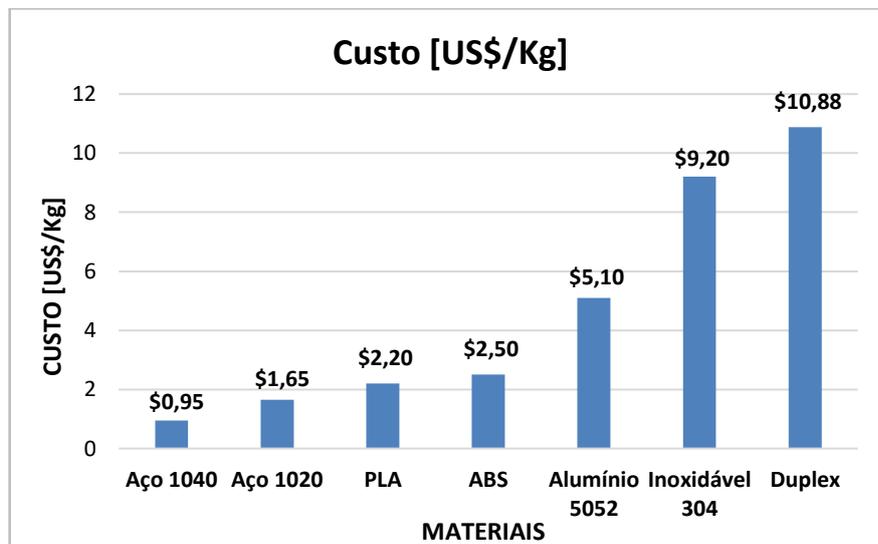
Figura 23 - Propriedades mecânicas para aços inoxidáveis.

Classe	AISI	Tratamento	Lim. de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade [%al em 50mm]
Ferrítico	446	Recozido	515	275	20
Austenítico	304	Recozido	515	205	40
Martensítico	410	Recozido	485	275	20
Martensítico	410	Temperado e revenido	825	620	12
Duplex (austenita e ferrita)	2304	Recozido	600	400	25

Fonte: Adaptado de Callister p. 379 (2016) e Kahar (2017).

O custo do produto sofre interferência de três principais fatores, o projeto do componente, os materiais utilizados e as técnicas de fabricação, sendo estes inter-relacionados. No que se refere ao material (Figura 24), a escolha deve levar em consideração as combinações adequadas para obtenção das propriedades desejadas enquanto há a preocupação em trazer economia ao projeto (CALLISTER, 2016).

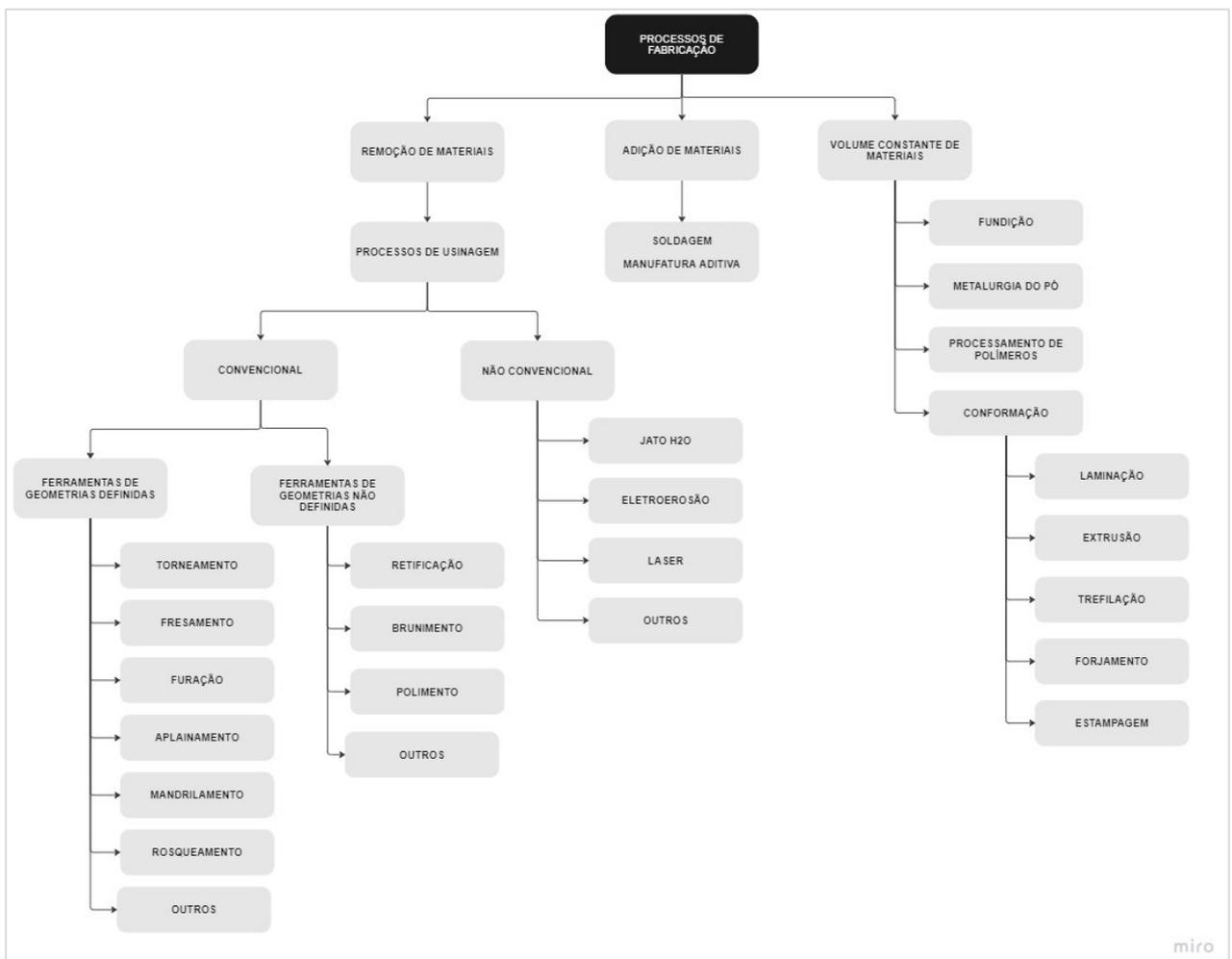
Figura 24 – Custo de alguns materiais.



Fonte: Adaptado de Callister p. 840 (2016) e Fastwell (2023).

As operações que envolvem materiais metálicos podem ser divididas em duas grandes áreas segundo Ferraresi (1970), em usinagem e conformação. Quando há a produção de cavaco ao conferir forma, dimensão ou acabamento à uma peça, esta operação será descrita como operação de usinagem enquanto as operações de conformação são obtidas pelo meio da deformação plástica do metal. De acordo com Ferraresi (1970) e Machado (2009), as principais operações de usinagem estão dispostas na Figura 25.

Figura 25 - Organograma dos processos de fabricação.

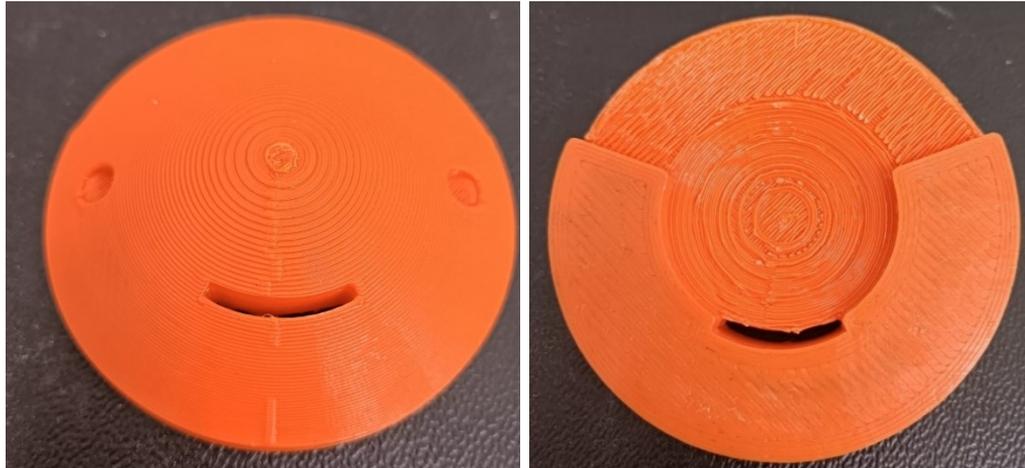


Fonte: adaptado de Machado (2009).

Das principais operações, as seguintes foram contempladas neste trabalho:

1. Torneamento: a peça gira em torno do eixo de rotação da máquina enquanto a ferramenta de corte realiza os movimentos de avanço longitudinal e ou transversal (SEROPE, 2010).
2. Fresamento: enquanto a ferramenta, em geral com múltiplos dentes, gira, a peça fica presa à mesa e essa avança em movimento linear, o que garante elevadas taxas de remoção de material e maior versatilidade (SCHEY, 1987).
3. Furação: a ferramenta gira e realiza o movimento de avanço, com o objetivo de realizar um furo cuja geometria geralmente é cilíndrica (SEROPE, 2010).
4. Eletroerosão: consiste na remoção de material a partir de descargas de faíscas. Diferente dos outros tipos de usinagem, a taxa de remoção de material é controlada a partir de parâmetros como corrente, tensão e frequência da descarga, e não a partir da dureza, resistência, energia mecânica e tenacidade do material (SEROPE, 2010).
5. Manufatura aditiva: é classificada como um dos três grupos da prototipagem rápida, juntamente com a remoção de material e o processo virtual. Na adição de material, as peças são construídas em camadas (fatia por fatia) e a principal diferença entre os processos de manufatura aditiva consiste em como as fatias individuais serão produzidas (Figura 26). A espessura geralmente varia de 0,1 mm a 0,5 mm e alguns métodos podem fornecer espessuras maiores (SEROPE, 2010).

Figura 26 - Peça produzida com manufatura aditiva.



Fonte: a autora (2023).

Para a modelagem das peças é necessário um programa CAD, que após a peça modelada será possível gerar um arquivo em formato STL, com a descrição das coordenadas por meio de elementos de malha triangular. O processamento do arquivo em STL levará alguns minutos e considerará a orientação da peça a ser impressa, suporte para impressão, fatiamento da peça e caminho para a ferramenta da impressora percorrer (GENG, 2004). A máquina de prototipagem rápida receberá o filamento do material, os parâmetros e comandos definidos na fase anterior (arquivo de construção) e gerará o objeto 3D por meio da impressão em camadas conforme fluxo na Figura 27 (GENG, 2004).

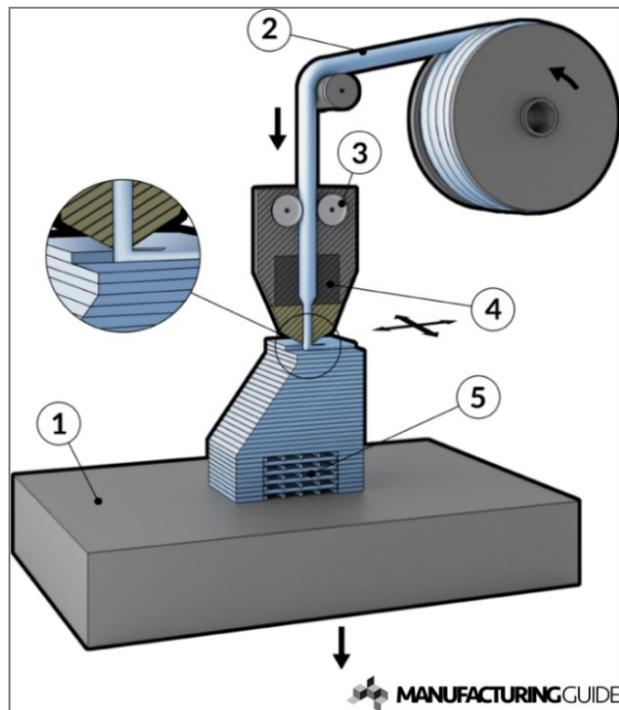
Figura 27 – Etapas da prototipagem rápida por manufatura aditiva.



Fonte: Traduzido e adaptado de Azlin et al. (2022).

Um dos métodos mais comuns de manufatura aditiva é com a deposição de material fundido camada por camada (*Fused Deposition Modeling – FDM*), devido a sua simplicidade de implementação e baixo preço (SELVAMANI, 2021). O processo (Figura 28) é composto por uma base móvel (1), onde o filamento plástico (2) é empurrado por rolos (3) até um bocal aquecido (4) e quando necessário é impresso também uma estrutura de suporte (5) para permitir saliências (Manufacturing Guide Stockholm, 2023).

Figura 28 - Método de fabricação aditiva FDM.



Fonte: Manufacturing Guide Stockholm (2023).

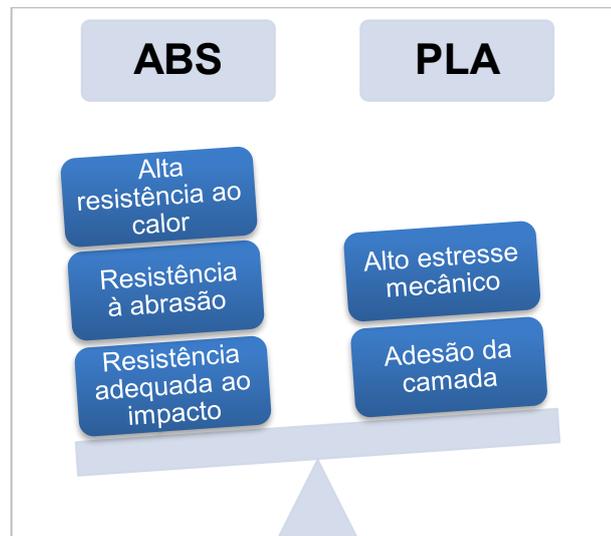
Termoplásticos como polímero poli(éter éter cetona) (PEEK), náilon, poliestireno (PS), polietileno (PE) são alguns dos materiais utilizados no processo de manufatura aditiva, sendo os mais comuns o ácido polilático (PLA) e o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS) (BHAGIA et al., 2021). Os filamentos em termoplásticos são utilizados pois recuperam suas propriedades originais (Tabela 7 e Figura 29) quando resfriados mesmo após derretidos e amolecidos (KHAN, 2022).

Tabela 7 - Propriedades do ABS e do PLA.

PROPRIEDADES	ABS	PLA
Resistência a tração	27 MPa	37 MPa
Alongamento	3,5 – 50%	6%
Densidade	1,0 – 1,4 g/cm ³	1,3 g/cm ³
Ponto de fusão	amorfo	173 °C
Temperatura de transição vítrea	105 °C	60 °C

Fonte: Traduzido de Roy e Mukhopadhyay (2021).

Figura 29 - Principais propriedades entre ABS e PLA.



Fonte: Traduzido e adaptado de Khan (2022).

A Tabela 8 apresenta de forma sucinta as principais vantagens e desvantagens no que se refere à escolha do processo para obtenção do produto, usinagem ou prototipagem rápida.

Tabela 8 - Processo de usinagem *versus* prototipagem rápida.

PROCESSO	VANTAGEM	DESVANTAGEM
Usinagem	Melhores propriedades mecânicas; Alta precisão; Alta integridade superficial.	Custo; Tempo de fabricação; Vários dispositivos e ferramentas; Formas complexas difíceis de obter.
Prototipagem rápida	Configuração flexível; Produção rápida; Custo; Peças leves.	Limitação de materiais; Restrição de tamanho da peça; Pós processamento para ajustar dimensões e remover suporte; Imprecisões de projeto; Propriedades mecânicas.

Fonte: Traduzido e adaptado de Azlin et al. (2022) e Jiménez et al. (2021).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO INTEGRADO DE PRODUTOS

O Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (PRODIP) consiste em uma metodologia na qual uma equipe multidisciplinar considera, de forma simultânea, as restrições e necessidades do produto. O modelo foi proposto pelo Núcleo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (NeDIP), que com base em suas experiências e pesquisas, visa além da formação de estudantes e atualização dos profissionais, a implementação em empresas para que auxilie na inovação de desenvolvimento de novos produtos (BACK, 2008).

Planejamento, projeção e implementação, são as três macrofases que definem o modelo PRODIP, bem como suas consequentes fases conforme figura 30.

Figura 30 - Modelo PRODIP.



Fonte: NeDIP UFSC (2023).

3.1.1. Macrofase: planejamento

De acordo com o NeDIP UFSC (2023), o planejamento do produto consiste na fase em que serão exploradas as oportunidades, há a geração, seleção e caracterização das ideias, de acordo com as estratégias estabelecidas pela organização e serem desenvolvidas em um tempo pré acordado e estabelecido. O

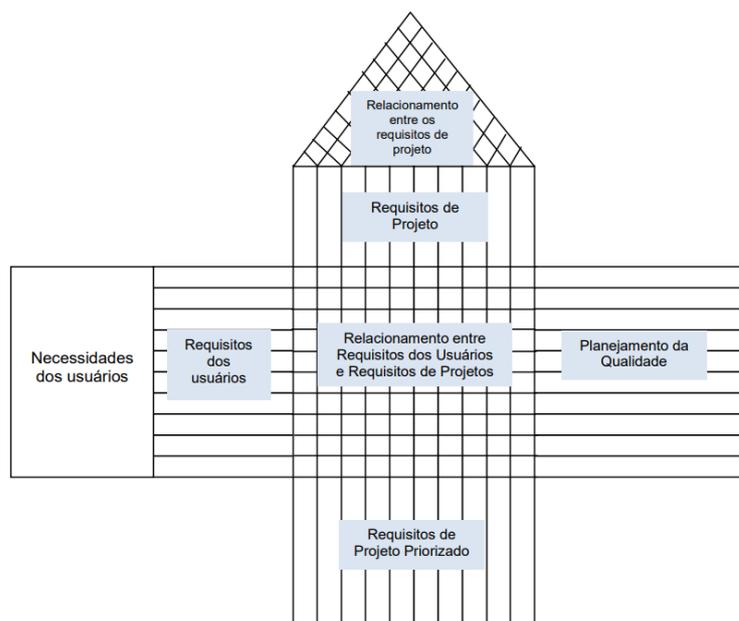
mapeamento tecnológico é dos métodos mais empregados, onde as informações de tecnologia, produto e mercado são correlacionadas e servirão de plano de fundo para a criação do plano de produtos.

O planejamento do projeto é baseado no guia do *Project Management Institute* (PMI) para a gestão de projetos e obtém como resultado final o plano do projeto, que será o documento que orientará a execução, monitoramento e controle do projeto. Este por sua vez, consiste na definição e alinhamento de várias variáveis, sendo elas a definição e verificação do escopo, recursos, tempo e sequenciamento das atividades, estimativa de custos, planejamento de riscos, qualidade e aquisições (NeDIP UFSC, 2023).

