



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

HENRIQUE SANTOS LIGEIRO

**REPAROS DE LINHAS PRESSURIZADAS COM
MANUFATURA ADITIVA:
QUALIFICAÇÃO, INTEGRIDADE, DURABILIDADE E
SEGURANÇA**

Belo Horizonte
2023

Henrique Santos Ligeiro

**Reparos de linhas pressurizadas com manufatura aditiva:
qualificação, integridade, durabilidade e segurança**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Artur Caron Mottin

Linha de Pesquisa: Eficiência em Sistemas e Processos
Mecânicos

Belo Horizonte
2023

L723r Ligeiro, Henrique Santos
Reparos de linhas pressurizadas com manufatura aditiva: qualificação, integridade, durabilidade e segurança / Henrique Santos Ligeiro. – 2023.
75 f. : il., gráfs., tabs., fotos.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
Orientador: Artur Caron Mottin.
Banca examinadora: Artur Caron Mottin, Caroline Salvan Pagnan, Cristina Almeida Magalhães.
Bibliografia: f. 67-71.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

1. Imagem tridimensional – Teses. 2. Polimerização – Teses. 3. Polímeros – Degradação – Teses. 4. Fotoquímica – Teses. 5. Tubulação – Teses. 6. Indústria offshore de petróleo – Teses. I. Mottin, Artur Caron. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título.

CDD 620.1

HENRIQUE SANTOS LIGEIRO

**REPAROS DE LINHAS PRESSURIZADAS COM MANUFATURA ADITIVA:
QUALIFICAÇÃO, INTEGRIDADE, DURABILIDADE E SEGURANÇA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para a
obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Linha de Pesquisa: Eficiência em Sistemas e Processos
Mecânicos

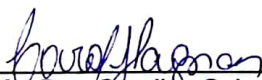
Belo Horizonte, 31 / 05 / 2023

Resultado: **APROVADO**

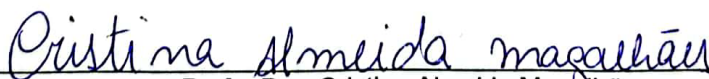
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Artur Caron Mottin
PPGEM / CEFET-MG



Profa. Dra. Caroline Salvan Pagnan
PPGD / UEMG



Profa. Dra. Cristina Almeida Magalhães
PPGEM / CEFET-MG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que acreditaram na ciência durante a pandemia de covid-19 e que, apesar da grande onda de desinformações e pressões políticas, seguiram as recomendações da Organização Mundial de Saúde.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a todos os professores do fundamental, médio, graduação e pós-graduação que, durante toda vida escolar e acadêmica, depositaram uma parcela de seu conhecimento no profissional que me transformei. Em especial ao meu orientador, Dr. Artur Caron Mottin, pela paciência e dedicação durante a execução desse trabalho.

Agradeço a meus familiares pelo apoio, em especial Tyanne Santos Ligeiro, Joaquim Santos Ligeiro e Maria de Fátima dos Santos Ligeiro.

Além disso, agradeço aos colaboradores do laboratório de adesão e aderência da UERJ – Campus Nova Friburgo, em especial ao professor Ney Robson Rohem, cujo apoio foi importante para realização dos ensaios de pressão.

E por último e mais importante, agradeço a Deus por ter me dado forças para ter chegado até aqui.

RESUMO

A continuidade da demanda por petróleo no cenário mundial, a médio prazo, implica na perseverança da indústria petrolífera no Brasil, bem como estimula a criação de novas tecnologias para a manutenção das plantas de processamento *offshore* (afastado da costa). Com intuito de diminuir a presença de fontes de ignição em plantas de hidrocarboneto, pesquisadores vêm desenvolvendo alternativas para os reparos soldados com bandagens compostas de material compósito e polimérico. Apesar das inúmeras pesquisas, poucos estudos são dedicados à aplicação de resinas de manufatura aditiva para fabricação de componentes pressurizados. A impressão 3D de um reparo qualificado ou de um trecho de tubulação, durante a manutenção corretiva de uma plataforma de petróleo, é algo que pode solucionar os problemas de logística típicos do ambiente *offshore*. Desse modo, este trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade técnica da execução de reparos emergenciais de elementos pressurizados com manufatura aditiva por fotopolimerização. Os resultados do trabalho demonstram que, apesar de estar sujeito à interação com o fluido de processo e com o ambiente, o material se mostrou promissor para aplicações em reparos em linhas de baixo risco operacional de até 90 dias.

Palavras-chave: impressão 3D, fotopolimerização, fotodegradação, tubulações *offshore*.

ABSTRACT

PRESSURIZED LINES REPAIRS BY ADDITIVE MANUFACTURING: QUALIFICATION, INTEGRITY, DURABILITY, AND SAFETY

The petroleum demand continuity in the world scenario in the medium term implies the perseverance of the oil industry in Brazil, as well as stimulating new technologies created for the maintenance of offshore processing plants. Researchers have been developing alternatives to welded repairs to reduce ignition sources in hydrocarbon plants. Despite the numerous kinds of research, few studies are dedicated to polymeric additive manufacturing applications on pressurized components. The qualified 3D-printed repair of a section of the pipeline during the corrective maintenance of a petroleum platform can solve the logistical problems typical of the offshore environment. The research objective was to analyze the technical feasibility of emergency repairs of pressurized elements with photopolymerization additive manufacturing. The results demonstrate despite being subject to interaction with the process fluid and the environment, the material has shown promise for applications in repairs in low operational risk applications up to 90 days.

Keywords: 3d printing, photopolymerization, photodegradation, Offshore pipes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Triângulo do fogo.	14
Figura 2 - a) bandagem de material compósito; b) abraçadeira mecânica de material compósito.	14
Figura 3 - FPSO P-77 a caminho da sua localização final.	18
Figura 4 - a) croqui esquemático de uma chapa sobreposta; b) croqui esquemático de uma dupla calha soldada.	25
Figura 5 - Aplicação de nanocompósitos de base cerâmica.	26
Figura 6 - Desenho esquemático de uma impressora DLP.	28
Figura 7 - a) ensaio de tração, gráfico de tensão e deformação de resinas; b) ensaio de compressão, gráfico de tensão e deformação de resinas.	29
Figura 8 - Diferença entre os módulos de falha entre corpos de prova.	30
Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra após exposição a UV e ciclos de condensação de água: a) referência; b) 1000 h; c) 3000h.	32
Figura 10 - Micrografias de resinas epóxi (antes e depois de ataque químico).	33
Figura 11 - Fluxograma das etapas propostas para o trabalho.	34
Figura 12 - Direção de impressão dos corpos de prova.	36
Figura 13 - Croqui do corpo de prova conforme ISO 527: tipo 5B.	37
Figura 14 - Protótipo do vaso de pressão: (a) vista geral; (b) vista seccional.	40
Figura 15 - Protótipo da clamp.	42
Figura 16 - Aspecto visual dos corpos de prova após imersão em petróleo cru.	45
Figura 17 – Gráfico de limite de resistência após inserção em óleo bruto.	48
Figura 18 - Aspecto visual dos corpos de prova após imersão na atmosfera marinha.	49
Figura 19 – Gráfico de limite de resistência após inserção em atmosfera marinha.	53
Figura 20 - Ensaio FTIR normalizado: (a) absorbância; (b) transmitância das amostras sem ataque, 90 dias em óleo e 90 dias em atmosfera salina.	54
Figura 21 - Ensaio espectroscopia UV-VIS de absorbância normalizado das amostras sem ataque, 90 dias em óleo e 90 dias em atmosfera salina	55
Figura 22 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra após exposição a UV e atmosfera marinha: a) referência; b) 90 dias de exposição.	56
Figura 23 – Protótipos manufaturados.	58
Figura 24 - Gráfico de pressão de ruptura x espessura mínima.	60
Figura 25 - Simulação do clamp: (a) vista externa; (b) vista interna.	61
Figura 26 - Simulação do clamp, detalhe de pontos de concentração de tensão	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Diâmetros nominais, pressões e temperaturas de operação de tubulações de processo offshore.	19
Tabela 2 - Materiais empregados em tubulações offshore.	20
Tabela 3 – Identificação das resinas comerciais.	29
Tabela 4 – Identificação das resinas comerciais.	35
Tabela 5 – Identificação quantitativo dos corpos de prova.	36
Tabela 6 – Distribuição quantitativo dos corpos de prova.	38
Tabela 7 - Propriedades mecânicas resinas em diferentes posições de impressão.	43
Tabela 8 - Propriedades mecânicas da resina Anycubic Basic após ataque químico em óleo.	45
Tabela 9 - Propriedades mecânicas da resina Anycubic Standard + após ataque químico em óleo.	46
Tabela 10 - Propriedades mecânicas da resina 3DLab Pro Alta Performance após ataque químico em óleo.	47
Tabela 11 - Propriedades mecânicas da resina Esun Hard Tough após ataque químico em óleo.	47
Tabela 12 - Propriedades mecânicas da resina Esun Precision Model após ataque químico em óleo.	48
Tabela 13 - Propriedades mecânicas da resina Anycubic Basic após inserção em atmosfera marinha.	50
Tabela 14 - Propriedades mecânicas da resina Anycubic Standard + após inserção em atmosfera marinha.	50
Tabela 15 - Propriedades mecânicas da resina 3DLab Pro Alta Performance após inserção em atmosfera marinha.	51
Tabela 16 - Propriedades mecânicas da resina Esun Hard Tough após inserção em atmosfera marinha.	52
Tabela 17 - Propriedades mecânicas da resina Esun Precision Model após inserção em atmosfera marinha.	52
Tabela 18 - Resultados do teste de rugosidade.	57
Tabela 19 - Resultados do teste hidrostático: pressões reais e teóricas.	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ANP	Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
Desv.	Desvio
DLP	Processamento Digital de Luz
FPSO	Unidade Flutuante de Armazenamento e Transferência de Petróleo e Gás Natural
FTIR	Infravermelho por Transformada de Fourier
ISO	Organização Internacional de Normatização
LED	Diodo Emissor de Luz
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
min.	Minutos
mm.	Milímetros
NPT	National Pipe Thread
NR	Norma Regulamentadora
Padr.	Padrão
PCC	Press Complaints Commission
PRFV	Polímero Reforçado com Fibra de Vidro
SciELO	Scientific Electronic Library Online
SLA	Estereolitografia
TS	Technical Specification
UV	Ultravioleta
UV-VIS	Ultravioleta Visível