3.1.2. Macrofase: projeção

A macrofase de projeção consiste na separação das fases em projeto informacional, conceitual, preliminar e detalhado. O projeto informacional resultará na obtenção das especificações do projeto, que surge a partir das necessidades e requisitos do cliente, como principal metodologia é utilizada a matriz da casa da qualidade (QFD) conforme Figura 31, que determina quais requisitos devem ser priorizados no desenvolvimento do projeto (NeDIP UFSC, 2023).

Figura 31 - Matriz da Qualidade.



Fonte: SOUZA (2016). Adaptado de Back, et al. (2008).

Caracterizado pela fase criativa, o projeto conceitual gera alternativas e as avalia técnica e economicamente, para então selecionar as mais promissoras para a resolução do problema. Os métodos utilizados para a fase criativa abrangem brainstorming, matriz morfológica e síntese de funções, enquanto as alternativas são comparadas com base em matrizes multicritério, como a Matriz de Pugh, para auxiliar na tomada de decisão (NeDIP UFSC, 2023).

A fase de projeto preliminar resultará no layout final do produto e sua viabilidade técnica e econômica (NeDIP UFSC, 2023), por meio do reconhecimento das especificações do projeto, componentes que serão utilizados, aspectos de patentes e normas que se apliquem inclusive no que tange à segurança, determinar principais dimensões, material, fabricação, tolerâncias e testes dos componentes (Back et al., 2008).

O projeto detalhado, que consiste na última fase da macrofase de projeção, terá como objetivo a documentação do produto, onde os testes devem ser concluídos e as soluções revisadas em detalhes (NeDIP UFSC, 2023). Ainda nesta fase é submetida a solicitação de investimento e abrange também a elaboração do manual de instruções, de assistência técnica e catálogo das peças, projeto do produto e o plano de manufatura (BACK et al., 2008).

3.1.3. Macrofase: implementação

A fase de preparação da produção objetiva a liberação do produto por meio da produção do lote piloto, onde ocorre a solicitação de preparação das máquinas, produção de ferramental, compra de materiais e ferramentas, e demais dispositivos para preparar a linha de produção e então testar os procedimentos necessários para montagem, análise de não-conformidades e finalmente a liberação para a produção do lote inicial (NeDIP UFSC, 2023).

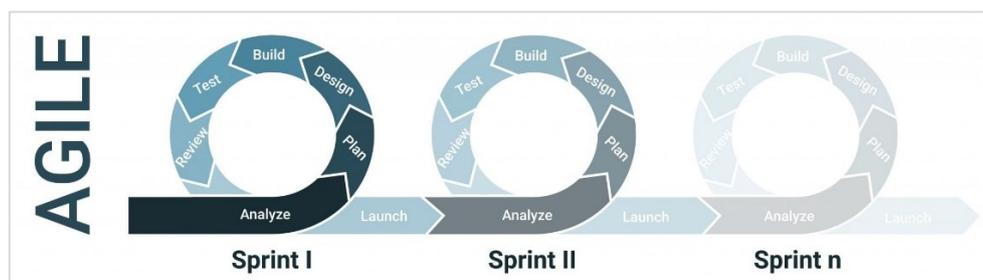
A comercialização, lançamento do produto no mercado e implementação do lote inicial fazem jus à etapa de lançamento. A última fase que corresponde à macrofase de implementação, aborda a validação do produto, onde junto aos usuários é realizada uma avaliação do produto no mercado, além de verificar desempenho, realizar auditorias, fechar contratos e realizar a prestação de contas. Finalizando esta etapa, a equipe é desfeita e o projeto encerrado (NeDIP UFSC, 2023).

3.2. METODOLOGIA ÁGIL E OS CICLOS DE DESENVOLVIMENTO.

Formalizada por 17 engenheiros de software em 2001, a partir da necessidade de uma rápida e flexível resposta frente às mudanças, a metodologia ágil (Figura 32) é um método de desenvolvimento de programas e possui sua conduta baseada em “doze princípios do software ágil” (WILLIAMS, 2010):

1. Prioridade é a satisfação do cliente por meio da entrega prévia e continua;
2. Alterações dos requisitos durante o processo de desenvolvimento são bem vindas pois visam vantagem competitiva;
3. Entregas frequentes do produto funcional;
4. Cliente e desenvolvedor devem trabalhar diariamente em parceria;
5. Indivíduos motivados, confiança, ambiente e suporte são essenciais;
6. Conversas face a face é o método mais eficiente de comunicação para transmitir informações;
7. O progresso é primariamente avaliado tendo o sistema/programa funcionando;
8. Envolvidos devem manter ritmo constante;
9. Atenção continua em relação ao bom projeto e excelência técnica;
10. Ênfase na obtenção de algo simples o suficiente para lidar com as mudanças e que atenda aos requisitos do cliente;
11. Equipes auto-organizáveis são capazes de emergir melhores projetos e requisitos;
12. O ajuste, refino e análise em como tornar-se mais eficiente deve ocorrer em intervalos regulares.

Figura 32 - Iterações na metodologia ágil.



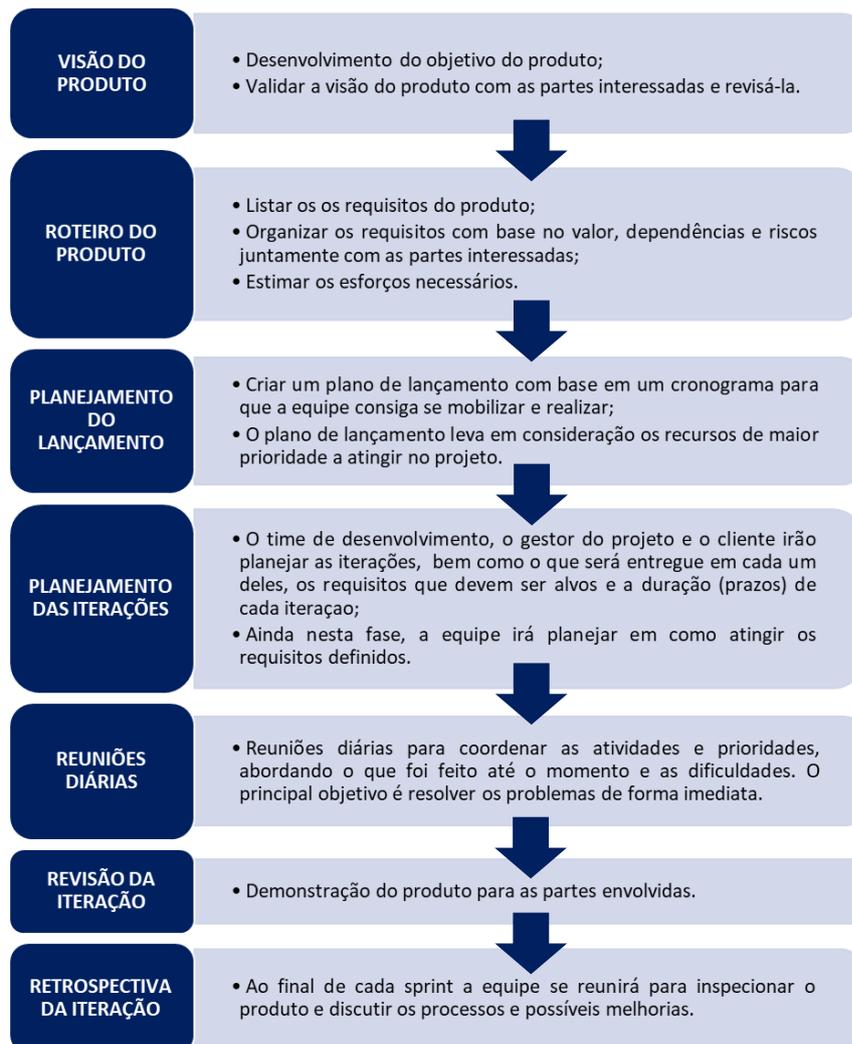
Fonte: Goddard (2021).

Todos os métodos ágeis devem seguir os doze princípios acima e os quatro valores conhecidos como o manifesto ágil que priorizam as pessoas, a comunicação, o produto e a flexibilidade (WILLIANS, 2010):

Indivíduos e interações em vez de processos e ferramentas.
Software de trabalho em vez de documentação abrangente.
Colaboração com o cliente em vez de negociação de contratos.
Resposta a mudanças em vez de seguir um plano. (WILLIANS, 2010).

O planejamento da metodologia (Figura 33) ágil segue os estágios de visão do produto, roteiro do produto, planejamento do lançamento, planejamento das iterações, reuniões diárias, revisão das iterações e retrospectivas das iterações (Figura 33) (LAYTON et al., 2020).

Figura 33 - Planejamento da metodologia ágil.



Fonte: adaptado de Layton et al. (2020).

As equipes ágeis são auto-organizadas, autogerenciáveis e possuem liderança servidora, responsável por treinar, ser colaborativo, prevenir distrações e remover obstáculos (LAYTON et al., 2020).

3.3. PRODIP E A METODOLOGIA ÁGIL

A seleção da metodologia do projeto leva em consideração fatores como o tamanho do projeto, número de pessoas envolvidas, nível de inovação e criatividade requerida (COHEN; LINDVALL; COSTA, 2004). Ainda que a metodologia ágil seja mais eficiente que a tradicional, em razão da transparência e entregas de valor durante as iterações fazendo com que o cliente possa acompanhar as entregas durante todo o projeto (COHN, 2006), não se pode afirmar que esta seria uma metodologia vencedora, mas sim que ambas vivem em simbiose (COHEN et al., 2004).

Tabela 9 - Comparação entre metodologia ágil e metodologia tradicional.

	METODOLOGIA AGIL	METODOLOGIA TRADICIONAL
Reuniões	Rápidas e apenas com pessoas necessárias	Várias reuniões, mesmo que não sejam necessárias.
Estilo do processo	Iterativa	Linear
Tamanho da equipe	3 – 9 pessoas geralmente	Sem limite de tamanho
Requisitos	Atualizações regulares	Fixo no plano de projeto
Organização	Auto-organizada	Administrada
Estilo de organização	Descentralizada	Centralizada
Líder	Colaborativo e servidor	Controlador
Ênfase em	Pessoas	Processos
Envolvimento do cliente	Alto durante todo projeto	Depende do ciclo do projeto
Documentação	Mínima	Abrangente
Equipe	Foco nas habilidades dos membros, trabalham de forma multifuncional	Os membros possuem papéis distintos
Problemas no projeto	Fácil de identificar e corrigir, devido às iterações durante o projeto.	Díficeis de encontrar e resolver no final do projeto.

Fonte: Satpathy (2017) e Layton et al. (2020).

Nesse trabalho, uma metodologia combinada foi utilizada.

3.4. REQUISITOS DO CLIENTE

Cliente ou usuário final pode ser definido como o principal beneficiário do projeto (GOODPASTURE, 2016), na metodologia ágil sua participação juntamente com a equipe de desenvolvimento é ativa, ajuda a priorizar os requisitos e ao final de cada iteração analisa o que foi entregue, colabora com sugestões de melhorias e pontos a serem melhorados (SATPATHY, 2017).

O ICMBio, representado pela analista ambiental Adriana Carvalhal, que atua como ponto focal da instituição no acompanhamento do projeto, pode ser considerada o cliente final deste trabalho. Ao longo do projeto, foram promovidas reuniões e conduzidos testes em campo para validar os conceitos, resultando na identificação das seguintes necessidades do cliente (Tabela 10).

Tabela 10 - Necessidades do cliente.

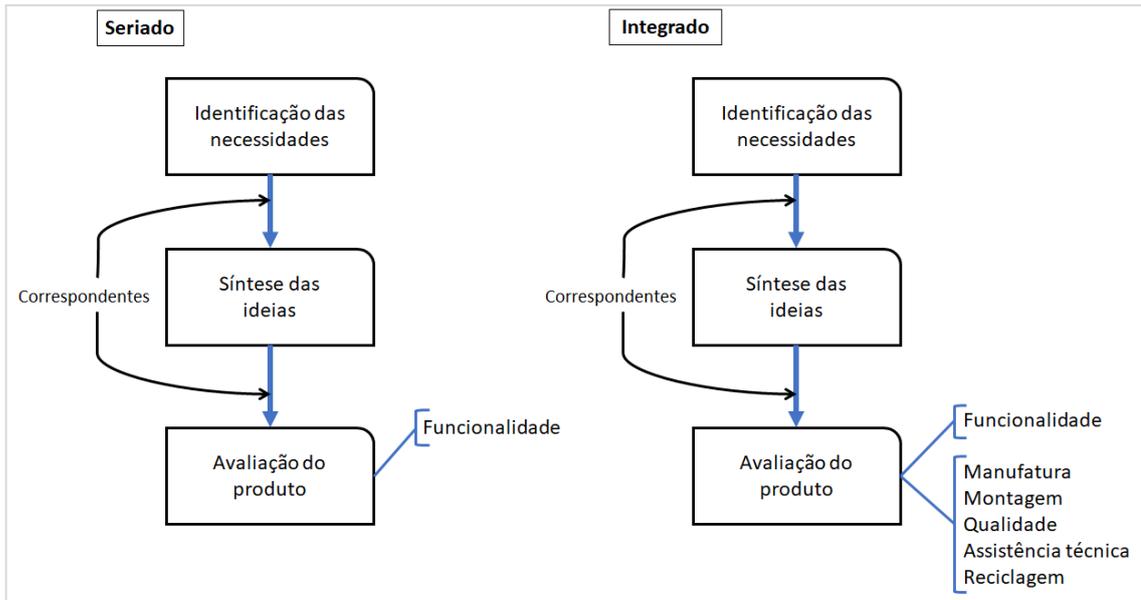
NECESSIDADE	JUSTIFICATIVA
Remoção por impacto	Minimizar a fragmentação das estruturas do coral-sol
Ser de fácil manuseio	Dispensar o sistema de aspiração por sucção até a superfície
Ser compacto e ergonômico	Privilegiar o acionamento autônomo sem umbilical até a superfície.
Autonomia	Ferramenta possuir autonomia de um mergulho

Fonte: a autora (2023).

O processo de desenvolvimento do produto (PDP), consiste em transformar as informações e necessidades do cliente em especificações e requisitos de projeto, que resultará em um produto a ser produzido (Figura 34).

O modelo PDP (Figura 35) engloba as etapas de identificação das necessidades do cliente, síntese das ideias e avaliação do produto, levando em consideração se as necessidades do cliente estabelecidas anteriormente foram satisfatoriamente atendidas (PÊSSOA; TRABASSO, 2017).

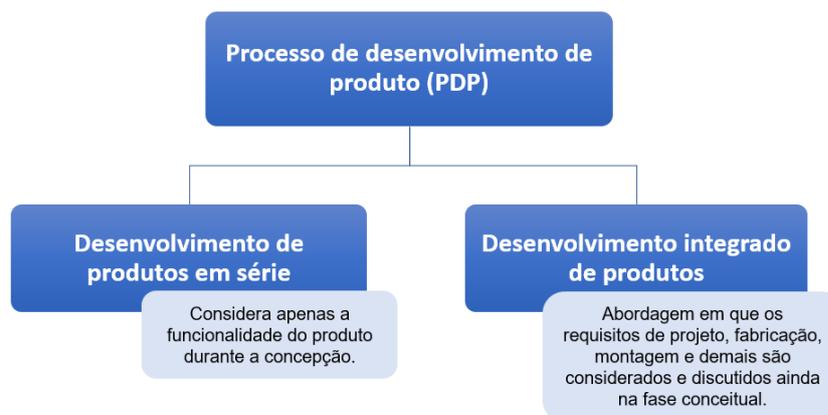
Figura 34 – Processo de desenvolvimento de produto (seriado *versus* integrado).



Fonte: Traduzido e adaptado de Pêsoa e Trabasso (2017).

Com o objetivo de aumentar o conhecimento sobre o produto na fase inicial do processo de desenvolvimento do produto, o desenvolvimento integrado de produtos (DIP) (Figura 35) leva em consideração os requisitos como projeto, fabricação, montagem, manutenção e descarte. Como resultado desse processo, o desenvolvimento integrado de produtos resulta em um produto que não só é funcional, mas também projetado de forma a ser facilmente fabricado, montado, testado, mantido e reciclado de maneira econômica (PÊSSOA; TRABASSO, 2017).

Figura 35 - Subdivisões do processo de desenvolvimento de produto.



Fonte: adaptado de Pêsoa e Trabasso (2017).

O conceito de projeto de engenharia é definido por Norton (2013) como a utilização de várias técnicas e princípios científicos que visa o desenvolvimento de um dispositivo, método ou sistema proporcionando as condições necessárias para sua materialização. Embora seja necessário projetar uma peça por vez para obter o projeto de uma máquina completa (equipamento composto por unidades interconectadas), é essencial reconhecer que a função e o desempenho de cada peça dependem de outras peças inter-relacionadas dentro da mesma máquina (NORTON, 2013).

Com o intuito de garantir que a máquina seja capaz de desempenhar a função proposta de forma confiável e sem apresentar falhas, é necessário dimensionar e dar forma aos componentes, pela seleção de materiais e processos de fabricação adequados (NORTON, 2013).

O dimensionamento dos componentes apresenta por vezes desafios no que tange à determinação das cargas e/ou fatores em que estarão submetidos, quando depara-se com tais cenários, a análise estatística dos dados empíricos obtidos por meio de um teste real pode oferecer informações pertinentes para o processo de projeto. Com isso, admitidos uma configuração inicial e posteriormente faz-se uso de iterações (repetir a análise ou voltar ao estágio antecedente) para alcançar um projeto aceitável (NORTON, 2013) (Figura 36).

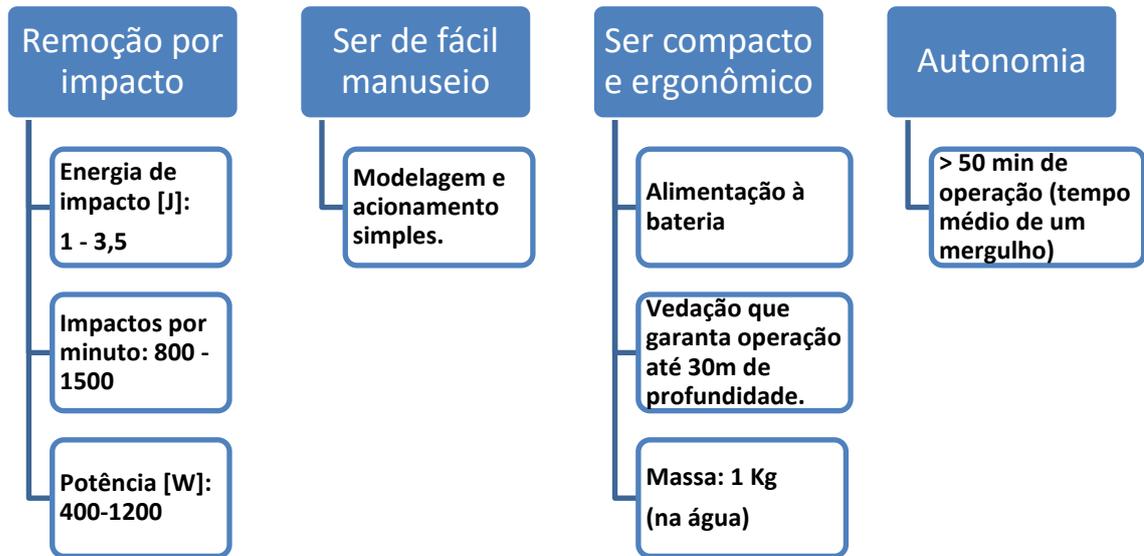
Normalmente, várias iterações são necessárias ao longo do processo de desenvolvimento para obter um resultado bem-sucedido, sendo necessário reajustar e modificar as peças em cada iteração, seja em termos de formato, dimensões, materiais, processo de fabricação ou outros fatores, a fim de alcançar um projeto viável (NORTON, 2013).

Figura 36 - Metodologia de projeto de máquinas.

1. IDENTIFICAÇÃO DA NECESSIDADE
•Vaga exposição e definição do problema.
2. PESQUISA DE SUPORTE
•Definir e compreender de forma completa o problema.
3. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS
•Estabelecer o objetivo do problema.
4. ESPECIFICAÇÕES DE TAREFAS
•Especificação das tarefas.
5. SÍNTESE
•Gerar soluções possíveis criativas.
6. ANÁLISE
•Analisar as soluções da etapa anterior e aprovar, rejeitar ou modificar se necessário.
7. SELEÇÃO
•Solução mais promissora é selecionada.
8. PROJETO DETALHADO
•Desenhos para fabricação, seleção de fornecedores, especificações de fabricações, materiais, e demais parâmetros são definidos.
9. PROTÓTIPO E TESTE
•Construção de um protótipo para teste.
10. PRODUÇÃO
•Produção em quantidade do produto.

Fonte: Adaptado de NORTON (2013).

Traduzir as necessidades do cliente é crucial para o projeto e quando realizada de forma inconsistente representa cerca de 80% dos atrasos na entrega, além gerar mais custos e possibilitar menor desempenho do produto em relação ao esperado. Os requisitos gerados a partir das necessidades do cliente (Figura 37) devem ser mensuráveis e possuírem valores-alvo, para que possam ser utilizadas como parâmetros e critérios de projeto (ULLMAN, 2010).

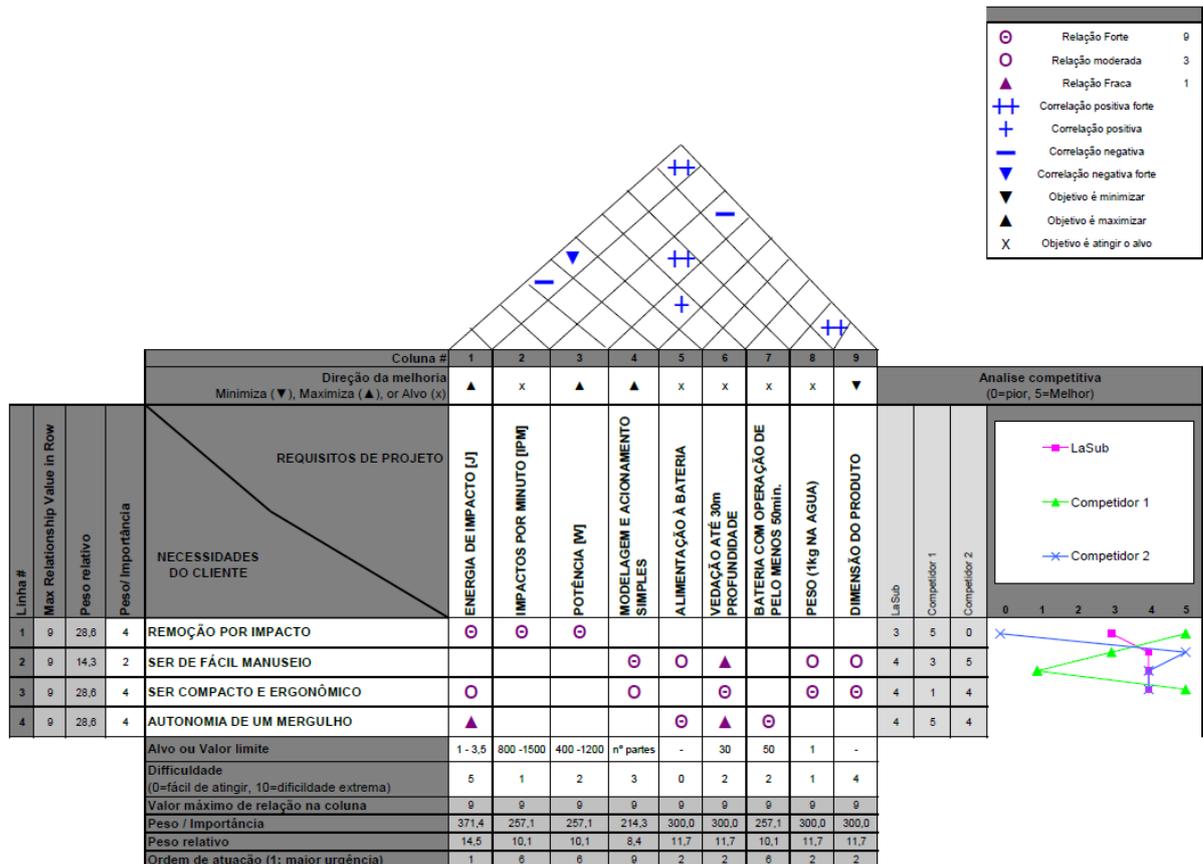
Figura 37 - Necessidades do cliente *versus* requisitos de projeto.

Fonte: a autora (2023).

4. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

As necessidades do cliente foram traduzidas em requisitos de projeto adotando a Matriz QFD (Figura 38) e como resultado obteve-se (Figura 37) que dentre as prioridades a serem atingidas estão a energia de impacto, vedação, massa, dimensão e que a alimentação se dê pelo uso de bateria. Ainda se constatou que há dois principais concorrentes de equipamentos de impacto para uso subaquático, o primeiro possui produtos disponíveis para venda na prateleira, atende principalmente ao requisito de energia de impacto, mas apresenta um produto relativamente pesado (5 Kg) e difícil de manusear por longos períodos de operação em razão do tamanho, enquanto o segundo concorrente apresenta baixo valor de energia de impacto e os produtos são apenas sob encomenda e, portanto, não estão disponíveis em prateleira para compra. Ainda, ambos os produtos são fabricados fora do Brasil com alto custo de aquisição e importação.

Figura 38 - Matriz QFD do projeto.



Fonte: a autora (2023).

A etapa de revisão bibliográfica considerou os métodos e ferramentas que já foram desenvolvidos para realização de controle ou manejo subaquático de preferência de corais, independente da região, profundidade ou espécie. Como resultado foi constatado que há pouca literatura no que tange ao desenvolvimento de ferramentas subaquáticas que atendam aos requisitos (Tabela 11).

Tabela 11 - Síntese dos trabalhos encontrados.

Nº	ARTIGO	OBJETIVO	PONTOS FORTES	PONTOS FRACOS
1	Design and Construction of an Electric Chisel for Underwater Applications. [SPADAFORA et al. (2015)]	Desenvolvimento de uma ferramenta para que arqueólogos possam limpar estruturas submersas.	<ul style="list-style-type: none"> Ferramenta bem compacta; Bloco de engrenagens à 90° em relação ao motor. 	<ul style="list-style-type: none"> Energia de impacto: 1 J; Max. IPM: 2700 IPM.
2	Development and validation of a mathematical model for predicting the performance of rotary hammer drills. [DIDIER, 2013]	Validar o modelo desenvolvido por meio de testes de desempenho com um martelete elétrico modelo 5262-20.	<ul style="list-style-type: none"> Detalhamento de cada componente do sistema; Modelagem da ferramenta para estimativa de desempenho. 	Não efetivamente desenvolve um produto, mas compara os valores da modelagem com testes.
3	Analysis of the dynamic characteristics of gas chamber in rotary hammer. [YAN, 2016]	Modelo matemático dinâmico e simulações de dinâmica de fluidos para analisar as influências dos parâmetros sensíveis do projeto da câmara de gás na produção de energia de impacto e na eficiência do impacto.	<ul style="list-style-type: none"> Apresenta que os parâmetros sensíveis na produção de energia de impacto são a massa do pistão de impacto, o volume da câmara, velocidade de rotação da manivela e os orifícios do sistema. 	Auxilia na obtenção de parâmetros para otimizar os componentes do projeto e melhorar a energia de impacto da ferramenta.
4	Underwater power tools for in situ preservation, cleaning and consolidation of submerged archaeological remains. [SCALERCIO et al., 2021]	Ferramentas para conservação subaquática de artefatos arqueológicos.	<ul style="list-style-type: none"> Motor compacto; Energia de impacto de 2,5 J; Uso de bateria Ion-Lítio; Max IPM: 4800 IPM. 	Desenvolvida com objetivo de preservação e limpeza de sítios arqueológicos, sem o objetivo da remoção completa de substratos ou colônias.

Fonte: a autora (2023).

Em relação à busca por produtos que atendam integralmente ou parcialmente os requisitos de projeto e estejam disponíveis em prateleira para venda (Brasil ou exterior), foi encontrado apenas o martetele elétrico da marca Nemo (Tabela 12).

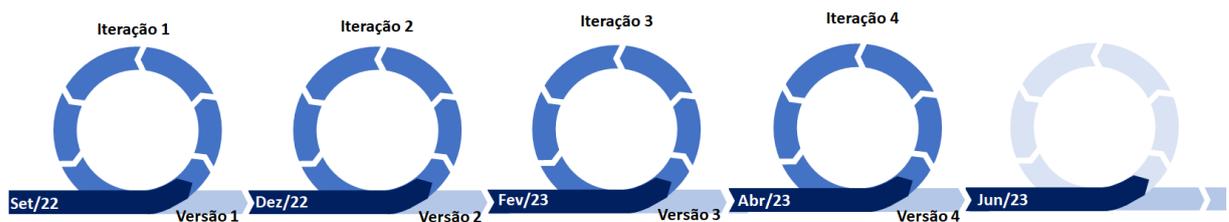
Tabela 12 - Produto concorrente no mercado.

Nº	PRODUTO NO MERCADO	PREÇO (US\$)	PONTOS FORTES	PONTOS FRACOS
1	Nemo SDS Rotary Hammer [NEMO, 2023]	US\$ 3370,00	<ul style="list-style-type: none"> Energia de impacto: 3,2 J; Max IPM: 5000; Alimentação à bateria. 	<ul style="list-style-type: none"> Peso: 5 Kg; Ferramenta grande para manuseio e trabalhos por longos períodos; Necessário importação; Precisa ser pressurizada antes de mergulhar.

Fonte: a autora (2023).

Portanto com o objetivo de atender as necessidades do cliente, nesta seção serão apresentadas as iterações (metodologia ágil) e as considerações de projeto realizadas à cada etapa (Figura 39) até a obtenção de um protótipo usinado (versão 4) de uma ferramenta subaquática de impacto que visa a remoção de coral-sol espécie *Tubastraea coccinea*.

Figura 39 - Iterações do projeto na metodologia ágil.



Fonte: a autora (2023).

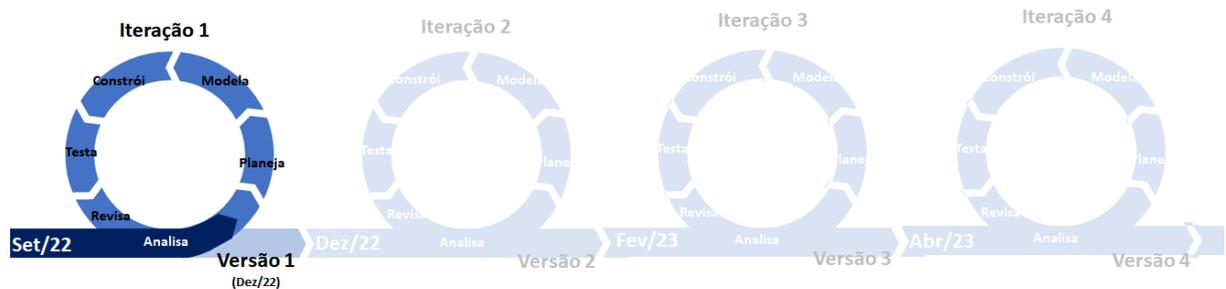
4.1. PROTÓTIPOS DESENVOLVIDOS

Esta seção contempla o desenvolvimento de quatro versões de protótipos por meio de iterações com auxílio da metodologia ágil. A modelagem das versões foi realizada com uso da ferramenta Solidworks.

4.1.1. Protótipo versão 1 (engenharia reversa)

A engenharia reversa consiste na desmontagem de um equipamento ou ferramenta para entender o funcionamento, por meio da análise dos componentes, circuitos e tecnologia na ausência do projeto ou modelagem original. Para a construção do protótipo versão 1 (Figura 40), foi realizada a engenharia reversa de um martetele elétrico terrestre de prateleira para análise, buscando o entendimento dos componentes, funcionamento e principais parâmetros que pudessem ser alterados para atingir o objetivo esperado, o manejo do coral-sol.

Figura 40 – Iteração 1 na metodologia ágil.



Fonte: a autora (2023).

Ainda como parte desta etapa, buscou-se o aproveitamento das peças comerciais em uma nova carcaça, acrescido da modelagem de algumas partes para que fossem impressas com manufatura aditiva. Todas as peças foram então alocadas em um tubo de alumínio para posterior teste de validação do conjunto.

A escolha do uso do tubo de alumínio se deu principalmente para reduzir o tempo de desenvolvimento, e havia disponibilidade do produto no laboratório com diâmetro satisfatório que pudesse montar as peças em seu interior, acrescido de tampas frontal e traseira.

O modelo de martetele elétrico adquirido pelo projeto foi o martetele perfurador e rompedor à bateria de íon lítio 18V intercambiável IMV 1815 da marca Vonder. A escolha foi baseada na facilidade em encontrar os produtos da marca, bem como a reposição de suas peças e o preço de prateleira da ferramenta. Os parâmetros e características técnicas estão descritos na Tabela 13.

Tabela 13 - Parâmetros do marteleto elétrico comercial.

PARÂMETRO	VALOR	UNIDADE
Força de impacto	1,8	Joule [J]
Impacto por minuto	0 – 5500/min	IPM
Rotação	0 – 1500/min	RPM
Massa	3,3	Kg
Nível de ruído	87	dB (A)
Nível de vibração	20,792	m/s ²

Fonte: Adaptado de Vonder (2023a).

Para as versões de marteleto com alimentação à bateria, as versões menores geralmente são encontradas no mercado com as duas funções, martelo rompedor e furadeira. Em razão disso, após a desmontagem (Figura 41) e ao isolar apenas a função de marteleto, foi possível identificar os componentes que poderiam ser excluídos na montagem do protótipo para que a única função exercida pela ferramenta fosse a desejada.

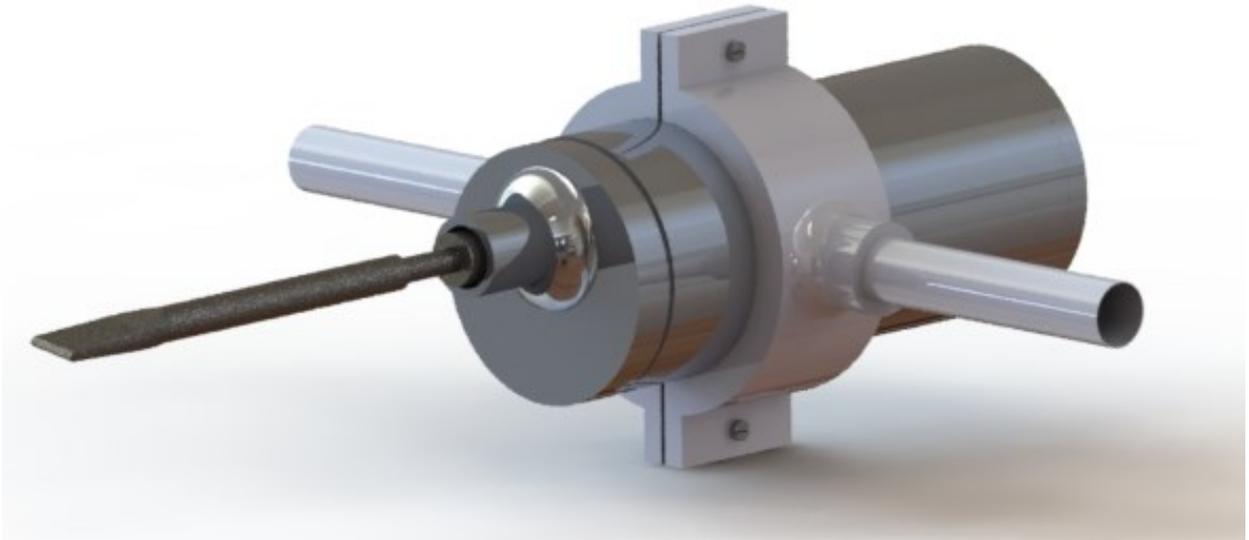
Figura 41 - Marteleto comercial e componentes após desmontagem.



Fonte: a autora (2022).

Foram modeladas uma nova tampa frontal e traseira, moldes que pudessem limitar o movimento lateral do motor e o bloco principal da caixa de engrenagens e uma empunhadura, para posteriormente as peças serem impressas por manufatura aditiva em PLA com o apoio do Laboratório de Inovação e Desenvolvimento de Produtos (LID) na UFSC.

Figura 42 – Modelagem da versão 1 do martelele elétrico.



Fonte: a autora (2022).

Após as peças impressas prontas, notou-se que a impressora 3D estava calibrada de maneira que foi necessário retirar o material sobressalente projetado anteriormente por acreditarmos que haveria contração razoável do material após o resfriamento da peça. A remoção ocorreu com o auxílio de lixas grão de areia e uma micro retífica (Figura 43), até que a montagem apresentasse bom ajuste.