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Justificativa.....	15
1.2 Objetivos	15
1.2.1 Objetivo geral.....	15
1.2.2 Objetivos específicos	16
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1 Plantas de processamento primário	17
2.2 Equipamentos e tubulações	20
2.3 Projeto mecânico de tubulações industriais.....	21
2.4 Mecanismos de dano em tubulações industriais.....	23
2.5 Reparos em tubulações industriais.....	23
2.6 Manufatura aditiva.....	26
2.6.1 Manufatura aditiva por fotopolimerização	27
2.7 Mecanismos de degradação em polímeros	30
2.7.1 Fotodegradação.....	31
2.7.2 Degradação química	32
3 MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Aferição das propriedades mecânicas em diferentes posições de impressão	35
3.2 Aferição das propriedades mecânicas após ataque químico	37
3.3 Ensaio complementares para melhor entendimento dos mecanismos de dano	38
3.3.1 Microscopia eletrônica de varredura	38
3.3.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier	39
3.3.3 Espectrofotometria no ultravioleta visível	39
3.3.4 Rugosidade superficial.....	39
3.4 Impressão de um vaso de pressão em escala reduzida	40
3.5 Proposição, projeto e simulação reparo tipo luva	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	43

4.1 Aferição das propriedades mecânicas em diferentes posições de impressão	43
4.2 Aferição das propriedades mecânicas após ataque químico	44
4.2.1 Imersão em óleo	44
4.2.2 Imersão na atmosfera marinha	49
4.3 Aferição das propriedades físico-químicas após ataque químico	53
4.4 Impressão de um vaso de pressão em escala reduzida	58
4.5 Proposição, projeto e simulação de reparo tipo luva	60
5 CONCLUSÃO	63
6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	65

1 INTRODUÇÃO

A iniciativa global pelo aprimoramento das tecnologias de energias renováveis e as projeções de longo prazo da International Energy Agency apontam a redução dos combustíveis fósseis na matriz energética mundial. Apesar disso, a maioria das previsões apontam que a demanda mundial por petróleo e gás natural não deve sofrer redução significativa em um intervalo de 20 anos (NEWELL *et al.*, 2021).

Com a continuidade da indústria, se faz necessária a manutenção e integridade das unidades flutuantes de produção de petróleo, dado que, segundo a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (2021), 93,67% da produção de hidrocarbonetos no território brasileiro se dá no ambiente *offshore*. Nesse ambiente, as tubulações de plantas de processamento de petróleo estão suscetíveis à corrosão, à fadiga, à abrasão e a diversos outros mecanismos de dano, sendo necessário realizar reparos para sanar vazamentos de fluidos com grande potencial de risco a fim de continuar a operação de forma segura (AZRAAI *et al.*, 2020).

Apesar de já existir uma grande gama de reparos soldados que estão cobertos de normas amplamente aceitas na comunidade internacional, como a ASME PCC-2, os recursos necessários para realizar reparos nem sempre estão disponíveis de imediato. As dificuldades encontradas na logística alinhada ao desafio da gestão de suprimentos fazem que o planejamento de reparos soldados nem sempre seja viável em uma situação de perda de contingência. (ARAUJO *et al.*, 2020; PINTO, 2021).

Outro fator que pode inviabilizar reparos soldados em situações de perda de contingência são os riscos de incêndio gerados pela presença de fontes de ignição em uma planta de hidrocarbonetos. Visto que, pelo conceito básico do triângulo do fogo (Figura 1), um princípio de incêndio pode ser gerado a partir de elementos presentes durante a operação de soldagem de campo: fonte de ignição (inerente ao processo de soldagem), comburente (oxigênio presente no ar) e combustível (hidrocarboneto presente na planta de processamento) (AZEVEDO, 2019; DENTI; DALLAGO; STEFFENS, 2022).

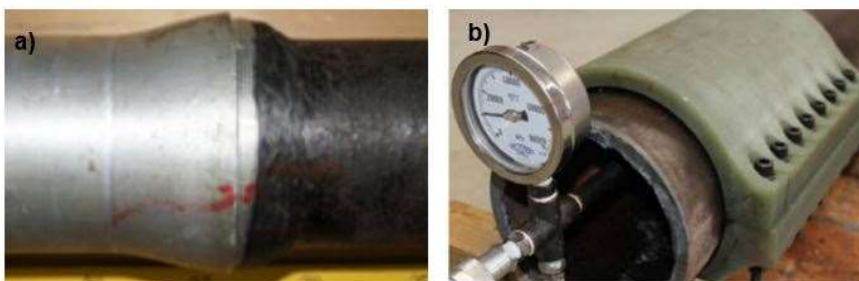
Figura 1 - Triângulo do fogo.



Fonte: Curso de Formação de Bombeiros Civis (2021).

Devido a essa problemática, muitos pesquisadores vêm desenvolvendo alternativas de reparos com polímeros e materiais compósitos de aplicação a frio para contingenciamento momentâneo dos fluidos. Mahdi e Eltai (2018) desenvolveram novos tipos de bandagem de material compósito (Figura 2a) e Djukic *et al.* (2015) criaram uma abraçadeira mecânica de material compósito para aplicação em reparo de tubulações (Figura 2b). A ideia principal desses tipos de produtos é garantir a continuidade operacional de forma segura para posteriormente realizar o reparo de acordo com algum código de projeto.

Figura 2 - a) bandagem de material compósito; b) abraçadeira mecânica de material compósito.



Fonte: Mahdi e Eltai (2018) e Djukic *et al.* (2015).

Apesar de existirem trabalhos publicados sobre a fadiga, a integridade e as aplicações de bandagens e abraçadeiras de material compósito ou polimérico, pouco se estuda sobre reparos com manufatura aditiva com esse tipo de material. Isso se dá pelo fato de ainda não existir um estudo aprofundado sobre a aplicação de resinas de manufatura aditiva para

fabricação de reparos de tubulações industriais, visto que não foram encontrados resultados durante as pesquisas bibliométricas, nas bases Scielo, Scopus, IEE Xplore, pelos termos *3D printing*, *photopolymerization*, *repair* e *offshore pipes*.

1.1 Justificativa

Com objetivo de investigar a aplicação de uma tecnologia promissora que não havia sido proposta em um segmento industrial de grande impacto na sociedade, este trabalho foi realizado com o intuito avaliar a viabilidade técnica de aplicação de resinas de impressoras tipo DLP (Processamento Digital de Luz) para a confecção de reparos de tubulação em plantas de processamento primário de óleo *offshore*.