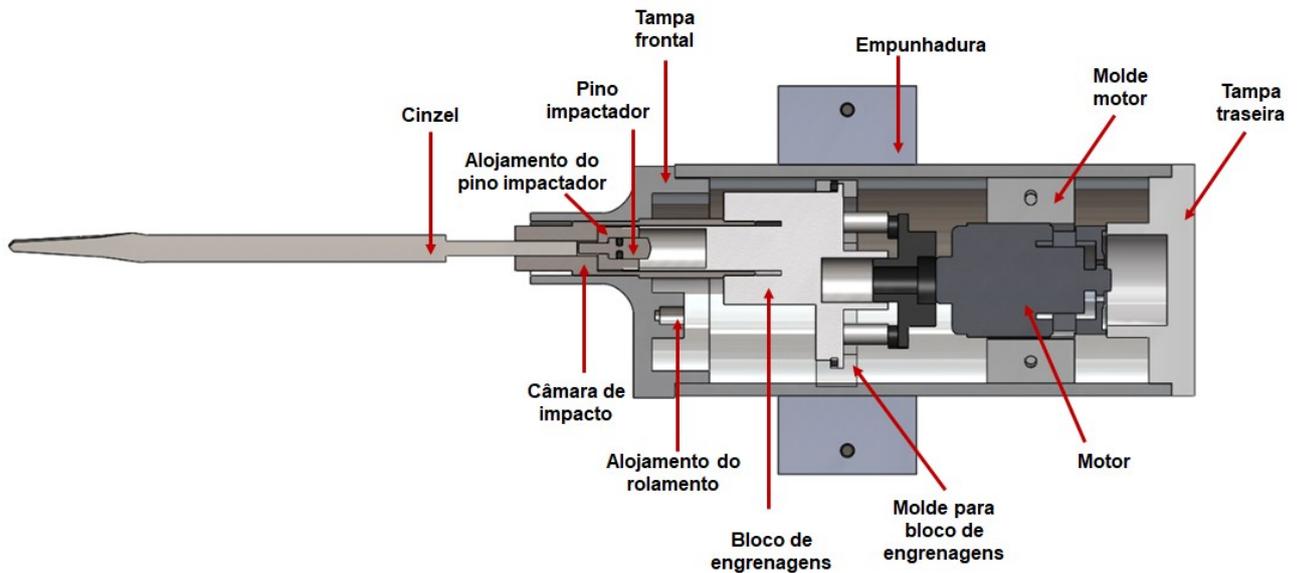
Figura 43 - Micro retífica ARV 175 Vonder.



Fonte: VONDER (2023b).

O protótipo versão 1 (Figura 42) construído com peças comerciais e manufatura aditiva foi testado e funcionou normalmente, indicando que mesmo com propriedades mais restritivas do material PLA, a modelagem, geometria e montagem do novo protótipo cumpriu o principal papel, o de entendimento da mecânica da ferramenta comercial pela engenharia reversa e validação do funcionamento após retirada de alguns componentes (Figura 44).

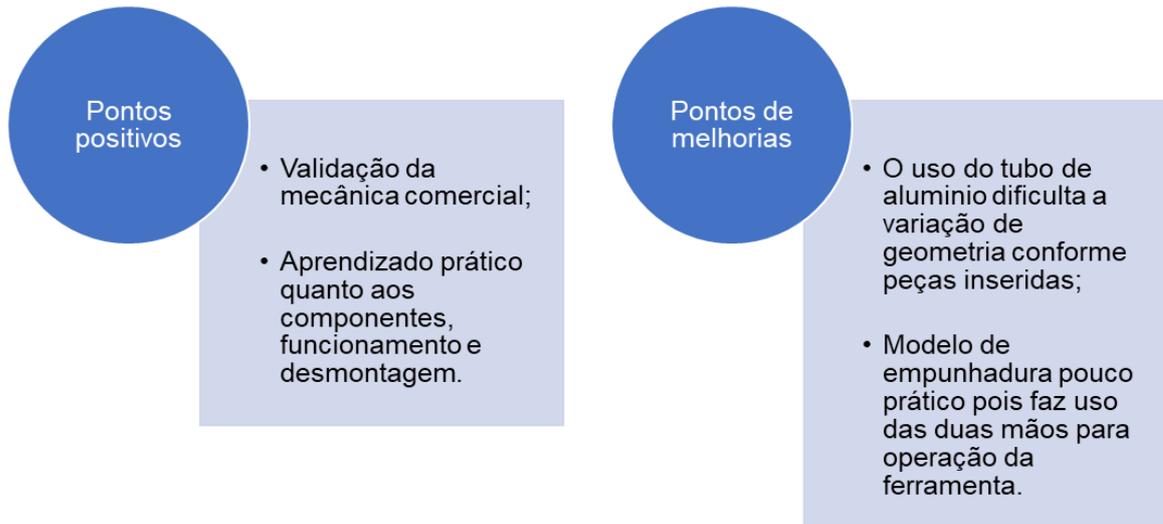
Figura 44 - Corte para vista interna da montagem do protótipo versão 1.



Fonte: a autora (2022).

Os gastos nessa iteração com materiais e manufatura não foram considerados pois além da colaboração do LID, tinha-se os demais componentes, resultantes de outros projetos, disponíveis no laboratório. As informações de entrada para a próxima iteração e pontos positivos dessa versão estão dispostas na Figura 45

Figura 45 - Pontos positivos e de melhoria da versão 1 a próxima iteração.

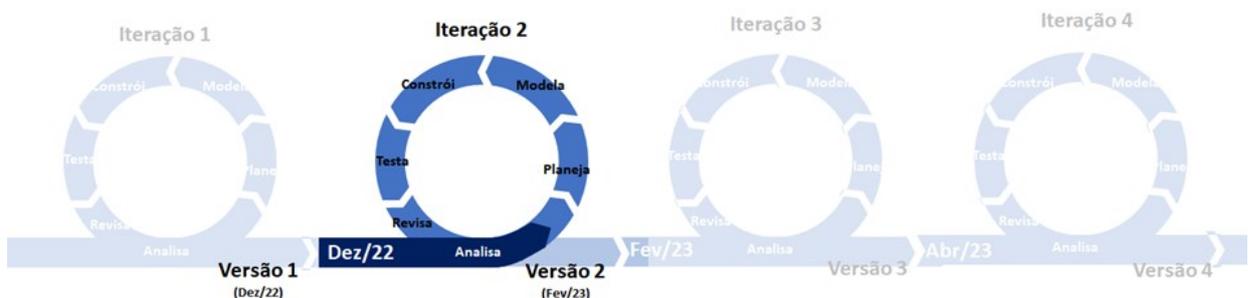


Fonte: a autora (2023).

4.1.2. Protótipo versão 2 (vedação)

Para a segunda versão (Figura 46), o objetivo foi o desenvolvimento de uma melhor geometria para alocação dos componentes e estudo da vedação. Esta nova iteração compreendeu na modelagem agora de um protótipo vedado (marinizado), que pudesse suportar a operação de manejo submerso sem que houvesse entrada de água no sistema e prejuízo dos componentes.

Figura 46 – Iteração 2 na metodologia ágil.



Fonte: a autora (2023).

Nessa etapa abordou-se como a geometria afetaria a manufatura do produto na versão 4 e os resultados dessas discussões estão disponíveis na Tabela 14.

Tabela 14 - Síntese das discussões sobre alguns processos de manufatura.

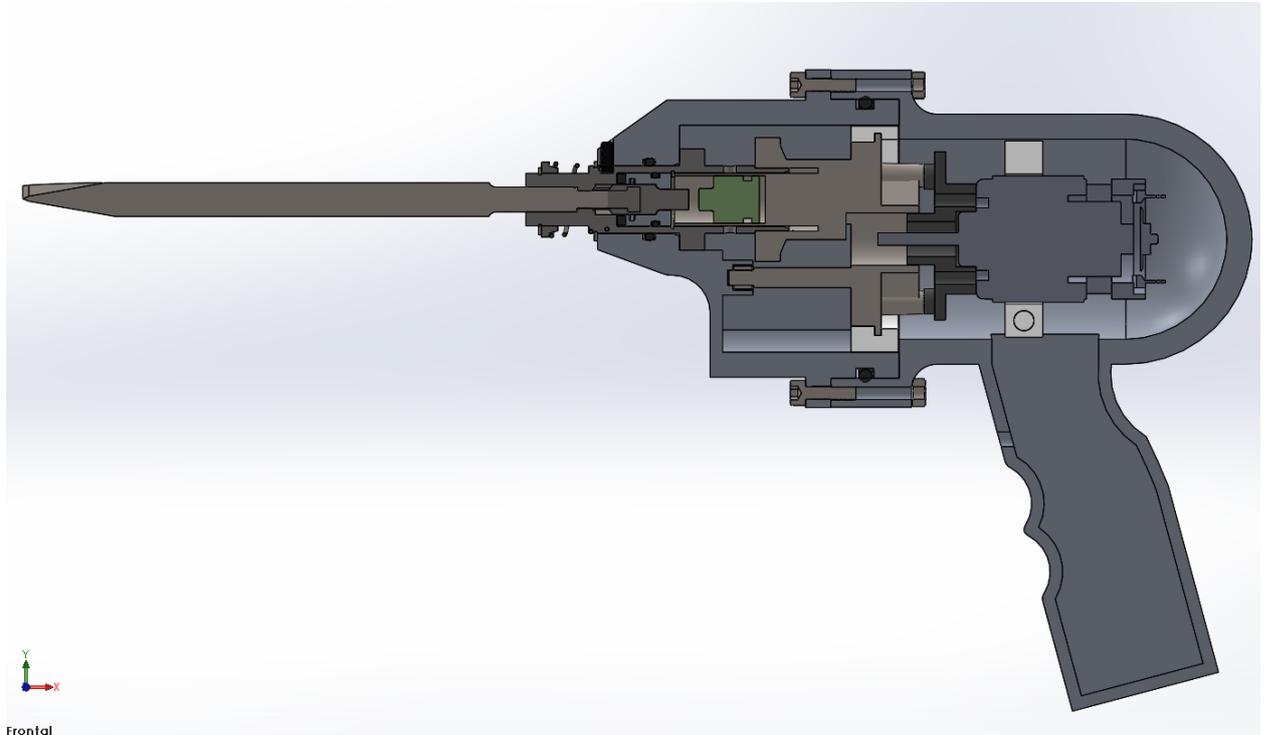
FUNDIÇÃO	+	<p>Maior liberdade em relação à geometrias complexas.</p>
	-	<p>Qualquer alteração posterior na geometria, inviabiliza o uso do molde já fabricado, sendo necessário novo molde para produção do produto. Difícil encontrar fornecedores para produção em pequena quantidade.</p>
INJEÇÃO	+	<p>Obtenção de um produto leve e bi-partido, o que facilitaria a manutenção dos componentes e montagem.</p>
	-	<p>A vedação da carcaça do produto deverá ser feita sob encomenda, o que acrescentaria mais tempo na obtenção do produto final.</p>
USINAGEM	+	<p>Alta precisão dimensional; Permite ajustes e modificações na peça; Adequada para prototipagem rápida.</p>
	-	<p>Composto por diversos processos, a usinagem geralmente possui maior tempo de produção.</p>

Fonte: a autora (2023).

A consideração destes aspectos nessa fase foi importante pois a relação entre geometria e processos de fabricação tem alta correlação e a idealização de uma geometria sem levar em consideração outros aspectos poderia inviabilizar a manufatura do produto ou alcançar custos e tempo de produção que não estivessem no escopo de projeto.

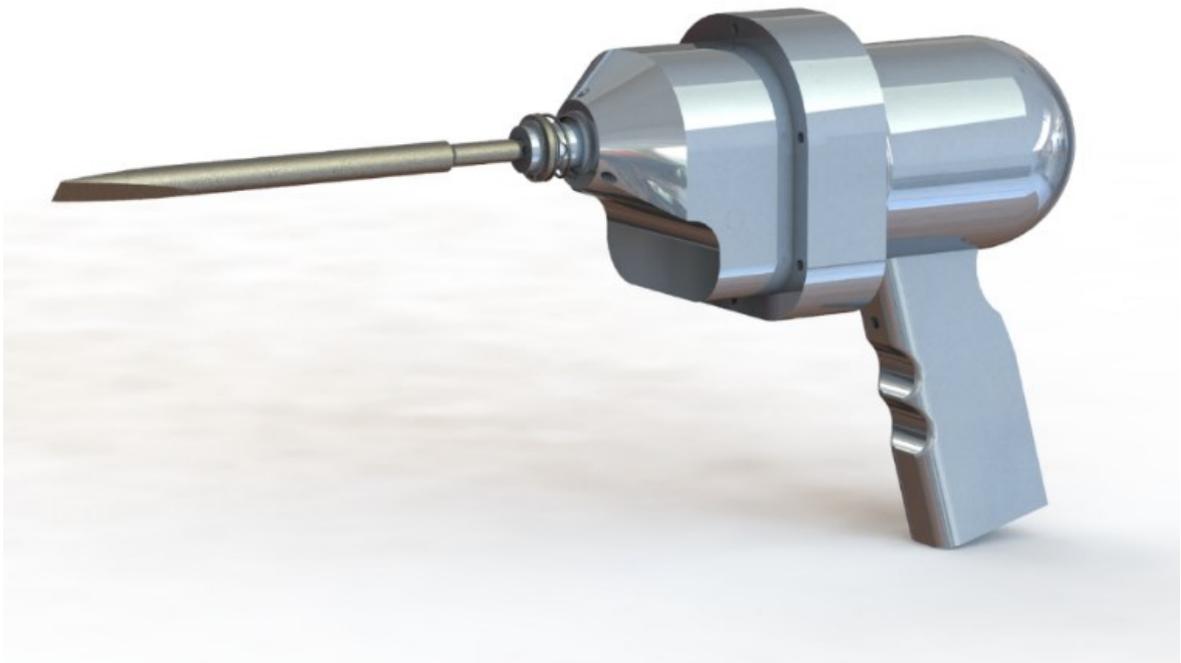
A geometria da tampa frontal foi modelada (Figura 48) de modo que acoplasse o cabeçote de engrenagens com o intuito de minimizar espaços vazios, o mesmo aconteceu com a tampa traseira e a geometria para encaixe do motor. A tampa traseira compreende também na empunhadura, onde foram dimensionados rebaixos para acomodar os dedos do operador da ferramenta e encaixe para a mão e melhor sustentação (Figura 47).

Figura 47 - Corte de seção da versão 2 do martetele elétrico.



Fonte: a autora (2022).

Figura 48 - Modelagem no Solidworks da versão 2 do martetele elétrico.



Fonte: a autora (2022).

Os dimensionamentos dos alojamentos para os anéis de vedação foram realizados com auxílio de uma ferramenta desenvolvida pelo membro do laboratório, Arthur Sena, que se baseia na ISO 3601-1:2016, ISO 3601-2:2016 e na calculadora de O-rings do fornecedor Trelleborg. Com o auxílio da ferramenta, é possível inserir alguns parâmetros de entrada (Tabela 15) e obter os principais parâmetros quanto às dimensões necessárias para projetar o alojamento e os percentuais de compressão e alongamento permitidos (Tabela 16).

Tabela 15 - Parâmetros para dimensionamento da ranhura do O'ring.

	Unidade	Parâmetros de entrada	Parâmetros de saída
Tipo de instalação do alojamento	-	Rod ou piston	
Modo de análise	-	Estático ou dinâmico	
Fluido/ambiente	-	Hidráulico ou pneumático	
Material do O'ring	-	Viton	
Dureza do material do anel O'ring	Shore A	75	
Diâmetro do furo para aplicações de pistão	[mm]	Rod: d_5 Piston: d_4	
Pressão manométrica a ser alcançada	[N/mm ²]	0,30	
Diâmetro da seção transversal do O'ring	[mm]		✓
Profundidade total da carcaça (t)	[mm]		✓
Folga (g) / Folga radial (S)	[mm]		✓
Profundidade da ranhura (h)	[mm]		✓
Diâmetro do pistão	[mm]		✓
Diâmetro interno do alojamento para aplicação do pistão	[mm]		✓
Diâmetro interno do anel O'ring	[mm]		✓
Diâmetro externo do O'ring	[mm]		✓
Código selecionado do O'ring da Trelleborg	-		✓
Alongamento mínimo	%		✓
Alongamento máximo	%		✓
Porcentagem de alongamento do diâmetro interno	%		✓
Porcentagem de redução de d_2 devido ao alongamento diametral	%		✓
Diâmetro da seção transversal do O'ring, corrigido	[mm]		✓
Limite de compressão inferior devido ao requisito de pressão	%		✓
Compressão efetiva mínima	%		✓
Compressão efetiva máxima	%		✓
Compressão efetiva	%		✓
Largura da ranhura	[mm]		✓
Raio	[mm]		✓
Ângulo do chanfro de entrada	[°]		✓
Comprimento do chanfro de entrada Z	[mm]		✓

Fonte: a autora (2023).

Os critérios de satisfação dos valores para dimensionamento do alojamento do O'ring respeitam os dispostos na ISO 3601-2:2016, e dizem a respeito ao percentual de alongamento do diâmetro interno, do percentual de preenchimento do alojamento e da compressão efetiva (Tabela 16).

Tabela 16 – Principais critérios utilizados para bom dimensionamento do alojamento do O'ring.

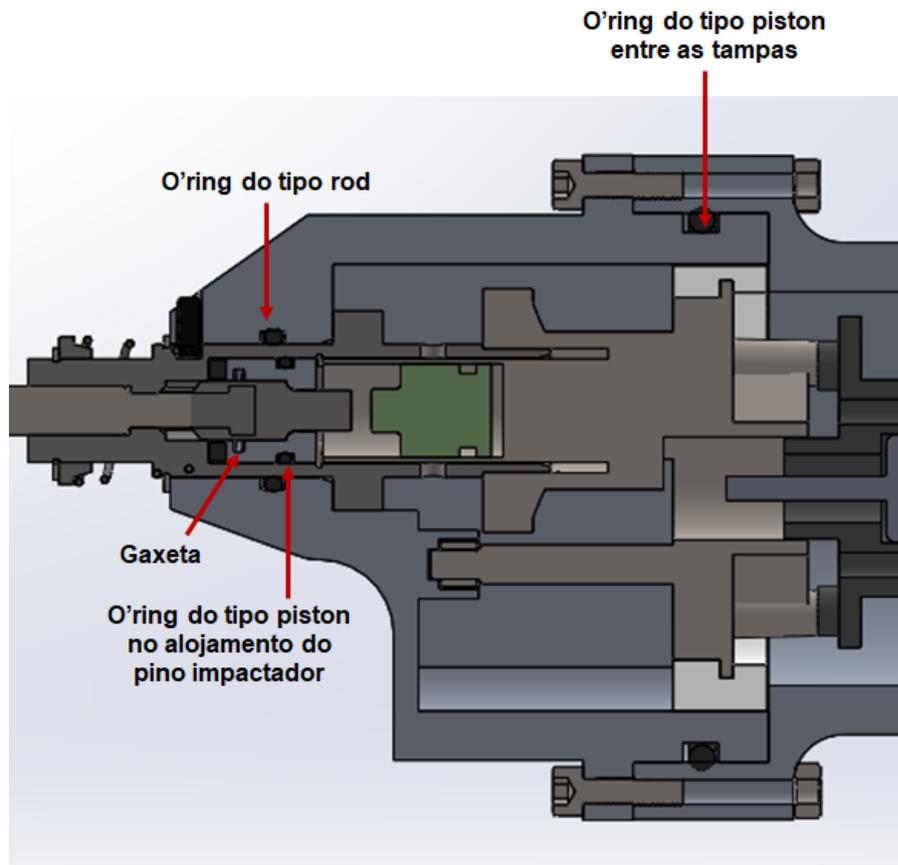
	Estático	Dinâmico
Porcentagem de alongamento do diâmetro interno	$2\% < d_1 < 5\%$	$2\% < d_1 < 8\%$
	Rod ou piston	
Compressão efetiva (C%)	$3\% < C < 25\%$	
	Rod ou piston	
Preenchimento do alojamento	Até 85%	

Fonte: adaptado de ISO 3601-2:2016 (2016).