Tendo em vista que existiram acidentes fatais de alto impacto envolvendo tubulações de hidrocarbonetos na indústria do petróleo, como ocorrido em 1998, em Lagos, que deixou 1078 vítimas, nesse segmento industrial, está consolidado que a integridade dos reparos em tubulações é crítica para a segurança dos profissionais e do processo na indústria do petróleo (BIEZMA *et al.*, 2020).

Apesar dos testes realizados neste trabalho terem sido realizados em escala de laboratório, não existe barreira tecnológica para implementação deste projeto em escala industrial. Com isso, o desenvolvimento de reparos de manufatura aditiva está convergente com os princípios de inovação da indústria 4.0 e pode representar ganho de produtividade no ambiente *offshore*.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo da pesquisa é avaliar, por meio de procedimentos experimentais, a viabilidade técnica de se utilizar tecnologia DLP/SLA de impressão 3D para confecção de reparos em tubulações utilizadas em plantas de processamento primário de petróleo *offshore*,

atendendo aos requisitos de integridade e garantindo a segurança dos profissionais e do processo.

1.2.2 Objetivos específicos

Para que se atenda ao objetivo geral, é necessário percorrer os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e classificar, por meio de revisão de literatura mais recente, as características das resinas de impressoras DLP, os critérios de projeto de tubulações de plantas de processamento e os mecanismos de dano envolvidos;
- Caracterizar, por meio de ensaios de tração, as propriedades mecânicas das resinas que forem relevantes aos critérios de projeto de tubulação;
- Avaliar, por meio de ensaios de ataque químico de média duração, a resistência das resinas à exposição de óleo bruto, à atmosfera marinha e à fotodegradação;
- Aferir, por meio de teste hidrostático, se o comportamento mecânico dos componentes pressurizados manufaturados é compatível com os referenciais teóricos calculados;
- Projetar e simular reparo de tubulações industriais tipo *clamp* de polímeros de manufatura aditiva por meio de métodos computacionais;
- Apresentar, com base nos resultados encontrados, os parâmetros de utilização desse material, atendendo aos critérios de integridade e garantindo a segurança dos profissionais e do processo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa do trabalho, será apresentada a fundamentação teórica necessária para o entendimento do tema abordado. Para isso, foi proposta uma estrutura narrativa que visa, em um primeiro momento, apresentar o aspecto geral das plantas de processamento primário, seus equipamentos e suas tubulações. Em seguida, serão apresentados aspectos específicos dos temas abordados no estudo, dando foco nos seguintes tópicos: tubulações industriais, manufatura aditiva por fotopolimerização e mecanismos de deterioração de polímeros.

2.1 Plantas de processamento primário

As atividades desenvolvidas na indústria do petróleo requerem elevados níveis de certificação e mobilizam expressivos recursos humanos e econômicos. Buscando atender a esses requisitos técnicos, as empresas fornecedoras da cadeia produtiva de petróleo e gás precisam priorizar a segurança e a qualidade das soluções. Além de segurança e qualidade, a produção de petróleo e gás obriga que os atores da cadeia de valor façam investimentos contínuos em inovação, visto que o domínio da tecnologia pode ser crucial para o desenvolvimento de algumas economias (MACIEL *et al.*, 2021).

Com o objetivo de exportar o petróleo bruto de forma segura, as plantas de processamento primário atuam em vários processos, como: condicionamento e compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo e tratamento da água, reinjeção e descarte de água. Para realizar todos esses processos, são necessários vários equipamentos e interligações de tubulações que formam plantas de processamento de hidrocarboneto com diferentes graus de complexidade (MACHADO, 2015).

A complexidade das unidades de processamento primário *offshore* da indústria de petróleo e gás vai depender de diversas premissas, entre elas a quantidade de sistemas, operações realizadas, lâmina d'água e requisitos específicos ligados ao reservatório. Com isso, as plantas de processamento de fluidos podem ser simples ou complexas, tal classificação vai depender do tipo de fluídos produzidos e da sua viabilidade econômica (AMAECHI *et al.*, 2022).

Um exemplo de planta de processamento primário é a P-77 (Figura 3), um FPSO (Unidade Flutuante de Produção, Armazenamento e Transferência de Petróleo e Gás Natural) que entrou em operação em 2019, com a capacidade de produzir 150 mil barris de óleo e comprimir 6 milhões de metros cúbicos de gás natural (PETROBRAS, 2019).

Figura 3 - FPSO P-77 a caminho da sua locação final.



Fonte: adaptada de Petrobras (2019).

A Tabela 1 apresenta as variáveis de operação das tubulações dos principais sistemas da unidade de processamento *offshore* na Bacia de Campos. É possível notar que as temperaturas de projeto são relativamente baixas em comparação com plantas de refino (FRANCESCHI; ENZWEILER, 2021). Diferente da temperatura de operação, as pressões têm uma *range* de operação maior, e isso se dá pois os fluidos devem ser exportados das unidades a altas pressões para garantia de escoamento.

Sobre os materiais empregados como base nas tubulações, encontrados na Tabela 2, pode ser notado que só há utilização de polímeros (PRFV) nas linhas de hipoclorito, por mais que existam outros fluidos com temperaturas e pressões de operação equivalentes. Essa preferência por aços e outros materiais metálicos é explicada por fatores financeiros, pela dificuldade de montagem, pela interação com o fluido de processo e pelo vasto histórico de sucesso para aplicações de alto risco (RUBINO *et al.*, 2020).

Tabela 1 - Diâmetros nominais, pressões e temperaturas de operação de tubulações de processo *offshore*.

Produtos	Diâmetros nominais	Pressões de operação (Kpa)	Temperaturas (°C)
Biocida	3/4"-2"	0-900	30
Hipoclorito	2"-8"	300	32
Glicol	2"-10"	410-21000	37-102
Inibidor de corrosão (gás)	3/4"-2"	0-20000	30
Inibidor de corrosão (óleo)	3/4"-2"	0-800	30
Sequestrante de H ₂ S	3/4"-2"	0-880	30
Sequestrante de oxigênio	3/4"-2"	0-400	30
Óleo	3/4"-20"	100-1400	30-120
Gás	1"-18"	300-21000	33-120
Gás condensado	2"-4"	20-19000	0-120
Água produzida	1"-16"	0-1500	40-120
Água de resfriamento	3/4"-3"	0-700	32-45
Água de aquecimento	3/4"-20"	0-1500	70-180
Água (combate a incêndio)	1/2"-12"	0-1000	29
Diesel	2"-8"	0-400	25-38

Fonte: elaborada pelo autor

Tabela 2 - Materiais empregados em tubulações offshore.

Produtos	Materiais empregados
Biocida	Aço inoxidável austenítico
Hipoclorito	Aço carbono revestido internamente/PRFV
Glicol	Aço carbono/aço baixa liga
Inibidor de corrosão (gás)	Aço inoxidável austenítico
Inibidor de corrosão (óleo)	Aço inoxidável austenítico
Sequestrante de H ₂ S	Aço inoxidável austenítico
Sequestrante de oxigênio	Aço inoxidável austenítico
Óleo	Aço carbono/aço baixa liga
Gás	Aço carbono/aço baixa liga/aço inoxidável austenítico
Gás condensado	Aço carbono/aço baixa liga
Água produzida	Aço carbono
Água de resfriamento	Aço carbono
Água de aquecimento	Aço carbono/aço inoxidável austenítico
Água (combate a incêndio)	Cobre-níquel
Diesel	Aço carbono

Fonte: elaborada pelo autor.

2.2 Equipamentos e tubulações

Os equipamentos de processo são fundamentais nas indústrias que trabalham com a transformação física ou química de produtos, como a indústria do petróleo. Dado que a grande maioria desses equipamentos trabalham em regime contínuo e em cadeias interligadas, a falha em um único equipamento pode gerar indisponibilidade de sistemas críticos ou de uma planta industrial completa (SHAFIQ *et al.*, 2020).

Tendo em vista o risco apresentado por esses equipamentos, o Ministério do Trabalho criou uma Norma Regulamentadora (NR) que estabelece os requisitos mínimos para gestão da integridade estrutural de determinados equipamentos no ambiente industrial, sendo esses: caldeiras a vapor, vasos de pressão, tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento. Essa norma determina as condições de instalação, os prazos de inspeção, a documentação mínima necessária, as responsabilidades do empregador e as competências

técnicas dos profissionais envolvidos nas inspeções, visando à segurança e à saúde dos trabalhadores (MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2018).