Especialmente para O'rings com diâmetros (d_1) menores que 20 mm o dimensionamento tornou-se bastante desafiador pois inclusive na norma ISO 3601-2:2016 é informado que pode resultar em uma faixa maior de alongamento e em razão disso é necessário ter menos exigência quanto às tolerâncias de extensão mínima do O'ring.

Quanto aos alojamentos dimensionados foram necessários quatro (Figura 49), sendo um entre as tampas frontal e traseira, dois no sistema do pino impactador e o último externo à câmara de impacto entre a tampa frontal. Além do O'ring foi necessário o dimensionamento de uma gaxeta para vedação no alojamento do pino impactador, isto se deu, pois, a velocidade linear do pino impactador é de 0,9 m/s e de acordo com o fabricante Trelleborg não é recomendado o uso de O'rings acima de 0,5 m/s.

Figura 49 - Alojamento dos O'rings na versão 2.

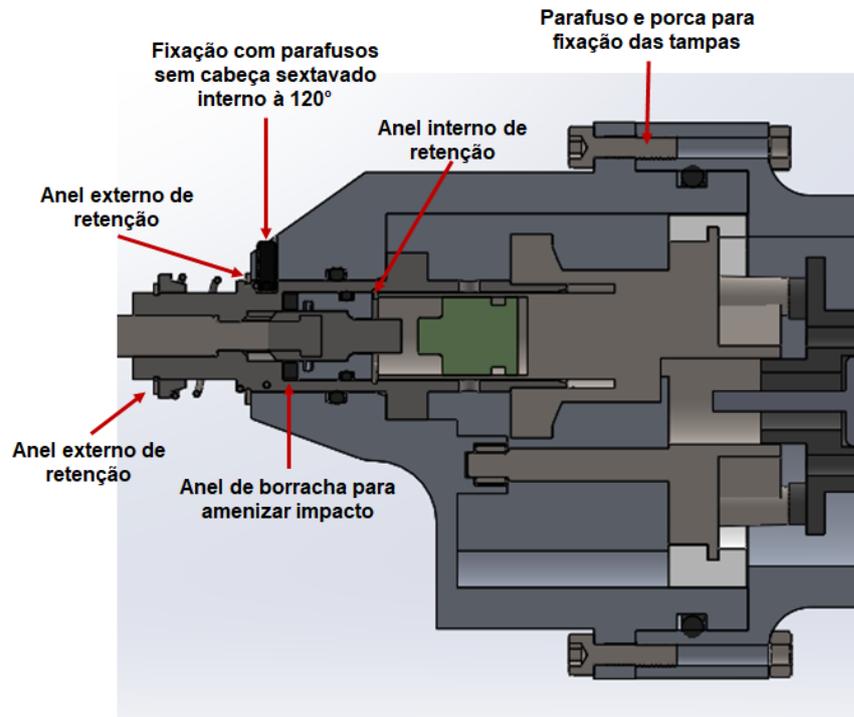


Fonte: a autora (2023).

O material escolhido foi o Viton, marca registrada da DuPont para o FKM (TRELLEBORG, 2019), pois é recomendado para temperaturas com range de -29°C a $+204^{\circ}\text{C}$, possui compatibilidade satisfatória para água salgada e graxa (PARKER, 2007), além de ser encontrado facilmente no distribuidor em Joinville em diversos diâmetros internos e seções transversais.

A prototipagem rápida foi realizada por meio da manufatura aditiva com o material ABS, a escolha do material é corroborada em razão da temperatura de transição vítrea o que permite que ao realizar qualquer ajuste na peça com a micro retífica a peça seja mais resistente ao calor que o PLA. Além disso, foram projetados alojamentos para acomodação de anéis externo e interno (Figura 50) que têm por objetivo evitar limitar o curso ou posicionar um componente ou conjunto.

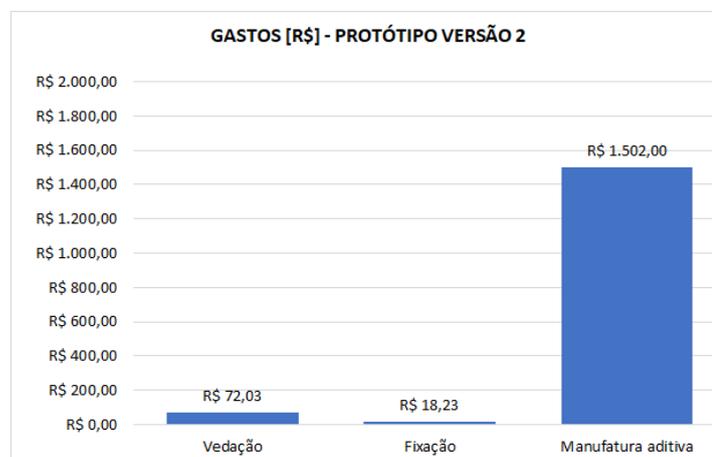
Figura 50 - Elementos de fixação no protótipo versão 2.



Fonte: a autora (2023).

Em relação aos gastos, são apresentadas em três categorias (Figura 51), a de vedação (O'ring), de fixação (parafusos, arruelas, porcas e anéis internos e externos) e a de manufatura aditiva (moldes, tampa, empunhadura e demais componentes).

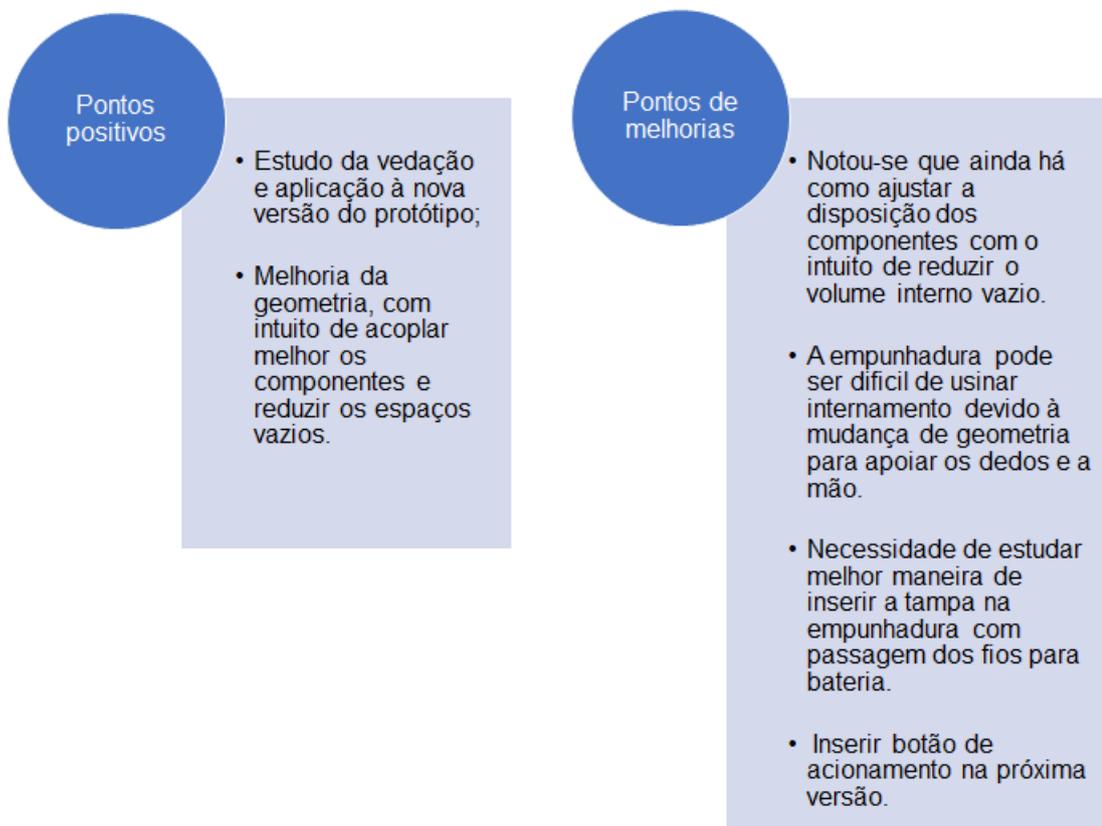
Figura 51 - Gastos por categoria para a versão 2.



Fonte: a autora (2023).

Com a prototipagem da versão 2 e uma nova iteração com base na versão 1, foi possível realizar o estudo da vedação na prática com o intuito de obter uma ferramenta que não haja o embarque de água enquanto estará sendo utilizada em campo, além de criar um arranjo geométrico para melhor acomodação dos componentes e tornar o martelete mais compacto. Os principais pontos levantados a partir da prototipagem da versão 2, estão dispostos na Figura 52.

Figura 52 - Pontos positivos e de melhoria da versão 2 para a próxima iteração.

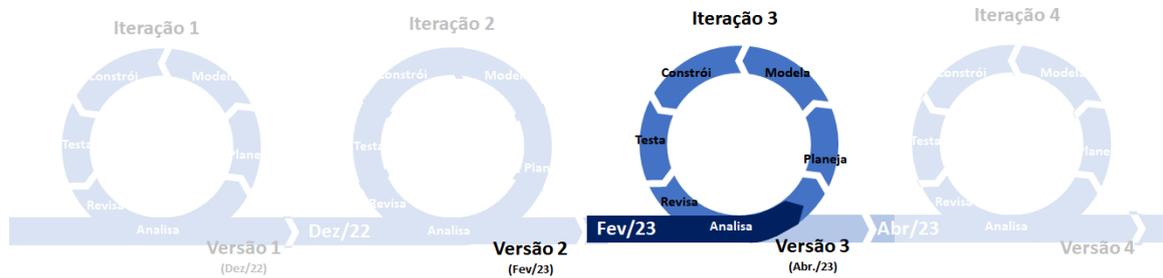


Fonte: a autora (2023).

4.1.3. Protótipo versão 3 (acionamento)

A terceira iteração e o desenvolvimento do protótipo versão 3 (Figura 53), teve como objetivo a melhoria dos pontos identificados na versão 2, a inclusão do sistema de acionamento e uma tampa na empunhadura que fosse possível a passagem do cabeamento que sai do motor, passa pelo ESC (controle eletrônico de velocidade do motor) e liga-se a bateria do lado externo da ferramenta.

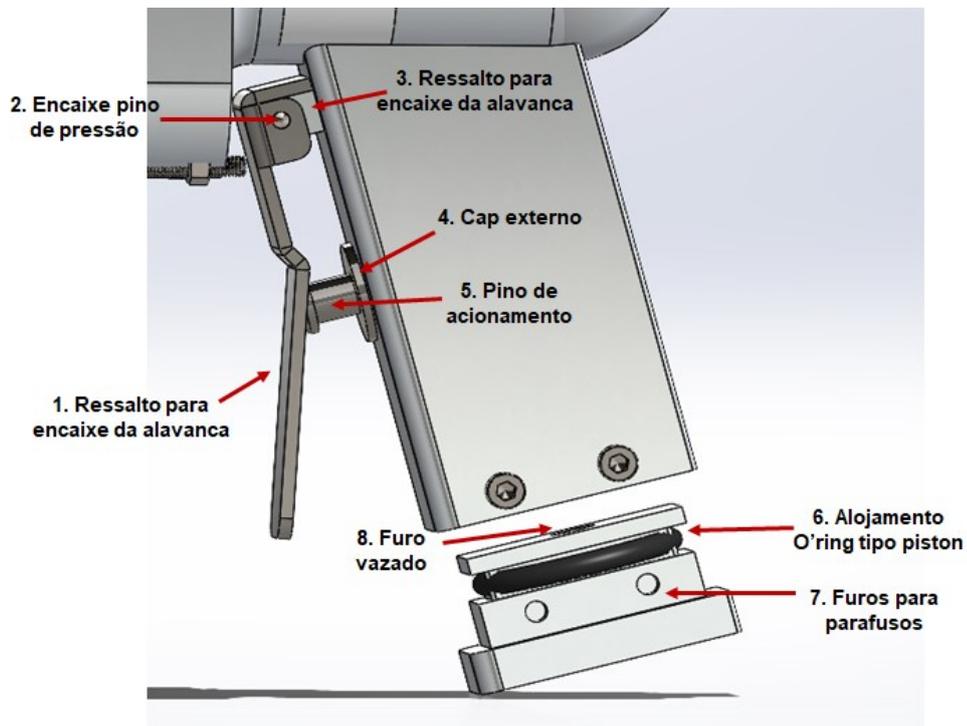
Figura 53 - Iteração 3 na metodologia ágil.



Fonte: a autora (2023).

Aumentando o comprimento da tampa frontal e fazendo ajustes quanto à alocação dos componentes, foi possível reduzir cerca de 25% do volume do produto. Quanto ao acionamento foi pensado em um sistema composto por uma alavanca (1) presa por um pino de pressão (2) no ressalto (3) da empunhadura e duas peças adicionais responsáveis pelo curso do ESC para acionar o motor, peça externa de acionamento (4) e o pino de acionamento (5) (Figura 54).

Figura 54 - Sistema de acionamento e tampa empunhadura da versão 3.



Fonte: a autora (2023).

Para a solução da tampa na empunhadura para passagem do cabeamento foi sugerida uma tampa com geometria que acompanhasse a geometria empunhadura (Figura 54), alojamento para uma unidade de O'ring (6), 4 furos para fixação da tampa (7) à empunhadura e um diâmetro vazado internamente (8) onde passará a fiação com capa (Figura 55) e será vedado com uso de epóxi.

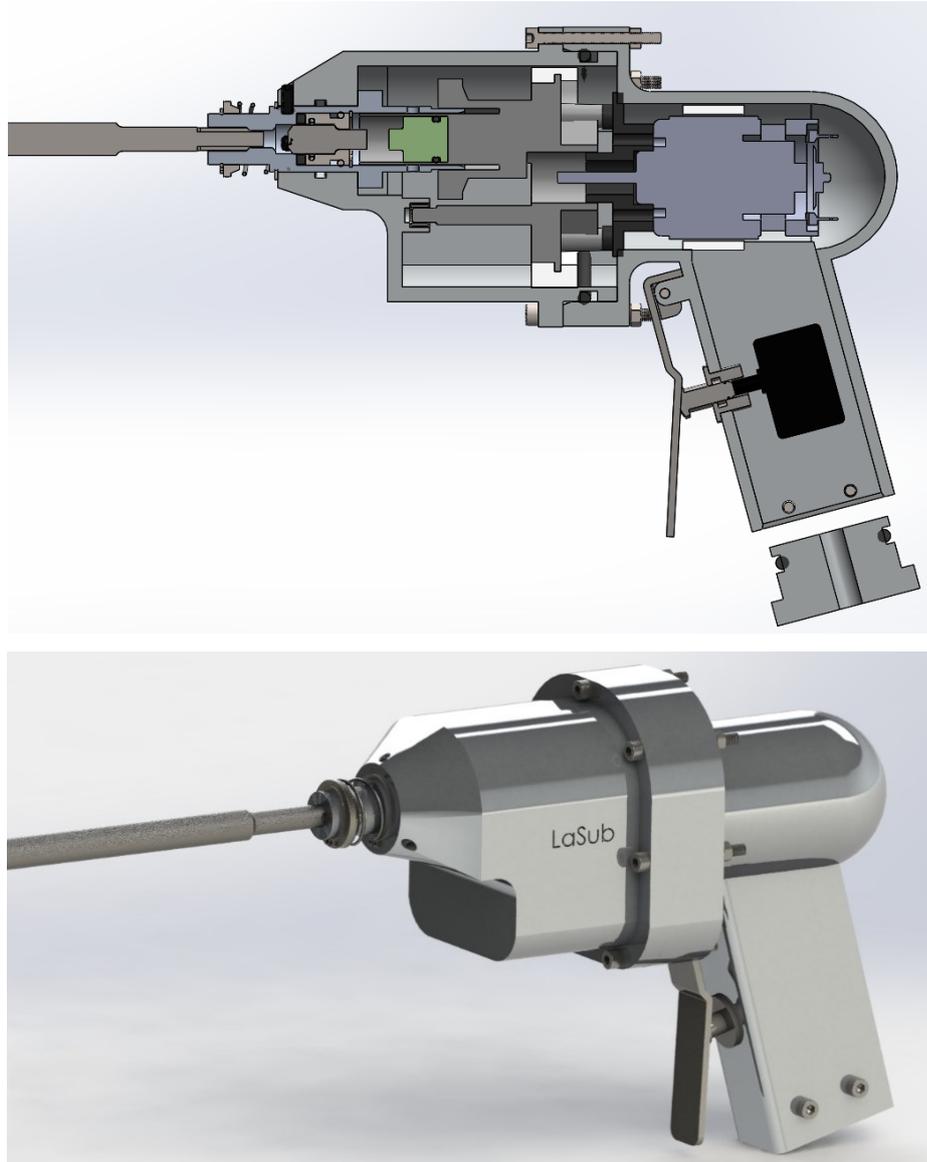
Figura 55 - Cabo PP externo 2 vias usado para cabeamento.



Fonte: a autora (2023).

Além dos pontos mencionados, optou-se por manter a geometria da empunhadura constante retirando os rebaixos para apoio da mão e dos dedos para facilitar a usinagem, uma vez que seria necessário o processo de eletroerosão para alcançar a geometria desejada. Com esta nova iteração foi possível aprimorar os pontos identificados na versão anterior, propor soluções quanto ao acionamento e ligação da ferramenta à bateria (Figura 56).