Por outra ótica, associados às complexidades inerentes à indústria do petróleo, estão os elevados custos operacionais. Visando à redução desses custos, são aplicados grandes esforços no setor petrolífero a fim de otimizar as plantas de processamento primário. A demanda por eficiência dos equipamentos é suficiente para induzir a produção e o desenvolvimento de diversos produtos estratégicos, de forma que, a longo prazo, a verdadeira riqueza não esteja na produção do petróleo em si, mas no seu desdobramento na tecnologia e economia local (VALE *et al.*, 2019).

2.3 Projeto mecânico de tubulações industriais

Sobre as tubulações que interligam os processos, existe uma variedade de fatores que determinam a viabilidade técnica do emprego dos materiais, dentre eles: a compatibilidade com o fluido conduzido, a temperatura de operação, a pressão de operação, a resistência mecânica do material, a viabilidade na construção e montagem e o tempo de vida do projeto. Devido ao aumento de resistência mecânica e ao conjunto geral novas tecnologias de processamento características, os materiais poliméricos vêm sendo cada vez mais empregados na indústria *offshore* (LEON *et al.*, 2021).

Contudo, para a segurança do processo e das pessoas, são necessários materiais com resistência mecânica compatíveis com as magnitudes de pressão envolvidas no projeto de uma planta de processamento primário. Para o projeto mecânico de uma tubulação de aço carbono, tem-se que a espessura mínima para resistir às pressões internas dos fluidos, dada pela ASME B31.3 (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2020), norma específica para tubulações de processo, é dada por uma das duas expressões (Eq. 1 e 2):

$$t = \frac{PD}{2(S_h E + PY)} + C \quad (1)$$

$$t = \frac{Pd}{2(S_h E + PY - P)} + C \quad (2)$$

Onde:

t = espessura mínima;

P = pressão interna de projeto;

D = diâmetro externo;

d = diâmetro interno;

Sh = tensão admissível do material na temperatura de projeto;

E = coeficiente de eficiência de solda;

Y = coeficiente de redução de acordo com o material e a temperatura;

C = soma das sobreespessuras para corrosão, erosão e abertura de roscas.

Já o projeto mecânico de uma tubulação de polímeros é um pouco diferente, a espessura mínima para resistir às pressões internas dos fluidos, conforme a ASME B31.3 (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2020), é regida pela seguinte expressão em tubos de termofixos (Eq. 3):

$$t = \frac{PD}{2Sh + P} \quad (3)$$

Outro parâmetro importante para o projeto mecânico de uma tubulação e para o cálculo de flexibilidade é a distância entre os suportes. A tubulação, além de um condutor de fluidos, é um elemento estrutural e deve suportar o seu próprio peso, o peso do fluido, das válvulas e dos demais acessórios instalados. Dessa forma, as duas premissas limitantes para o cálculo, segundo a ASME B31.3 (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2020) e demais normas de projeto, são:

- A tensão máxima de flexão, no ponto de maior momento fletor, deverá ser inferior à tensão admissível do material;
- A flecha máxima, no meio do vão, deverá ser inferior a um determinado valor.

2.4 Mecanismos de dano em tubulações industriais

Por mais que os componentes estruturais sejam dimensionados para suportar carregamentos estáticos ou dinâmicos, condições ambientais e operacionais ocorrem durante a vida útil do projeto. Diversos fatores inerentes ao processo e às condições operacionais podem causar degradação do material, afetando, assim, a confiabilidade e a integridade estrutural dos componentes. Esses processos de degradação são denominados mecanismos de dano (ALMEIDA JÚNIOR, 2016).

A corrosão é um mecanismo de dano que está envolvido em uma quantidade significativa de falhas em tubulações industriais, caracterizado, na maioria das vezes, pela redução da espessura do metal e perda de massa. Esse mecanismo de dano está alinhado a grandes impactos no ambiente *offshore*, pois as taxas de corrosão atmosférica são substancialmente maiores em ambientes marinhos com alta deposição de cloreto em comparação aos demais ambientes (KOUSHIK, 2021).

Outro mecanismo de dano recorrente em plantas de processamento é a fadiga, que é um dano acumulativo associado a carregamentos dinâmicos, geralmente causado por ciclos de tensões térmicas ou vibração próxima a equipamentos rotativos. As tubulações das unidades *offshore* também sofrem fadiga devido aos deslocamentos e acelerações impostas ao navio pelas ondas do mar (ZHANG; NI; SUN, 2022).

Dada a importância da detecção precoce dos mecanismos de dano, os pesquisadores vêm desenvolvendo tecnologias alinhadas com a indústria 4.0 com intuito de reduzir riscos de segurança e diminuir custos. Visto que o ensaio visual é uma forma de detectar corrosão atmosférica, vibração excessiva e outros mecanismos de dano pelo ensaio visual, Almeida *et al.* (2021) propuseram uma metodologia de inspeção baseada em aprendizado de máquina a partir de imagens capturadas por drones aéreos em ambientes de produção de óleo e gás.

2.5 Reparos em tubulações industriais

O estudo das técnicas de aplicação de reparo em tubos rígidos de transporte de hidrocarbonetos vem ganhando relevância nas últimas décadas, visto que a parada de uma

tubulação para substituição gera um impacto na lucratividade e logística de alta complexidade. Associados a isso, existem diversos mecanismos de dano presentes no ambiente industrial deixando tubulações contendo fluidos de alto risco suscetíveis à falha (MOSQUEN *et al.*, 2015).

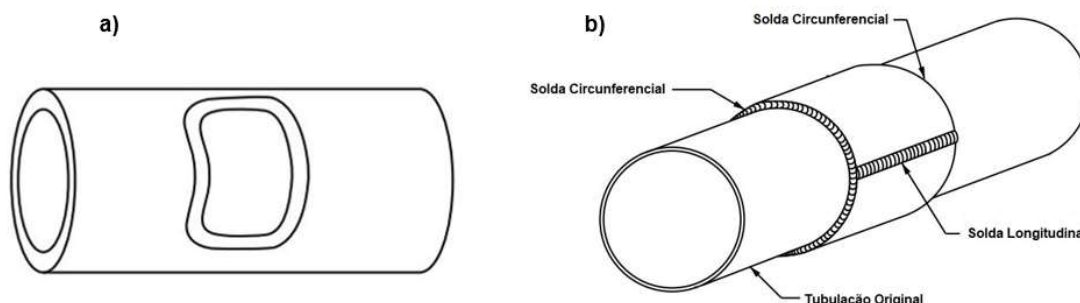
Rocha (2021), ao evidenciar a necessidade de reparos em dutos de transferência de petróleo, destaca que as operadoras de campos de petróleo no Brasil classificam os reparos em três tipos:

- Reparo contingencial: reparo através de instalação de peças em caráter emergencial, precedido de ações operacionais, com intuito de minimizar os impactos ao meio ambiente e às pessoas. Sua principal função é conter vazamentos e viabilizar a execução de reparos temporários ou permanentes.
- Reparo temporário: reparo que restabelece a integridade da tubulação de forma temporária e garante momentaneamente a segurança e continuidade operacional da tubulação. Esses reparos são ditos temporários pois têm vida útil inferior à vida útil de projeto.
- Reparo permanente: reparo que restabelece a integridade da tubulação e garante momentaneamente a segurança e continuidade operacional do duto. Esses reparos são ditos permanentes pois tem a vida útil igual ou superior à vida útil de projeto.

Dentre as diversas técnicas empregadas para reparo e expansão de malha em tubulações, a soldagem ainda é um dos métodos amplamente utilizados, devido a seu histórico e a confiabilidade. Por mais que existam determinadas situações nas quais a soldagem pode ser empregada sem interromper o escoamento de fluido, por vezes, se faz necessária a redução de vazão ou pressão de forma a impactar o processo (PEREIRA *et al.*, 2012).

De fato, existe uma variedade de reparos soldados que podem ser utilizados em tubulações em serviço. A Norma Técnica ASME PCC-2 (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018) cita as condições de aplicação e projeto desses reparos. Um exemplo de reparo soldado é chapa sobreposta (Figura 4a), que é comumente utilizada para perda localizada de espessura. Outro exemplo é a dupla calha soldada (Figura 4b), que funciona tanto para perda localizada de espessura quanto para recomposição estrutural da tubulação.

Figura 4 - a) croqui esquemático de uma chapa sobreposta; b) croqui esquemático de uma dupla calha soldada.



Fonte: adaptada de American Society of Mechanical Engineers (2018).

Por mais que as técnicas de reparo por soldagem sejam amplamente aceitas, uma situação que se deve levar em consideração é que as soldas realizadas em operação, além de promoverem uma fonte de calor em uma planta de processamento de hidrocarbonetos, sofrem resfriamento acelerado devido ao escoamento do fluido e podem conter regiões de elevada dureza suscetíveis a trincas induzidas por hidrogênio. Essa problemática alinhada com os atuais requisitos de segurança e preservação do meio ambiente propicia o aparecimento de reparos em dutos com materiais compósitos e poliméricos (ALVES; AROUCHE, 2020; PEREIRA, 2012).

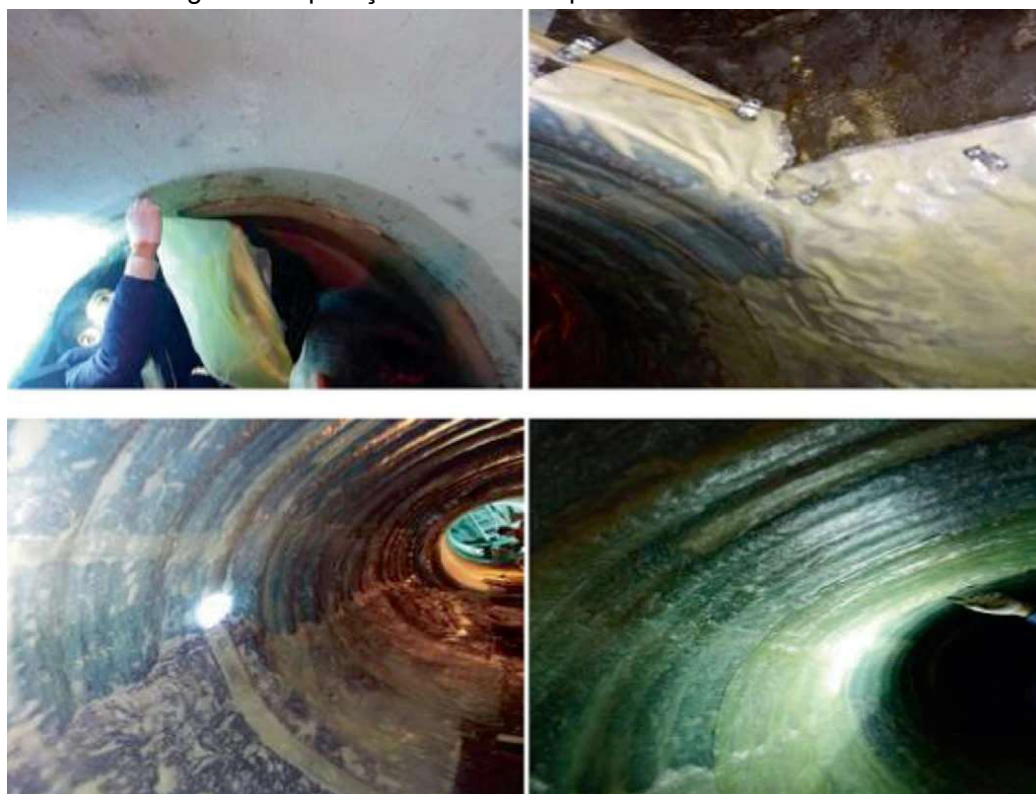
Devido a isso, já existem normas técnicas, como a ISO/TS 24817 e a própria ASME PCC-2, que viabilizam reparos com material compósitos para defeitos como: corrosão interna ou externa, perda de espessura localizada, moças e ranhuras. Essas normas agregam projeto, instalação, qualificação, testes e inspeção em reparos de tubulações, tanques e vasos de pressão.

Mesmo com tantas técnicas consolidadas, a indústria do petróleo continua buscando novas soluções para reparar tubulações com grande impacto de falha com melhor eficiência. Após a constatação de perda de 92% da espessura nominal de projeto de um oleoduto de 14"x18" localizado no Alaska por corrosão induzida por microrganismos, de forma pioneira na indústria de óleo e gás, foi introduzida uma tubulação de 10,75" para recuperar a integridade do trecho (POTÌ; POMAR, 2021).

Em síntese, os avanços e a concepção de novas tecnologias de reparos de tubulações estão presentes em diversos setores da sociedade, sobretudo quando os reparos se utilizam de materiais não metálicos. Um exemplo disso, que pode ser visto na Figura 5, é a aplicação

de nanocompósitos de base cerâmica com propriedades anticorrosivas em reparos de tubulações metálicas subterrâneas de diversos diâmetros localizadas na china (YUAN; LV, 2023).

Figura 5 - Aplicação de nanocompósitos de base cerâmica.



Fonte: adaptada de Yuan e LV (2023).

2.6 Manufatura aditiva

O aparecimento da manufatura aditiva é visto como um marco das tecnologias de processos de fabricação para muitos pesquisadores. Devido à grande facilidade de produzir elementos de geometria complexa e à possibilidade de combinações positivas com outras tecnologias da indústria 4.0, essa tecnologia tem gerado cenários de grande oportunidade para pesquisa em materiais, processos e aplicações (ALMEIDA; ALVES, 2020).

Devido às vantagens da manufatura aditiva, houve os surgimentos de diferentes tipos de tecnologias que podem ser classificadas de acordo com o material base estudado: cerâmicos, metálicos, orgânicos ou poliméricos. Em outra ótica, a norma ABNT ISO/ASTM

52900 (2018) introduz uma forma de classificação baseada no princípio de processamento dos materiais. As sete divisões dessa classificação se encontram listadas abaixo (CULMONE; SMIT; BREEDVELD, 2019):

- Jateamento de material: o processo de fabricação é feito por deposição seletiva de material líquido em pequenas quantidades;
- Jateamento de aglutinante: o processo de baseia em adicionar aglutinante líquido de forma seletiva a um material em pó;
- Deposição direta por aplicação de energia: o processo de fabricação consiste na aplicação de energia térmica concentrada para fundir o material sólido à medida que é depositado;
- Extrusão de material: o material é extrudado seletivamente através de um orifício;
- Fusão de leito de pó: processo de fabricação em que regiões de um leito de pó são fundidas de forma seletiva;
- Laminação de chapas: fabricação por corte, sobreposição e união do material;
- Fotopolimerização de líquido: processo que consiste em expor seletivamente um polímero fotossensível à radiação ultravioleta.

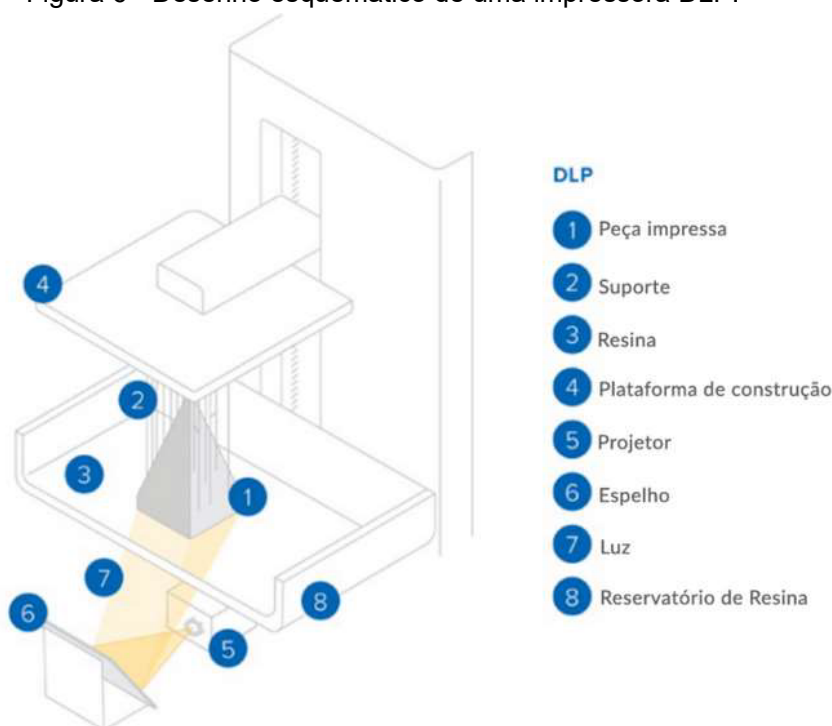
2.6.1 Manufatura aditiva por fotopolimerização

Dentre as tecnologias de manufatura aditiva, a manufatura por fotopolimerização foi selecionada como objeto de estudo deste trabalho, pois produz objetos de matriz polimérica inteiriços e isotrópicos. Além disso, essa tecnologia vem ganhando destaque no mercado pela resistência mecânica, alta capacidade de acabamento superficial e por ser utilizada, dentre outras finalidades, para confecção de próteses médicas e odontológicas (PARIZE *et al.*, 2020).