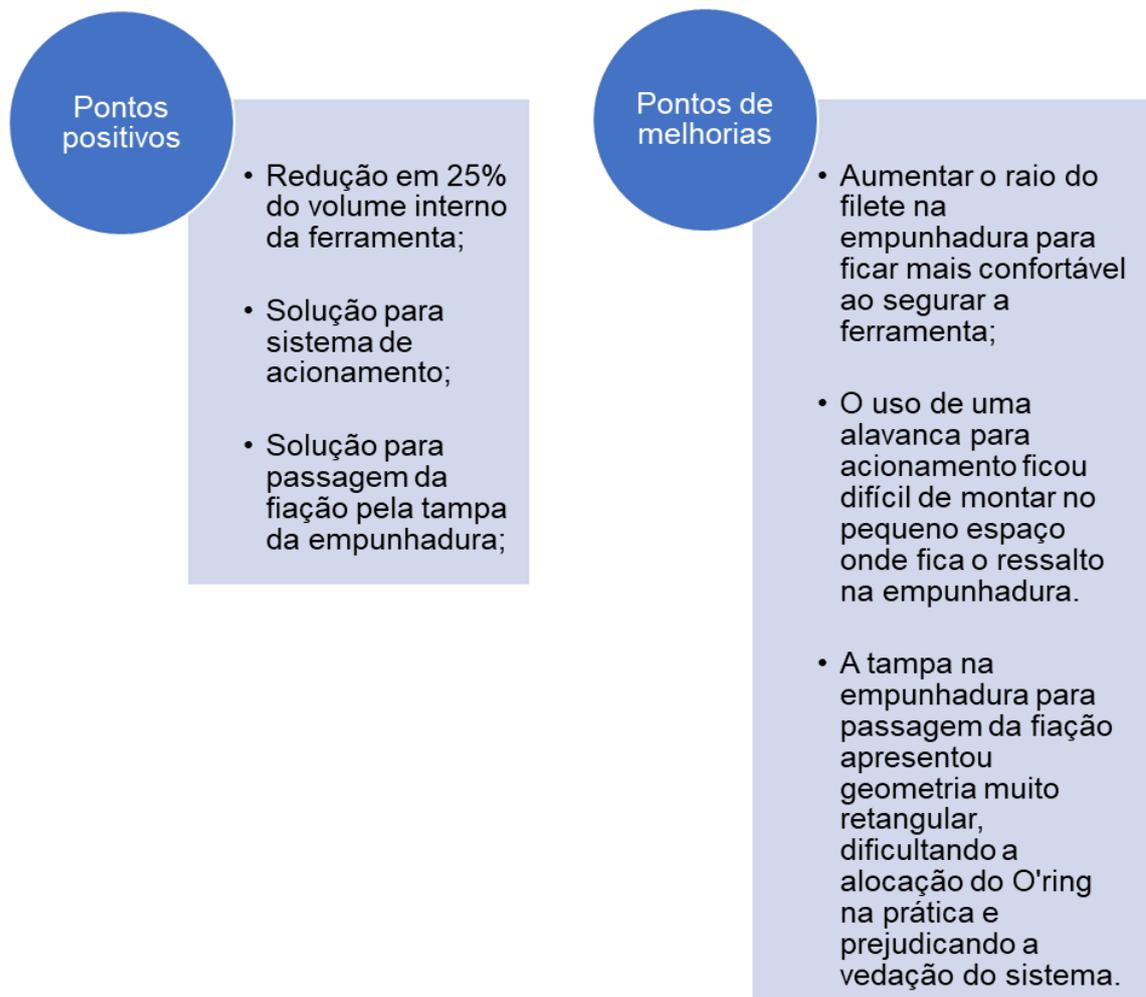
Figura 56 - Vista de corte e modelagem da versão 3 do martetele elétrico.



Fonte: a autora (2023).

Após a prototipagem rápida da versão 3, foram identificados pontos de melhorias que abrangem desde a vedação da tampa da empunhadura, o conforto ao segurar a ferramenta e a dificuldade em montar a alavanca de acionamento do sistema (Figura 57).

Figura 57 – Pontos positivos e de melhorias da versão 3 para a próxima iteração.



Fonte: a autora (2023).

4.1.3. Protótipo versão 4 (usinagem)

As três iterações passadas foram importantes para amadurecer o projeto, visto que foram necessários desde considerações quanto à geometria, vedação, conforto e segurança ao manusear a ferramenta, posição de acionamento, considerando também que esta versão deveria ser usinada e a modelagem deveria ser considerada de modo que o processo de manufatura não fosse dificultado.

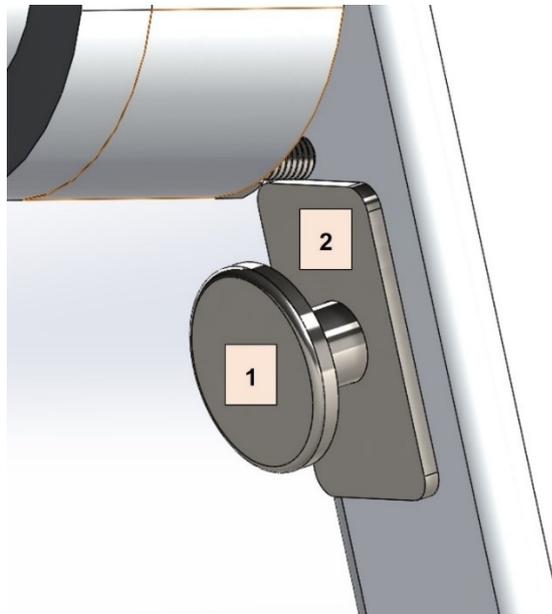
Figura 58 – Iteração 4 na metodologia ágil.



Fonte: a autora (2023).

Nesta iteração (Figura 58), o sistema de acionamento teve que ser repensado pois a montagem da alavanca foi dificultada devido ao pequeno espaço para acessar o ressalto e realizar a fixação. A alteração resultaria ou em mais espaço interno vazio ao aumentar o comprimento da tampa frontal ou a dificuldade em alcançar a alavanca ao descer a posição do ressalto e aumentar o ângulo de acionamento da alavanca com os dedos. Foi então sugerida a mudança para um sistema com acionamento com um pino de cabeça (1), cabeça esta semelhante à uma moeda (Figura 59).

Figura 59 - Detalhe do botão de acionamento da versão 4.

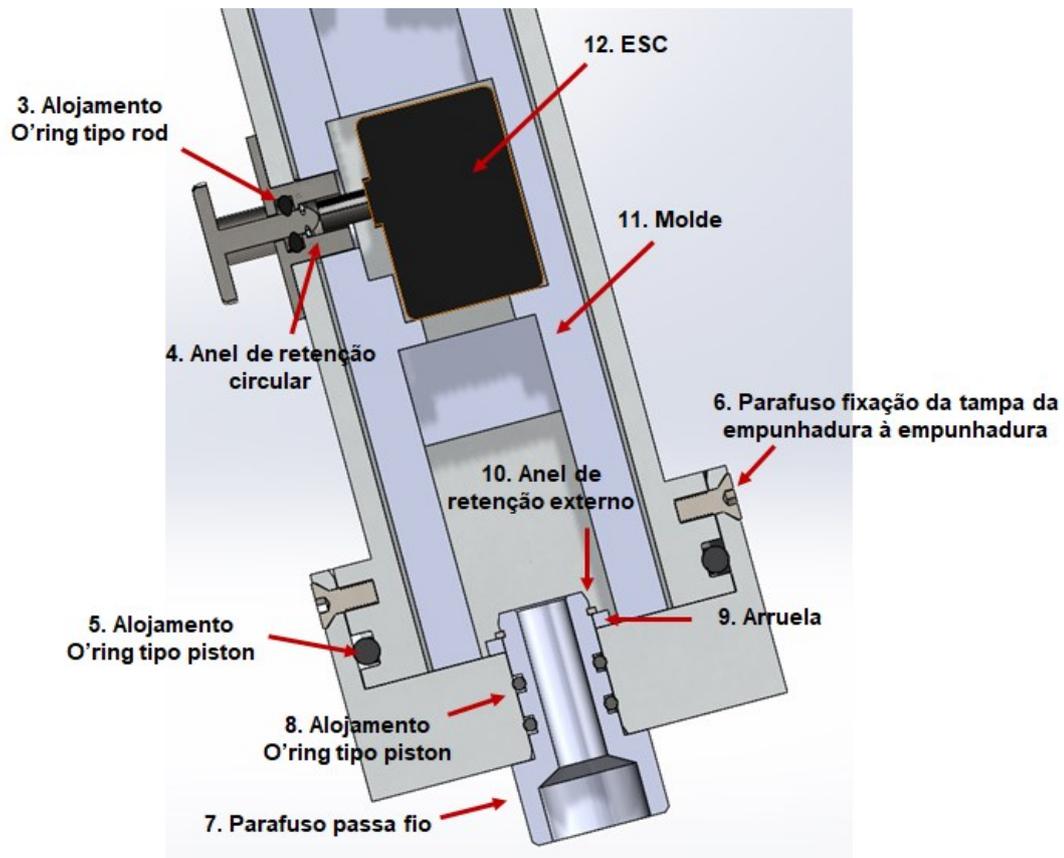


Fonte: a autora (2023).

Composto por duas partes (Figura 59), o pino de acionamento (1) e o peça externa de acionamento (2), o sistema de acionamento é vedado utilizando um O'ring

do tipo rod (3) e um anel circular de retenção (4) que impeça que o pino saia da carcaça enquanto não estiver acionado (Figura 60). A peça externa de acionamento foi uma solução adotada para que o conjunto pudesse ser montado fora da ferramenta com os itens de fixação e posteriormente colado com epóxi para garantir a vedação.

Figura 60 - Vista de corte para detalhe do sistema de acionamento e tampa da empunhadura da versão 4.



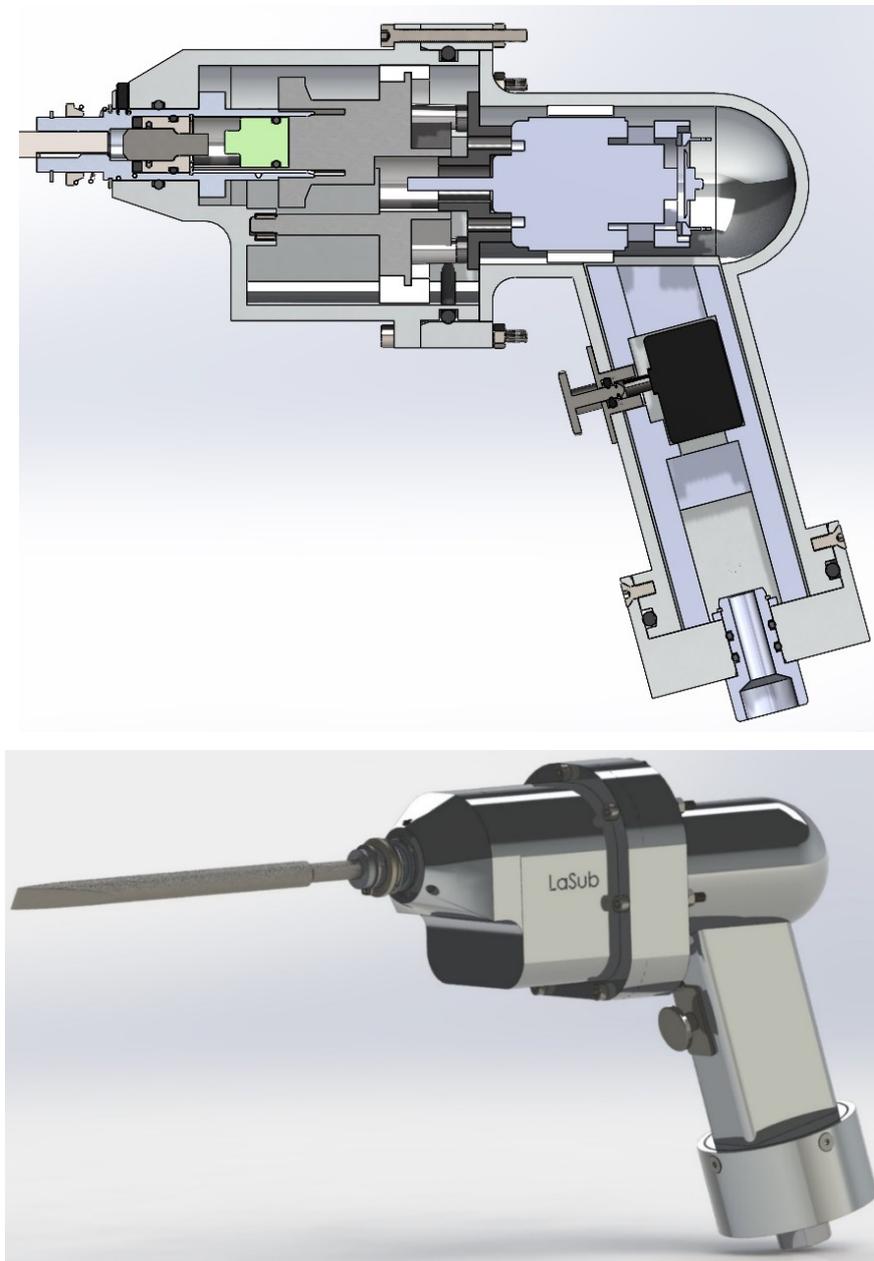
Fonte: a autora (2023).

A tampa da empunhadura foi repensada pois a vedação estava comprometida devido à geometria retangular na qual o O'ring não conseguia preencher a área do alojamento devido aos cantos retos. Adotou-se a solução de um conjunto composto por uma tampa com geometria circular e uma parafuso vazado internamente (7) para passagem da fiação do motor até a bateria (Figura 60). A tampa (Figura 60) é composta por um alojamento para O'ring (5), quatro parafusos de fixação da tampa à empunhadura (6) enquanto o parafuso vazado possui dois alojamentos para O'rings

(8), uma arruela (9) e um anel externo de retenção (10) para fixação do parafuso à tampa.

Ainda no que se refere ao sistema de acionamento (Figura 60), foi inserido um molde (11) em ABS para assegurar que o ESC (12) não admita deslocamento dentro da empunhadura quando acionado para que não haja comprometimento do curso de acionamento da ferramenta. A versão completa da versão 4 e seus componentes internos estão representados na Figura 61.

Figura 61 - Vista de corte e completa da modelagem do protótipo versão 4.



A escolha dos materiais para usinagem de cada componente (Tabela 17) consistiu na análise de exposição do componente ao ambiente externo, função que o componente exerce no sistema e peso que agregaria na ferramenta completa. O aço inox 304L foi designado para os componentes que estariam em contato direto com a água do mar e não admitiria que houvesse formação de óxido. As tampas foram usinadas em alumínio pois mesmo que estivessem em contato direto com o ambiente eram as geometrias com maior volume e a adoção da liga de alumínio 6351 T6 não traria prejuízo à função devido à formação de óxido e não agregaria tanto peso quanto o aço, enquanto o duplex F51 foi estudado para usinagem do pino impactador responsável pela transferência de energia de impacto para o cinzel (Tabela 17).

Tabela 17 - Componentes e materiais escolhidos para manufatura.

COMPONENTE	MATERIAL
Peça externa acionamento	aço inox 304L
Pino de acionamento	aço inox 304L
Empunhadura	alumínio 6351 T6
Alojamento do pino	aço inox 304L
Guarda mola	aço inox 304L
Pino impactador	aço duplex F51
Câmara de impacto	aço inox 304L
Tampa empunhadura	alumínio 6351 T6
Tampa frontal	alumínio 6351 T6
Parafuso vazado passagem fio	alumínio 6351 T6
Moldes	ABS

Fonte: a autora (2023).

A escolha do aço duplex para o pino impactador foi baseada na relação (Equação 3a) entre energia cinética do pino impactador (U_e) e a energia de deformação (U_i : aqui adotou-se o valor de IPM de 1,8 J) quando sujeito a carga axial constante (Equação 3b). Isolando o único valor desconhecido (N) na Equação 3b, será obtido o valor da carga axial constante (força que impacta) e a tensão portanto é obtida calculando a força (N) sobre a área do pistão de impacto. Por fim, a deformação elástica de um elemento sujeito à carga axial é obtida com a aplicação da Equação 3d.

Equação 3 – Equações utilizadas para cálculo de deformação e tensão do pino impactador.

$$U_e = U_i \quad (a)$$

$$U_i = \frac{N^2 L}{2AE}; \text{ portanto } N = \sqrt{\frac{U_i * 2AE}{L}} \quad (b)$$

$$\delta = \frac{PL}{AE} \quad (c)$$

Fonte: Hibbeler (2015).

Constatou-se que a deformação gerada pelo impacto no pino impactador reduz em 40,8% quando o pino impactador é usinado em aço (Tabela 18).

Tabela 18 – Resultados de deformação do pino impactador.

	Deformação [mm]	Tensão [MPa]
Alumínio	0,120	261,287
Aço	0,071	441,655

Fonte: a autora (2023).

Com o cálculo de tensão ao que pino impactador está submetido (Tabela 18), foi possível relacionar com a tensão de escoamento dos materiais (Tabela 19). O aço duplex apresenta um valor de tensão de escoamento muito superior ao aço inox 304, o que corrobora a escolha do material de fabricação para o pino impactador. Quando comparado ao alumínio além da tensão de escoamento superior, o aço duplex é mais adequado no que se refere à resistência à formação de camadas de óxidos, o que pode acarretar perda da função do pino impactador devido às pequenas tolerâncias na câmara de impacto.

Tabela 19 - Tensões de escoamento [MPa] de alguns materiais.

	Tensão escoamento [MPa]
Aço 304	245
Aço Duplex F51	450
Alumínio 6061 T6	276

Fonte: Callister (2016) e Dustre (2023).

Embora a tensão calculada esteja próxima à tensão de escoamento do aço 304, uma pequena deformação elástica com encruamento é aceita.

Após o recebimento das peças usinadas (Figura 62), foi constatado algumas discrepâncias da usinagem dos componentes em relação às dimensões solicitadas no projeto, principalmente em relação às dimensões dos alojamentos para os O-rings e dimensões muito internas na ferramenta que são difíceis de obter as medidas com o paquímetro para conferência.

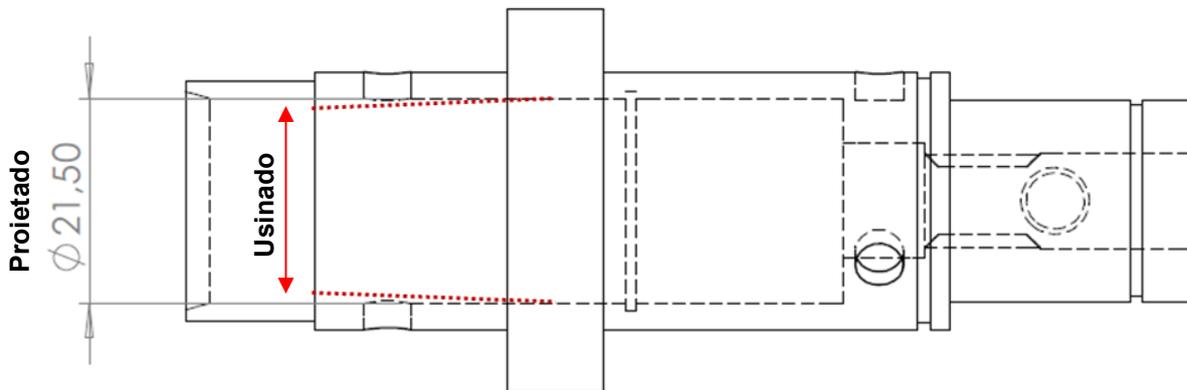
Figura 62 - Versão 4 usinada.



Fonte: a autora (2023).

O diâmetro interno da câmara de impacto por exemplo é difícil de conseguir a medição interna com o paquímetro em razão da profundidade e não foi possível concluir a montagem dos componentes internamente. Quando levados para ajuste, foi constatado que a parte mais profunda da câmara de impacto havia variação do diâmetro interno (Figura 63) impossibilitando a montagem das demais peças.

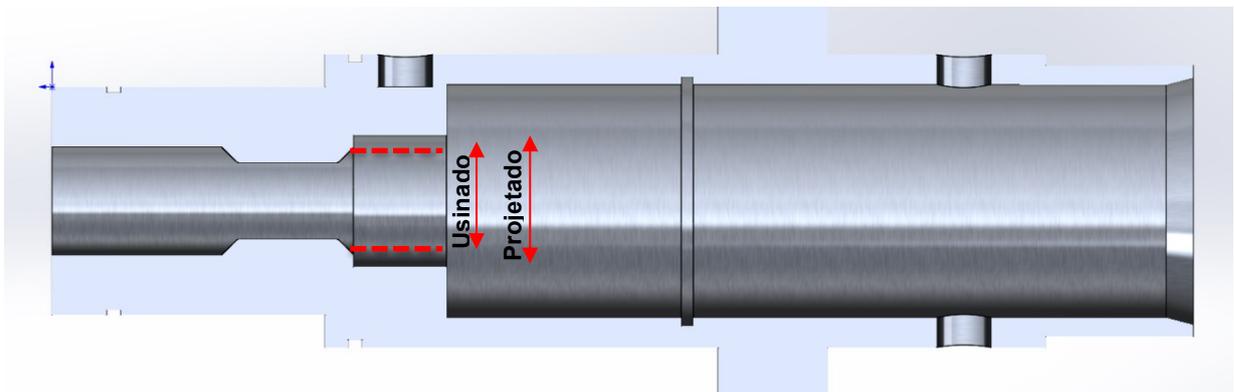
Figura 63 – Diâmetro irregular na câmara de impacto.



Fonte: a autora (2023).

Também foi constatado que o curso do pistão de impacto não estava sendo realizado de forma completa, ao realizar a medição dos componentes concluiu-se que o diâmetro interno onde o pistão de impacto encerra o curso (Figura 63) estava ligeiramente menor do que o solicitado em projeto (12 mm ao invés de 12,2 mm), necessitando assim de ajuste (Figura 64).

Figura 64 – Diâmetro irregular no fim do curso da câmara de impacto do pino impactador.



Fonte: a autora (2023).

Por fim, o projeto contemplava que a empunhadura fosse usinada em apenas um bloco, porém a fabricação foi realizada usinando a parte onde acomodava o motor e outra parte da empunhadura, sendo estas duas unidas com o processo de soldagem (Figura 65). Ainda que seja uma maneira de agilizar o processo de produção, a soldagem pode ser um ponto crítico de embarque de água na ferramenta pois não foi prevista no projeto.

Figura 65 – Soldagem realizada entre o corpo do motor e a empunhadura.



Fonte: a autora (2023).

Em relação à vedação, a montagem com os O’rings apresentou certa dificuldade principalmente em razão das diferenças dimensionais entre projetado e usinado. O espaço para extrusão (g) do O’ring calculado geralmente varia entre 0,10 e 0,15 mm e na prática a obtenção deste valor na usinagem não se mostrou efetivo.

Além disso, qualquer ranhura como os alojamentos para anel elástico ou os orifícios de saída e entrada e ar quando combinados na montagem com o O’ring apresentaram problemas, pois ao passar o O’ring por essas ranhuras, o O’ring sofrerá um tipo de falha e apresentará “mordidas” (Figura 66) conforme explorado no

APÊNDICE A. Portanto, será necessário a adoção de outra solução para substituição dos anéis de retenção quando estes forem combinados com O’rings.

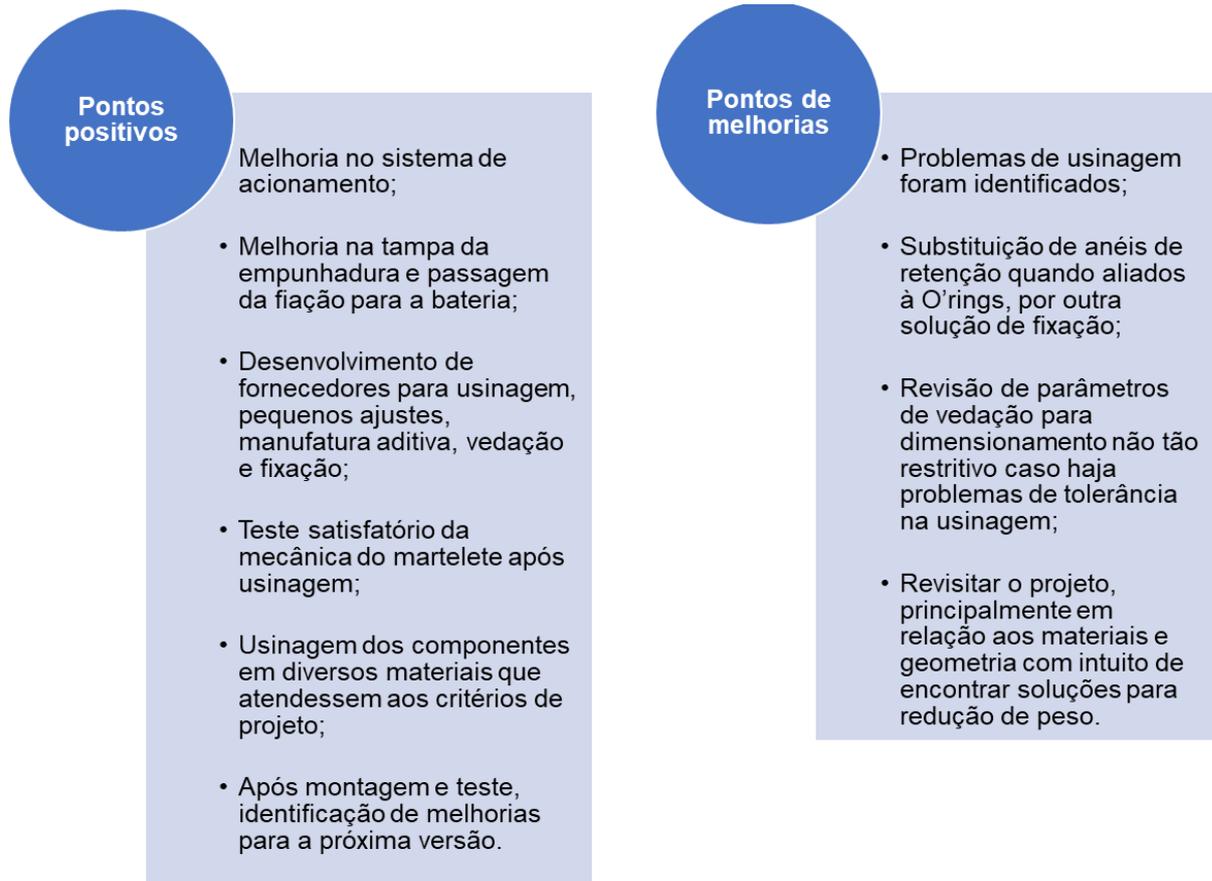
Figura 66 – Peças usinadas e detalhe para O’ring danificado.



Fonte: a autora (2023).

Após os ajustes, foi realizado o teste da versão 4 usinada em funcionamento sem a vedação completa e a mecânica, curso de impacto e demais sistemas funcionou de forma satisfatória. Além disso, foram identificados os pontos de melhorias e positivos (Figura 67) para a próxima iteração.

Figura 67 - Pontos positivos e de melhorias da versão 4 para a próxima iteração.



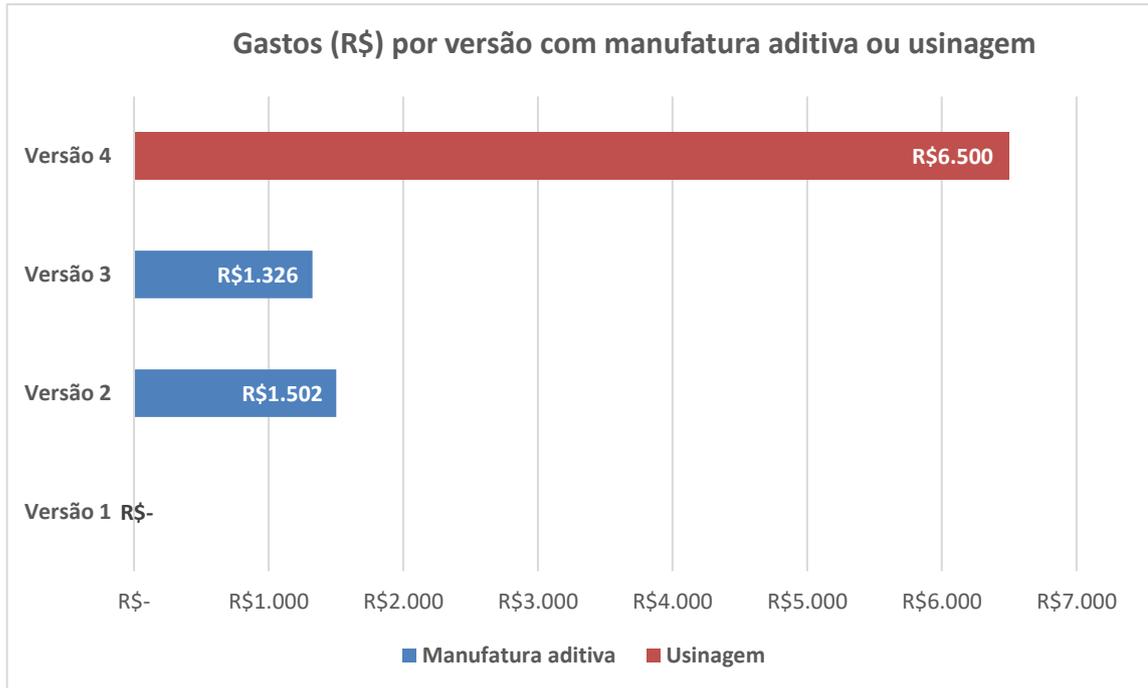
Fonte: a autora (2023).

4.2. DISCUSSÕES

Com a utilização da metodologia ágil foi possível amadurecer os protótipos a cada iteração, identificar rapidamente os pontos de melhorias e validar as soluções de modo que o projeto convergisse para se aproximar às necessidades do cliente por meio dos requisitos de projeto.

Em relação aos gastos, a utilização da manufatura aditiva para prototipagem rápida nas primeiras versões propiciou análises preliminares de geometria, funcionamento da mecânica e noções de dimensões após a alocação dos componentes. A redução dos gastos com manufatura aditiva da versão 2 para a versão 3 (Figura 68) demonstra a redução de volume interno que foi atingida e conseqüentemente menos quantidade de material a ser manufaturada.

Figura 68 – Gastos por versão com manufatura aditiva ou usinagem.



Fonte: a autora (2023).

A redução ou aumento do volume interno entre as versões (Tabela 20) apresenta de forma sucinta o esforço em reduzir espaços vazios na ferramenta. A versão 1 apresentou maior volume interno pois os componentes foram montados em um tubo de alumínio que mesmo com bom diâmetro interno, a seção contínua não permitia muitos ajustes internos. Na versão 2 houve redução de aproximadamente 7% principalmente pela opção em realizar a prototipagem rápida das tampas com manufatura aditiva, enquanto na versão 3 a redução foi consequência de arranjos internos e alterações de algumas dimensões em relação às tampas. O aumento de 23% na versão 4 faz referência principalmente às melhorias na tampa da empunhadura e passagem da fiação que conecta o motor à bateria.

Tabela 20 – Volume das versões de protótipos.

PROTÓTIPO	VOLUME [mm ³]	REDUÇÃO OU AUMENTO %
Versão 1	1601600,53	-
Versão 2	1484555,04	Redução de 7,31%
Versão 3	1111576,98	Redução de 25,12%
Versão 4	1371161,34	Aumento de 23,35%

Fonte: a autora (2023).

Os parâmetros de volume, componentes necessários para funcionamento e material para manufatura estão diretamente relacionados à massa final submersa (Tabela 21) que será obtida do marteleto.

Tabela 21 - Peso no ar e peso submerso da versão 4.

ITEM	VALOR	UNIDADE
Massa (m_{real})	4,22	[Kg]
Peso real no ar ($P_{ar} = m_{real} * g$)	41,40	[N]
Volume (V)	0,001371161	[m ³]
Densidade água mar (rhô)	1025	[kg/m ³]
Aceleração gravidade (g)	9,81	[m/s ²]
Empuxo ($E = V * rhô * g$)	13,79	[N]
Peso aparente submerso ($P_a = P_{ar} - E$)	27,61	[N]
Massa submersa ($m_{submersa} = P_a / g$)	2,81	[Kg]

Fonte: a autora (2023).

As necessidades do cliente e requisitos de projeto foram em todas iterações revisitados para que pudessem estar alinhados e estivessem em convergência com o que estava sendo desenvolvido. O protótipo versão 4 (Figura 69), resultado do amadurecimento, aprendizado e melhoria das outras iterações foi o que obteve maior convergência com os requisitos de projeto, visto que os tópicos que ainda devem ser revisitados dizem respeito da escolha do anel de retenção aliado ao O'ring e redução de massa, conforme indicado em amarelo na Tabela 22.

Tabela 22 – Protótipos obtidos *versus* requisitos de projetos.

REQUISITOS DE PROJETO	v1	v2	v3	v4
Energia de impacto: 1 – 3,5 J	✓	✓	✓	✓
Impactos por minuto: 800 – 1500 IPM	✓	✓	✓	✓
Potência [W]: 400-1200	✓	✓	✓	✓
Modelagem e acionamento simples.				✓
Alimentação à bateria	✓	✓	✓	✓
Vedação que garanta operação até 30m de profundidade.				●
Massa: 1 Kg (na água)				●
> 50 min de operação (tempo médio de um mergulho)				✓

Fonte: a autora (2023).

Figura 69 – Ferramenta usinada versão 4.



Fonte: a autora (2023).

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram desenvolvidas quatro versões de protótipos, sendo a última versão usinada e utilizada para teste em laboratório e validação da diversos conceitos adotados, como mecânica do martetele, vedação, uso de fixadores, solução para fiação e acionamento. O desenvolvimento de tal ferramenta visa o manejo adequado de coral-sol *Tubastraea coccinea*, principalmente em locais em que o controle com marreta e talhadeira se tornou ineficiente devido à proliferação da espécie invasora.

A tradução das necessidades em requisitos de projeto coma autilização da matriz QFD foi essencial para que o desenvolvimento das versões estivesse alinhado com a expectativa do cliente, ainda que houvesse reuniões periódicas de acompanhamento de projeto e resultado, a boa execução desta etapa e validação dos parâmetros com uso do martetele pneumático possibilitou uma boa guia para o projeto desde as fases iniciais.

A adoção da metodologia ágil, possibilitou que a cada iteração fosse realizado a análise, planejamento, construção, teste, revisão e obtenção de informações como dado de entrada para a nova iteração. As primeiras versões foram obtidas por meio da prototipagem rápida com manufatura aditiva e a versão 4 usinada em aço inox 304L, liga de alumínio 6351 T6 e aço duplex.

A usinagem apresentou alguns problemas em relação às tolerâncias e diâmetros de projetos solicitados, o que ocasionou problemas na montagem, vedação e desempenho da ferramenta. No que se refere as soluções propostas, foi identificado que deve-se substituir a arranjo anel de retenção aliado ao O'ring, pois a vedação é comprometida quando o O'ring passa pela ranhura do anel de retenção e sofre um tipo de falha, inviabilizando a vedação, além disso, é necessário visitar os parâmetros de dimensionamento dos alojamentos de O'ring e deixá-los menos restritivos pois foi verificado diferença dimensional das dimensões usinadas *versus* projetadas, o que dificulta a montagem com O'ring.

Os objetivos deste trabalho foram atingidos e abrangeram desde a revisão bibliográfica dos materiais disponíveis sobre desenvolvimento de ferramenta semelhante, desenvolvimento de quatro versões, teste em laboratório e informações de entrada para a nova versão do protótipo.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõe-se a adoção de parafusos não passante como alternativa ao anel de retenção, levantamento de opções de motor e sistemas de redução que alcancem torque e energia de impacto maior do que o utilizado hoje, adoção de bloco de engrenagens à 90° do motor para redução de volume da ferramenta e conseqüentemente redução de peso.

REFERÊNCIAS

- ABEL, L.; CAPEL, K. **Retirada de corais da costa brasileira: como isso pode ser bom para o ambiente marinho?**. CEBIMar USP. 2019. Disponível em: <http://noticias.cebimar.usp.br/pt/acervo-e-comunicacao/divulgacao-e-educacao-cientifica/artigos/1777-retirada-de-corais-da-costa-brasileira-como-isso-pode-ser-bom-para-o-ambiente-marinho>.
- AZLIN, M.N.M.; ILYAS, R.A.; ZUHRI, M.Y.M.; SAPUAN, S.M.; HARUSSANI, M.M.; SHARMA, S.; NORDIN, A.H.; NURAZZI, N.M.; AFIQAH, A.N. 3D Printing and Shaping Polymers, Composites, and Nanocomposites: A Review. **Polymers** **2022**, 14, 180. 2022. <https://doi.org/10.3390/polym14010180>.
- BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J.C. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Editora Manole. p. 648. 2008.
- BHAGIA, S.; BORNANI, K.; AGRAWAL, R.; SATLEWAL, A.; DURKOVIC, J.; LAGANA, R.; BHAGIA, M.; YOO, C.G.; ZHAO, X.H.; KUNC, V.; et al. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites filled with biomass resources, characterization, biodegradability, upcycling and opportunities for biorefineries. *Applied Materials Today*, v. 24, p. 101078, 1 set. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101078>.
- BOURROUL, J. M. O invasor: como o coral-sol está acabando com a biodiversidade. **Revista Galileu**. Set. 2016. Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Revista/noticia/2016/09/o-invasor-como-o-coral-sol-esta-acabando-com-biodiversidade.html>.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). **Plano nacional de prevenção, controle e monitoramento do coral-sol (*Tubastraea spp.*) no Brasil**. 2018. Disponível em: <https://www.icmbio.gov.br/esepectamoios/images/stories/2019-08-02-Plano-Nacional-de-Prevencao-Control-e-Monitoramento-do-Coral-sol-Tubastraea-spp-no-Brasil.pdf>.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Guia técnico de prevenção de invasão biológica associada a atividades de empreendimentos licenciáveis em unidades de conservação federais**. Brasília - DF, 2022. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cbc/images/stories/Pub_GuiaTecPrev_ICMBio_v7_29Abr22_FINAL_WEB_GovernoFederal-compactado.pdf.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Manejo do coral-sol é realizado na Rebio Marinha do Arvoredo**. 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/icmbio/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/manejo-do-coral-sol-e-realizado-na-rebio-marinha-do-arvoredo>.
- CAETANO, Mário J. L. 2010 - 2022. **CTB**. Definição dos requisitos físicos, químicos e mecânicos. Disponível em: <https://www.ctborracha.com/artefactos/concepcao-e->

projecto-de-artefactos-de-borracha/definicao-dos-requisitos-fisicos-quimicos-e-mecanicos/.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CASTRO, B. Expedição retira coral-sol de navios naufragados no litoral pernambucano devido a ameaças à biodiversidade do oceano. **G1 Pernambuco**. 2021. Disponível em:

<https://g1.globo.com/pe/pernambuco/noticia/2021/06/22/expedicao-retira-coral-sol-de-navios-naufragados-no-litoral-de-pe-devido-a-ameaca-a-biodiversidade-do-oceano.ghtml>.