Existem dois processos de manufatura aditiva por fotopolimerização que compartilham o princípio de utilização luz ultravioleta para curar resinas fotossensíveis, sendo eles: o Processamento Digital de Luz (*Digital Light Processing*, comercialmente conhecido como DLP) e estereolitografia (*stereolithography*, comercialmente conhecido com SLA). Na comparação dos métodos, a SLA é o processo que obtêm impressões de melhor precisão, porém, para os fins deste estudo, o DLP foi selecionado devido à maior velocidade de impressão dos objetos (HOSSEINABADI *et al.*, 2023).

O processo de fabricação de um componente via impressão, utilizando a tecnologia DLP, se inicia com seccionamento de uma peça projetada em visualização 3D em camadas de espessura determinadas com auxílio de um software de fatiamento. Em seguida, por meio de um programa de interface, o arquivo digital gerado, em formato de código-g, é enviado à impressora 3D (Figura 6), dotada de um projetor LED UV (tipicamente com comprimento de onda 385nm ou 405nm), que manufatura o componente camada a camada com o auxílio de um mecanismo de elevação acoplado à plataforma de construção (PIVESSO, 2018).

Figura 6 - Desenho esquemático de uma impressora DLP.



Fonte: 3D LAB (2022).

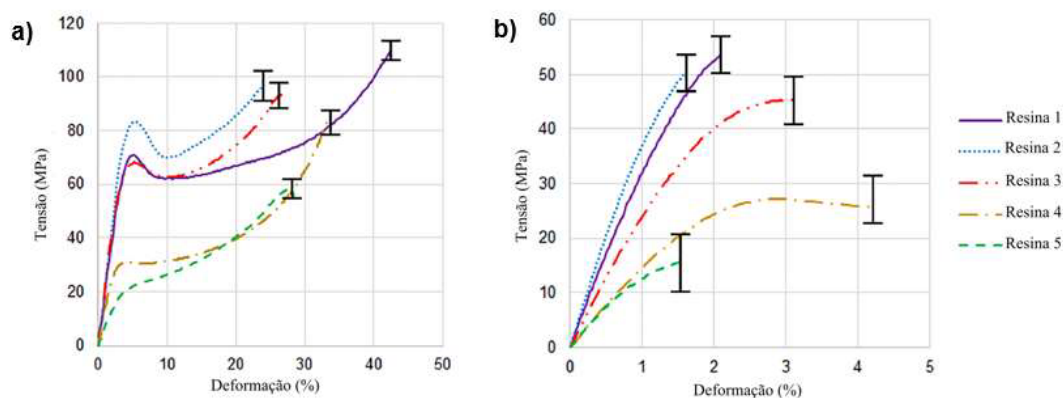
Tendo em vista as possibilidades do uso dessa tecnologia na indústria, Lovo *et al.* (2020) aferiu as propriedades mecânicas de resinas no mercado, listadas na Tabela 3, para a manufatura de uma engrenagem de uma caixa de redução. Dentre as resinas testadas, a que obteve melhor desempenho alcançou resistência de 53Mpa à tração, conforme a Figura 7a, e 110Mpa à compressão, conforme a Figura 7b.

Tabela 3 – Identificação das resinas comerciais.

Resina	Fabricante	Modelo
1	EnvisionTEC	LS600
2	Smart Print	Bio Hybrid
3	Smart Dent	Modelo
4	FlashForge	Standard
5	Makertech	DM400

Fonte: adaptada de Lovo *et al.* (2020).

Figura 7 - a) ensaio de tração, gráfico de tensão e deformação de resinas; b) ensaio de compressão, gráfico de tensão e deformação de resinas.



Fonte: adaptada de Lovo *et al.* (2020).

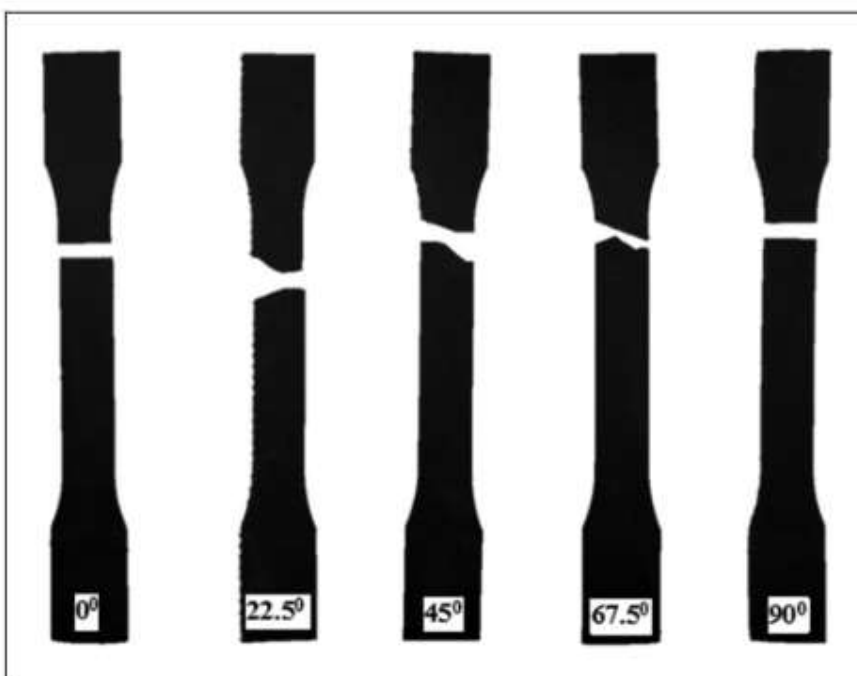
Apesar dessas resinas chegarem a apenas 12% da resistência à tração do API 5L Grau B, uma liga de aço carbono com adição de alguns elementos em baixas porcentagens, comumente utilizada em plantas *offshore* (ALCANTAR-MARTÍNEZ *et al.*, 2023), é possível que esse material tenha aplicabilidade para alguns sistemas específicos de baixa pressão. Além disso, é possível encontrar resinas de alta performance no mercado que chegam a 76MPa de resistência à ruptura e 10.000 Mpa de módulo de Young, como resina BASF Ultracur 3D.

Sobre os aspectos do processo de fabricação dos componentes, Garcia, Ayranci e Qureshi (2020) apontam que o fator de maior impacto no comportamento mecânico dos componentes manufaturados por DLP é o tempo de cura, visto que, quando os requisitos de impressão do fabricante são atendidos, fatores como posição de impressão, direção de

impressão ou espessura de camada têm menor influência nas propriedades mecânicas do material acabado.

Contudo, as nuncias da mecânica da fratura em resinas fotossensíveis ainda são objeto de estudo para muitos pesquisadores. Saini *et al.* (2020), após manufaturar corpos de prova em cinco orientações distintas – 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ e 90° – utilizando a tecnologia SLA, notou que determinadas orientações podem gerar diferentes módulos de falha e mecanismos de propagação das trincas, conforme visto na Figura 8.

Figura 8 - Diferença dos módulos de falha entre os corpos de prova.



Fonte: Adaptada de Saini *et al.* (2020).

2.7 Mecanismos de degradação em polímeros

Na literatura, uma das formas de classificar e dividir a degradação polimérica é em categorias de acordo com os fatores externos de iniciação das reações de degradação. Dentre os mais comuns estão: a fotodegradação (iniciada por incidência de radiação luminosa), a degradação mecânica (iniciada pela indução de tensões), a degradação térmica (iniciada por calor em atmosfera inerte) e a degradação química (iniciada por um agente químico agressivo) (MENA *et al.*, 2020).

Os processos de degradação dos polímeros têm sido amplamente estudados pela comunidade científica e podem ocorrer por meio de diferentes tipos de reações químicas. As reações de maior susceptibilidade em situações da indústria são: cisão das ligações na cadeia poliméricas, modificação nas cadeias laterais, reticulação, despolimerização, reações intramoleculares ou auto-oxidação (CAIXETA; MORAIS, 2022).

Visto que dificilmente esses processos acontecem isoladamente, é possível que diferentes processos ocorram de forma simultânea e venham a gerar uma forma distinta de iniciar a reação de degradação. Um exemplo desse tipo de fenômeno é o “*environmental stress-cracking*”, que ocorre na presença de agentes químicos específicos alinhados a tensões mecânicas (LAVOIE *et al.*, 2020).

Em síntese, os polímeros estão susceptíveis a outros diversos mecanismos de dano, como: desintegração, oxidação, hidrólise, radiação, degradação térmica e desidratação. O modo de falha relacionado a esses mecanismos de dano se apresenta na forma de amolecimento, carbonização, fissuração, delaminação, descoloração, dissolução ou inchaço (SCHWEITZER, 2010). Contudo, este trabalho irá trazer uma visão aprofundada dos mecanismos de degradação com maior susceptibilidade no ambiente *offshore*: a fotodegradação e a degradação química.

2.7.1 Fotodegradação

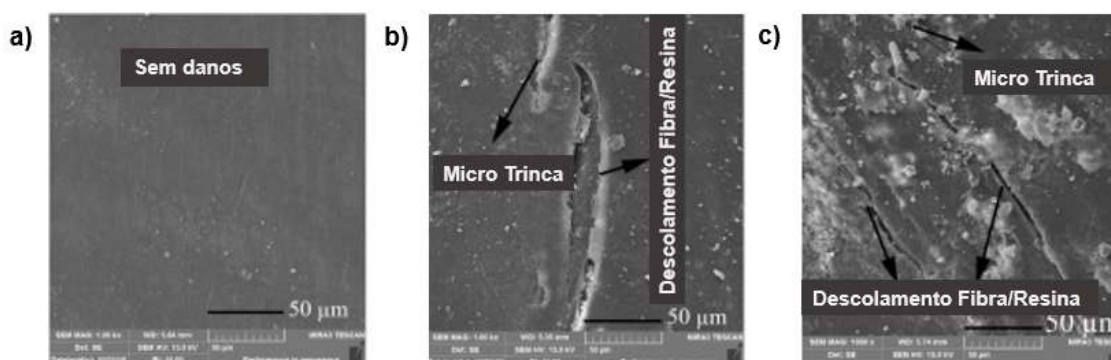
Dentre os mecanismos de degradação de polímeros presentes no ambiente *offshore*, a fotodegradação pode gerar um impacto significativo, visto o alto grau de exposição dos materiais. Causado pelos efeitos da absorção dos fótons pela matriz polimérica da matéria, este mecanismo está ligado à energia mínima (comprimento de onda mínima consequentemente), a qual consegue quebrar as ligações moleculares das cadeias das moléculas, fazendo o material perder suas propriedades físicas e químicas (FIDUNIV, 2019).

Dado que a exposição à radiação UV e à névoa salina não conseguem ser evitadas em determinadas situações, a necessidade de compreensão dos mecanismos de danos a partir da exposição de componentes industriais poliméricos a essas intempéries vem chamando atenção de pesquisadores. Nesta ótica, Kouketsu (2022) avaliou as propriedades tribológicas de quatro poliolefinas empregadas nos tubos dos rolos de correias transportadoras submetidos à radiação UV e à névoa salina, chegando à conclusão que a exposição às intempéries, de alguma forma, influenciou no comportamento tribológico dos materiais.

Essa correlação negativa com as propriedades tribológicas está associada ao fato de a fotodegradação promover rompimentos de cadeias poliméricas na superfície atingida pela radiação. Com isso, a rugosidade do material sofre aumento que geralmente vem associado à redução na intensidade do brilho da área exposta à radiação ultravioleta. (GOES, 2020).

Contudo, a exposição de componentes manufaturados em material de base polimérica a esses mecanismos de degradação pode gerar reduções significativas nas propriedades mecânicas e tolher as possibilidades de aplicação. A redução das propriedades mecânicas em estruturas pultrudadas de compósitos de polímeros reforçados com fibra é corroborada com o aparecimento de microtrincas na matriz polimérica, conforme observado na Figura 9 (BAZLI, *et al.* 2020).

Figura 9 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra após exposição a UV e ciclos de condensação de água: a) referência; b) 1000 h; c) 3000h.



Fonte: adaptada de Bazli *et al.* (2020).

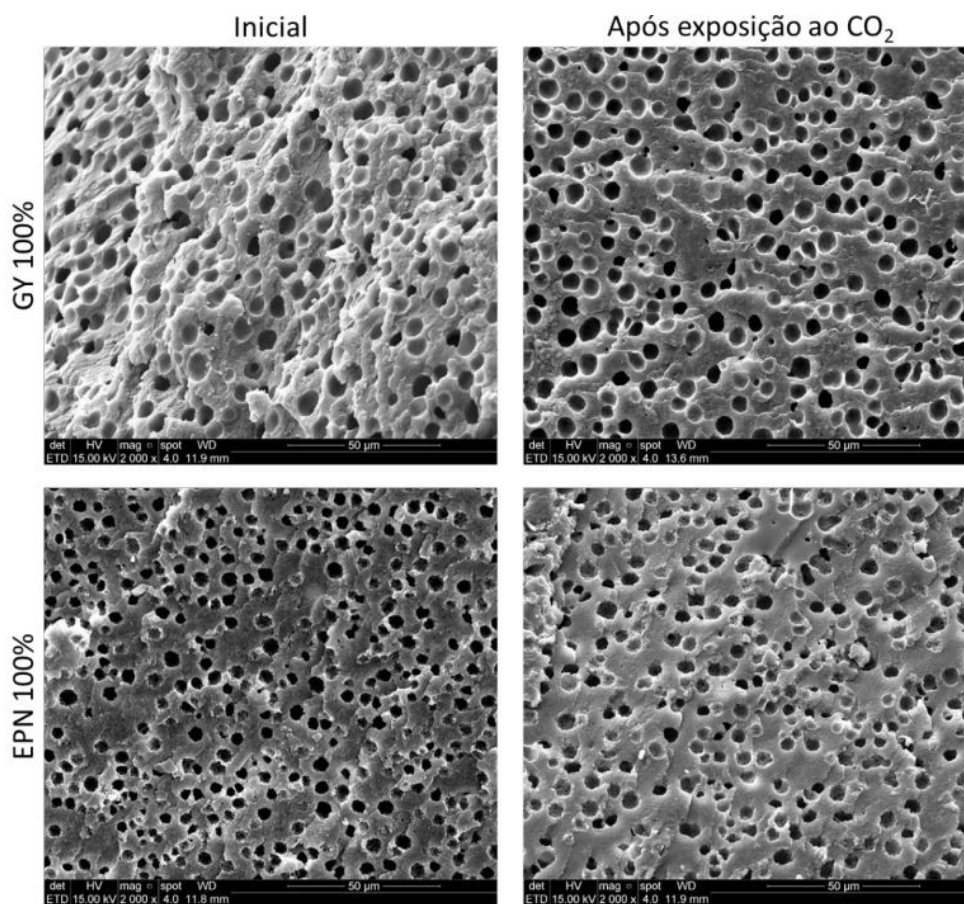
2.7.2 Degradação química

Outro mecanismo de dano que gera impacto negativo nas propriedades físicas e químicas dos polímeros é a degradação química. Teoricamente, esse fenômeno ocorre apenas em situações particulares, nas quais o polímero é exposto a um agente químico agressivo específico. Apesar disso, esse problema ocorre em plantas de processamento, visto que todo polímero produzido em escala industrial apresenta algum grau de resíduo contaminante que pode iniciar a degradação por ataque químico (VIANA; VASCONCELOS; VASCONCELOS, 2021).

Além disso, a difusão da utilização de materiais poliméricos, alinhada à diversidade de fluidos agressivos na indústria do petróleo, vem impulsionando estudos de degradação química de polímeros nesse segmento. Neste contexto, Stepanha (2021) avaliou as alterações microestruturais de diferentes blendas de resinas epóxi frente às condições encontradas em poços de petróleo/reservatórios de armazenamento geológico de CO_2 .

Como pode-se observar na Figura 10, Stepanha (2021) concluiu que não há indicações de que ocorrem interações químicas entre as resinas epóxi GY e EPN e o CO_2 . Apesar da redução de propriedades mecânicas avaliadas em ensaios macroestruturais, as resinas apresentaram um bom desempenho para a aplicação em operações de reparo e abandono de poços.

Figura 10 - Micrografias de resinas epóxi (antes e depois de ataque químico).