CASTRO, C.; PIRES, D. Brazilian coral reefs: What we already know and what is still missing. **Bulletin of Marine Science**. v. 69, p. 357-371, 2001. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/contentone/umrsmas/bullmar/2001/00000069/00000002/art00013#expand/collapse>.

COHEN, D.; LINDVALL, M.; COSTA, P. An Introduction to Agile Methods. **Advances in Computers**, v. 62, p. 1–66, 2004.

COHN, M. **Agile estimating and planning**. Upper Saddle River, Nj Prentice Hall Ptr, 2006.

CREED, J.C.; FENNER, D.; SAMMARCO, P; et al. The invasion of the azooxanthellate coral *Tubastraea* (Scleractinia: Dendrophylliidae) throughout the world: history, pathways and vectors. **Biological Invasions**. v. 19, 283–305. 2017. <https://doi.org/10.1007/s10530-016-1279-y>.

CRIVELLARO, M.S.; SILVEIRA, T.C.L.; CUSTÓDIO, F.Y; BATTAGLIN, L.; DECHOUM, M. S.; FONSECA, A.C; SEGAL, B. Fighting on the edge: reproductive effort and population structure of the invasive coral *Tubastraea coccinea* in its southern Atlantic limit of distribution following control activities. **Biol Invasions** **23**, 811–823. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10530-020-02403-5>

CRIVELLARO, M. S. **Vídeo de operação do martetele pneumático para remoção de coral-sol**. Audiovisual. 2023.

DIDIER, W. R. **Development and validation of a mathematical model for predicting the performance of rotary hammer drills**. 2013. Master's Thesis (Master of Science in Engineering) - University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, WI, USA, 2013. Disponível em: <https://dc.uwm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1091&context=etd>.

DUSTRE. F51 | AÇO DUPLEX 2205/ S31803 | ASTM A182 F51 UNS S31803. 2023. Disponível em: <https://dustre.com.br/produtos-ligas-especiais/duplex-2205-f51/>.

FASTWELL. Special steel. 2023. Disponível em: <https://www.fastwell.in/duplex-steel.html>.

FERRAMENTAS Kennedy. **Kit marreta 1kg e talhadeira 12 Tramontina 43408155**. Disponível em: <<https://www.ferramentaskennedy.com.br/100007663/kit-marreta-1kg-e-talhadeira-12-tramontina-43408155>>. 2023.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Blucher, 1970.

FLITNEY, R. K. **Seals and Sealing Handbook**. Elsevier, 6 ed. 2014.

GENG, H. **Manufacturing Engineering Handbook**. McGraw Hill Professional, 2004.

GUPTA, H. N.; GUPTA, R. C.; MITTAL, A. **Manufacturing process**. New age international. 2009.

GLOBAL SEALS. Parker Prädifa V1 O-Rings. 2023. Disponível em: <https://www.global-seals.com/product/parker-o-rings>.

GODDARD, W. **Ágil Methodology: What It Means**. 2021. Disponível em: <https://itchronicles.com/ágil/ágil-methodology-what-it-means/>.

GOMES, A.N.; BARROS, G.M.; POMPEI, C. Monitoramento extensivo e manejo do coral-sol Tubastraea spp. (Cnidaria, Anthozoa) na estação ecológica de Tamoios, RJ, Brasil. **Anais do VIII Congresso Brasileiro de Unidade de Conservação**. p.1-7, 2015. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/eseectamoios/images/stories/TrabalhosTecnicos_VIII_CBU_C.pdf.

GOODPASTURE, John C. **Project management the ágil way: making it work in the enterprise**. 2ª ed. 2016.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de física, volume 1: mecânica**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos materiais**. 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2015.

ISO 3601-1:2016, **Fluid power systems – O-rings**. Part 1: Inside diameters, cross-sections, tolerances and designation codes. Part 2: Housing dimensions for general applications. Part 3: Quality acceptance criteria. Part 4: Anti-extrusion rings (back-up rings). Part 5: Suitability of elastomeric materials for industrial applications. 2016.

ISO 3601-2:2016, **Fluid power systems – O-rings**. Part 2: Housing dimensions for general applications. 2016. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/>.

JIMÉNEZ, A.; BIDARE, P.; HASSANIN, H.; TARLOCHAN, F.; DIMOV, S.; ESSA, K. Powder-based laser hybrid additive manufacturing of metals: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 114. 1-34. 2021. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-06855-4>.

JUNIOR, J. P. V. A.; NEGREIROS, N.; SEMPREBOM, T.R.; SILVEIRA, R.A.D.; PEIRÓ, D.F. **O coral-sol: um astro invasor**. Fev. 2022. Disponível em: <https://www.bioicos.org.br/post/o-coral-sol-um-astro-invasor>.

KAHAR, Sunil. Duplex Stainless Steels-An overview. **International Journal of Engineering Research and Applications**. v. 07. p. 27-36. 2017. 10.9790/9622-0704042736.

KHAN, S.; JOSHI, K.; DESHMUKH, S. A comprehensive review on effect of printing parameters on mechanical properties of FDM printed parts. **Materials Today: Proceedings**, v. 50, Part 5, p. 2119-2127. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.433>.

LAYTON, M. C.; OSTERMILLER, S. J.; KYNASTON, D. J. **Ágil project management for dummies**. John Wiley & Sons, 3rd ed. 2020.

LÍDICE, Sarah. AUN – Agência universitária de notícias. **Nova doença descrita em coral invasor pode ser vislumbre de esperança para conter seu alastramento, indica estudo**. 2021. Disponível em:
<https://aun.webhostusp.sti.usp.br/index.php/2021/07/08/nova-doenca-descrita-em-coral-invasor-pode-ser-vislumbre-de-esperanca-para-conter-seu-alastramento-indica-estudo/>.

LINDNER, A. *et al.* A biodiversidade marinha das ilhas da Rebio Arvoredo e entorno. LINDNER, A. *et al.* In: **MAArE Monitoramento ambiental da reserva biológica marinha do arvoredo e entorno**. Florianópolis: UFSC/MAArE, 2017. p. 201-258. Disponível em: <https://www.maare.ufsc.br/realizacoes/#o-livro>.

LOUREIRO, J. P. **Caracterização do aço inoxidável duplex UNS S31803 pela técnica não destrutiva de correntes parasitas pulsadas**. Trabalho de conclusão de graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/7910>.

MACHADO, A. R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A.M.; DA SILVA, M.B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher. 2009.

MANGELLI, T. S.; CREED, J. C. Análise comparativa da abundância do coral invasor *Tubastraea* spp: (Cnidaria, Anthozoa) em substratos naturais e artificiais na Ilha Grande, Rio de Janeiro, Brasil. **Iheringia. Série Zoologia**, v. 102, n. 2, p. 122–130. 2012. <https://doi.org/10.1590/S0073-47212012000200002>.

Manufacturing Guide Stockholm. **Fused Deposition Modeling, FDM**. 2023. Disponível em: <<https://www.manufacturingguide.com/en/fused-deposition-modeling-fdm>>.

MASSARI, C. **Talhadeira: conheça o melhor modelo**. REVIEWBOX. Jun, 2020. Disponível em: <https://www.reviewbox.com.br/talhadeira-melhores-modelos/>.

MILLER, Dan. Fine Power tools. **Air Hammer vs. Rotary Hammer**. 2021. Disponível em: <https://www.finepowertools.com/air/air-hammer-vs-rotary-hammer/>.

NADALETO, M. **Mergulhadores correm contra o tempo para destruir corais invasores que ameaçam o litoral de SP**. 2020. G1 Santos. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2020/09/21/mergulhadores-correm-contra-o-tempo-para-destruir-corais-invasores-que-ameacam-o-litoral-de-sp.ghtml>.

NeDIP UFSC. **Modelo PRODIP**. <https://nedip.ufsc.br/sessao/modelo-prodip-1>. 2023.

NEMO Power tools. Nemo SDS Rotary Hammer – 50M. 2023. Disponível em: <https://nemopowertools.com/product/nemo-sds-rotary-hammer/>.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**. 8ª ed. Editora Pearson, São Paulo, 2009.

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

OIGMAN-PSZCZOL, S.; CREED, J.; FLEURY, B.; MANTELATTO, M.C.; CAPEL, K.C.C.; MEIRELES, C.; CABRAL, D.; MASI, B.; JUNQUEIRA, A. O controle da invasão do coral-sol no Brasil não é uma causa perdida. **Cienc. Cult.**, São Paulo, v. 69, n. 1, p. 56-59. 2017. <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602017000100019>.

PARKER SEALS. **Manual de O'Ring**. 1997. Disponível em: https://www.parker.com/parkerimages/br/download/seal/pdf/5700_br.pdf.

PARKER. **Parker O-ring handbook**. 2007. Disponível em: https://www.parker.com/literature/O-Ring%20Division%20Literature/ORD%205700%20Parker_O-Ring_Handbook.pdf.

PESSÔA, M.V.P.; TRABASSO, L.G. **The product development system. In: the lean product design and development journey**. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46792-4_1.

RODRIGUES, R. **O que é um martelo pneumático?** Engiobra. 2022. Disponível em: <https://engiobra.com/martelo-pneumatico/>.

ROY, R.; MUKHOPADHYAY, A. Tribological studies of 3D printed ABS and PLA plastic parts. **Materials Today: Proceedings**, v. 41, p. 856-862, 2021. *Advancements and Futuristic Trends in Mechanical and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.235>.

SATPATHY, T. **A Guide to the SCRUM BODY OF KNOWLEDGE (SBOK™ GUIDE)**. Avondale. 3 ed. 2017.

SCALERCIO, E.; SANGIOVANNI, F.; GALLO, A.; BARBIERI, L. Underwater Power Tools for In Situ Preservation, Cleaning and Consolidation of Submerged Archaeological Remains. **Journal of Marine Science and Engineering**. 2021. <https://doi.org/10.3390/jmse9060676>

SCHEY, J. A. **Introduction to Manufacturing Processes**. New York, Montréal: McGraw-Hill, 1987.

SELVAMANI, S. K.; NGUI, W. K.; RAJAN, K.; SAMYKANO, M.; KUMAR, R.; BADADHE, A. M. Investigation of bending and compression properties on PLA-brass composite using FDM. **Physics and chemistry of the earth, Parts A/B/C**, 128, 103251. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103251>.

SEROPE, K.; SCHMID, S. R. **Manufacturing engineering and technology: sixth edition in Si units**. Singapore Prentice Hall, 2010.

SOUZA, Alessandra Cavalcanti de Albuquerque e. **Avaliação dos dispositivos destinados ao uso de sustentação e movimentação de membros superiores e proposta da melhoria do projeto baseada na integração QFD e Análise Funcional**. 2016. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação Interunidades em Bioengenharia, Escola de Engenharia de São Carlos, Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/82/82131/tde-03052019-175118/publico/Tese_Souza_AlessandraCA_corrigeida.pdf.

SPADAFORA, F; GALATI, D.; GALLO, A.; BRUNO, F.; MUZZUPAPPA, M. Design and Construction of an Electric Chisel for Underwater Applications. **Dyna ingenieria e industria**. 2015. Disponível em: <https://www.revistadyna.com/search/design-and-construction-of-an-electric-chisel-for-underwater-applications>.

TAMESON. **Electric and air hammer with chisels**. 2023. Disponível em: <https://tameson.com/pages/electric-air-chisel>.

TAMOIOS News. **CORAL-SOL: ICMBio retira mais de 2,5 mil quilos desde o início de 2022**. 2022. Disponível em: <https://tamoiosnews.com.br/noticias/cidades/coral-sol-icmbio-retira-mais-de-25-mil-quilos-desde-o-inicio-de-2022/>.

TRELLEBORG. **O-Ring Calculator**. 2023. Disponível em: <https://www.trelleborg.com/en/seals/resources/design-support-and-engineering-tools/o-ring-calculator>.

TRELLEBORG. **O-rings and back-up rings**. 2022. Disponível em: https://www.trelleborg.com/-/media/tss-media-repository/tss_website/pdf-and-other-literature/catalogs/o_ring_gb_en.pdf.

TRELLEBORG. **The pros and cons of FKM (Viton®) Hydraulic Seals**. 2019. <https://www.seals-shop.com/eu/en/viton-fkm-seals-characteristics>.

ULLMAN, D. **The mechanical design process**. McGraw-Hill Science, Engineering & Mathematics, 2010.

VONDER. **Manual de instrução - martetele perfurador/rompedor**. 2023a. Disponível em: <https://www.vonder.com.br/estatico/vonder/documentos/6004181500/Manual%20de%20Instruções.pdf>.

VONDER. **Manual de instruções microrretífica**. 2023b. Disponível em: https://www.vonder.com.br/produto/microrretifica_127_v_arv_175_com_acessorios_vonder/910.

WEEKS, A. About air compressors. **Air hammers explained – what are they, how do they work, what are they used for & buying guide**. 2022. Disponível em: <https://www.about-air-compressors.com/air-hammers/>.

WILLIAMS, L. Ágil Software Development Methodologies and Practices. **Advances in Computers**, v. 80, p. 1–44, 2010.

YAN, S.; HUANG, S.; ZOU, F. Analysis of the dynamic characteristics of gas chamber in rotary hammer. **Journal of advanced mechanical design, systems and manufacturing**. v. 10. 2016. Disponível em: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jamdsm/10/4/10_2016jamdsm0066/_pdf.

APÊNDICE A

<i>WHAT</i>	<i>WHY</i>	<i>WHEN</i>	<i>HOW</i>	<i>WHERE</i>	<i>WHO</i>
TIPO DE FALHA	DESCRIÇÃO / POR QUE	QUANDO OCORRE	COMO EVITAR	ONDE OCORRE	QUEM SOFRE
Extrusão	Quando submetido a altas pressões, uma grande quantidade de material é forçada a entrar na folga do alojamento, o que pode levar a danos no componente. Isso ocorre porque, ao ser pressurizado, o O'ring atua como um fluido incompressível e exerce uma pressão sobre o alojamento que, quando excessiva, pode causar a entrada de material indesejado na folga e, afetar o desempenho da vedação.	<ul style="list-style-type: none"> • Alta pressão; • Shore A do O'ring baixo; • Variações físicas ou químicas que debilitam o O'ring; • Excentricidade; • Cantos vivos nos alojamentos; • Dimensões do O'ring não apropriadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tolerâncias mais justas; • aumentar a dureza do O'ring; • analisar compatibilidade do fluido; • evitar a excentricidade; • manter os raios de cantos do alojamento conforme recomendação. 	Alojamento do O'ring	O'ring
Deformação permanente	Perda total ou parcial da memória elástica de um elastômero através da perda de ligações transversais entre as cadeias moleculares, ou como: o surgimento de novas ligações (formadas por incidência de alta temperatura).	<ul style="list-style-type: none"> • O composto do O'ring tem uma deformação permanente muito pobre; • Alojamento com dimensões incorretas; • Altas temperaturas de trabalho. 	<ul style="list-style-type: none"> • Seleção de um elastômero compatível com as condições de trabalho; • reduzir a temperatura do sistema; • redimensionar o alojamento. 	Alojamento do O'ring	O'ring
O'ring retorcido ou falha espiral	<ul style="list-style-type: none"> • Em aplicações dinâmicas, o enrolamento do O'ring é produzido devido a deformação variável da seção transversal (excentricidade), ou quando o filme de lubrificação se rompe; • Em aplicações estáticas, o O'ring se retorce durante a montagem. A causa principal é uma relação inadequada entre diâmetros internos grandes e seções transversais de diâmetros muito pequenos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Peças excêntricas; • Folgas grandes; • Acabamento superficial inadequado; • Lubrificação pobre ou inexistente; • Material do O'ring com Shore A baixo; • O'ring enrolado no ato da montagem. 	<ul style="list-style-type: none"> • Evitar excentricidade; • Melhorando o acabamento superficial. • Utilizando um O'ring mais "duro". • Melhorando a lubrificação (lubrificação interna ou canais de lubrificação). • Reduzindo a deformação da seção transversal. • Selecionando um vedante com outro perfil. 	Alojamento do O'ring	O'ring

Descompressão explosiva	Sob altas pressões os gases se difundem em todos os elastômeros, formando “bolhas” microscópicas entre as cadeias moleculares. Ao descomprimir-se rapidamente o gás, as “bolhas” se expandem rompendo o composto internamente e explodindo ocasionalmente na superfície do O’ring.	Sob altas pressões.	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentando o tempo de descompressão; • projetar a aplicação utilizando um O’ring menor, de tal forma que o mesmo absorva menor quantidade de gás e que a ocupação do alojamento também seja menor permitindo maior expansão do O’ring; • selecionar um material mais resistente para o O’ring. 	Alojamento do O’ring	O’ring
Abrasão (desgaste)	Este tipo de falha deve se ter em conta que o atrito é proporcional à deformação, e que a pressão aplicada e o desgaste são proporcionais ao atrito, além de que o incremento da temperatura também é proporcional ao atrito.	<ul style="list-style-type: none"> • Acabamento superficial inadequado; • Lubrificação pobre; • Incidência de alta temperatura; • Presença de impurezas no fluido do sistema; • Pressão alta e/ou pulsante em aplicações estáticas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Acabamento superficial correto. • selecionar um processo de usinagem melhorado; • trocar o fluido do sistema para um mais adequado; • selecionar um composto com maior resistência à abrasão. 	Alojamento do O’ring	O’ring
Montagem inadequada	Falhas na fase da montagem.	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de um O’ring subdimensionado; • O’ring retorcido ou “mordido”; • Montagem sem dispositivos adequados. • Montagem sem lubrificação; • Montagem sem as devidas condições de limpeza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminar os cantos vivos do alojamento; • chanfrando as bordas dos furos e eixos da montagem com ângulos entre 15° e 20°; • garantir a devida limpeza das peças e dispositivos; • confirmar o tamanho do O’ring antes do mesmo ser instalado. 	Alojamento do O’ring	O’ring

Fonte: adaptado de Parker (1997).