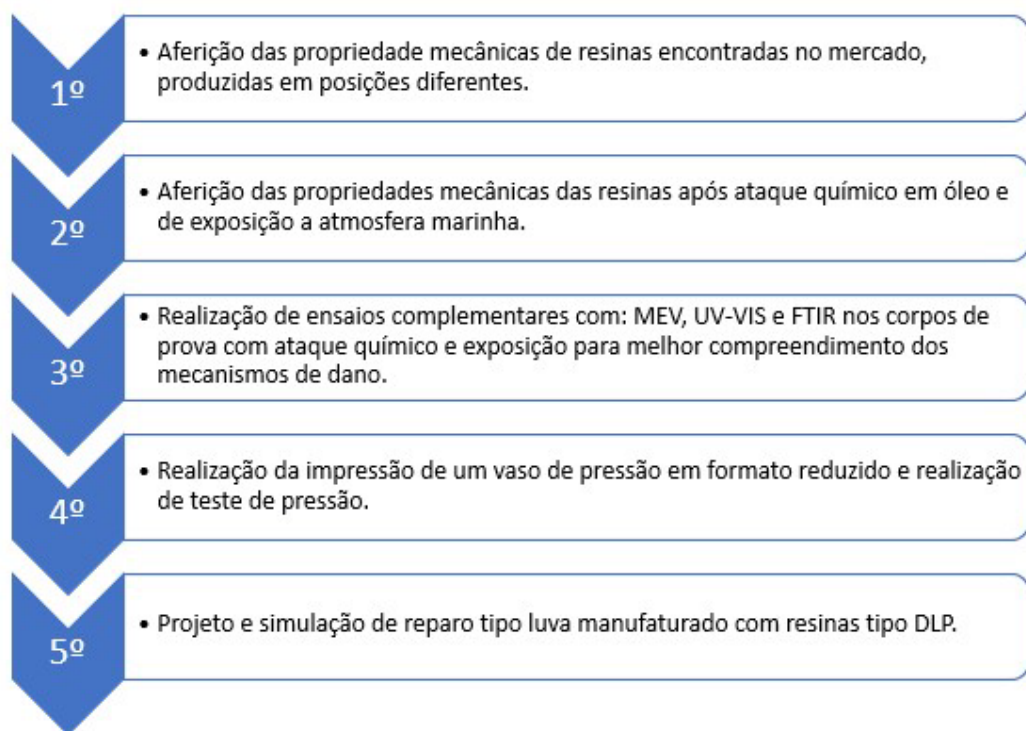


Fonte: adaptada de Stepanha (2021).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliação da viabilidade técnica dos materiais, foram realizadas as seguintes etapas, conforme a figura 11: a etapa de aferição das propriedades mecânicas de resinas encontradas no mercado produzidas em posições diferentes; a etapa de aferição das propriedades mecânicas das resinas após ataque químico em óleo e de exposição à atmosfera marinha; a etapa de ensaios complementares (MEV, UV-VIS e FTIR) nas resinas atacadas para melhor entendimento dos mecanismos de dano envolvidos; a etapa de impressão de um vaso de pressão em formato reduzido e realização de teste de pressão; a etapa de proposição, projeto e simulação de reparo tipo *clamp* (abraçadeira) com resinas tipo DLP.

Figura 11 - Fluxograma das etapas propostas para o trabalho.



Fonte: elaborada pelo autor.

. Durante a elaboração do trabalho, em um primeiro momento, foram utilizadas as resinas Ayncubic Basic (resina 1) e 3D Fila Basic (resina 6), devido a disponibilidade dos materiais no CEFET-MG. Em um segundo momento foi realizada uma seleção de resinas, com base nas propriedades mecânicas estabelecidas pelos fabricantes, desse modo forma

adquiridas as resinas: Ayncubic Standard + (resina 2), Esun Hard Tough (resina 3), Esun Precision Model (resina 4) e 3DLab Pro Alta Performance (resina 5). Para melhorar a organização das ideias e facilitar compreensão do trabalho, doravante as resinas serão referenciadas conforme o número associado, conforme descrito na tabela 4.

Tabela 4 – Identificação das resinas comerciais.

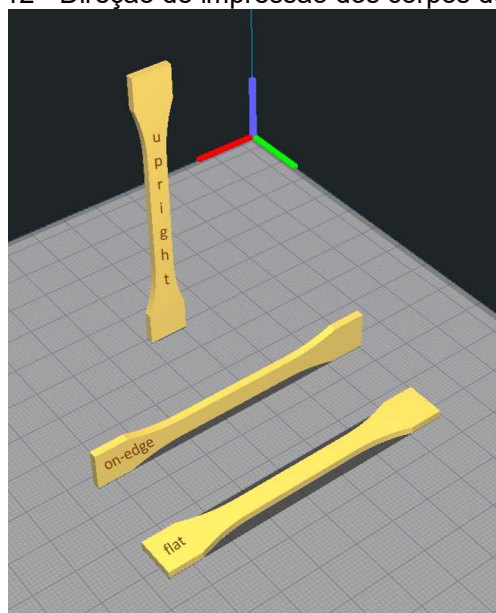
Resina	Fabricante	Modelo
1	Ayncubic	Basic
2	Ayncubic	Standard +
3	Esun	Hard Tough
4	Esun	Precision Model
5	3DLab	Pro Alta Performance
6	3D Fila	Basic

Fonte: elaborada pelo autor.

3.1 Aferição das propriedades mecânicas em diferentes posições de impressão

Como as teorias clássicas de distribuição de tensões em paredes finas dependem de materiais isotrópicos, foi realizada a impressão de corpos de prova em três direções distintas: *upright* (em pé), *on edge* (na borda) e *flat* (plano), conforme a Figura 12. Para realização deste estudo, foram utilizadas resinas 1 e 6, devido a disponibilidade do material.

Figura 12 - Direção de impressão dos corpos de prova.



Fonte: elaborada pelo autor.

Foram fabricados um total de 15 corpos de prova para cada resina selecionada, de modo a formar um grupo de cinco corpos de prova para cada direção de impressão, conforme na tabela 5. Após o processo de cura de duas horas em câmara de ultravioleta, os corpos de prova foram submetidos a um ensaio de tração uniaxial em um equipamento DL200 EMIC à velocidade de 5mm/min.

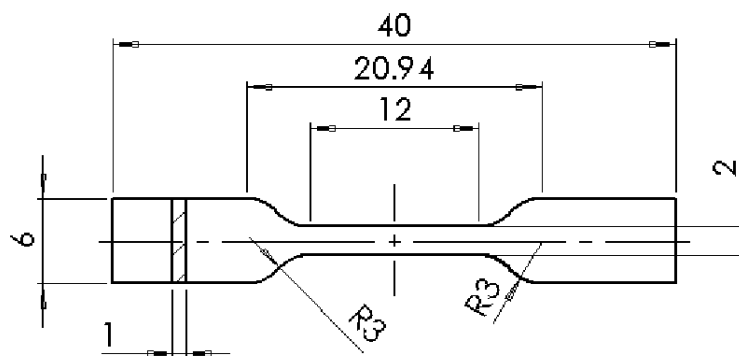
Tabela 5 – Identificação quantitativo dos corpos de prova.

Resina	Posição	Quantitativo
1	<i>Upright</i>	5
1	<i>On edge</i>	5
1	<i>Flat</i>	5
6	<i>Upright</i>	5
6	<i>On edge</i>	5
6	<i>Flat</i>	5

Fonte: elaborada pelo autor.

Esse ensaio foi realizado com o objetivo de avaliar a existência de uma mudança significativa nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. A depender da direção de fabricação, os resultados obtidos no ensaio de tração irão expressar as condições de isotropia ou anisotropia do material. A metodologia utilizada para o ensaio foi a ISO 527: tipo 5B. O croqui com as devidas cotas do corpo de prova se encontra esquematizado na Figura 13.

Figura 13 - Croqui do corpo de prova conforme ISO 527: tipo 5B.



Fonte: Adaptado de ISO 527-B (2019)

3.2 Aferição das propriedades mecânicas após ataque químico

Tendo em vista que a fotodegradação e a degradação química são os mecanismos de degradação dos polímeros que têm maior susceptibilidade de ocorrência no ambiente *offshore*, foi realizada a exposição do material a esses mecanismos de deterioração por meio da inserção do material de interesse em petróleo bruto e atmosfera salina com exposição à radiação solar, durante intervalos de 30, 60 e 90 dias. Considerando como critério as informações de propriedades mecânicas concedidas pelos fabricantes, os testes foram realizados com as resinas 1,2, 3, 4 e 5.

Para cada resina selecionada, foram fabricados cinco corpos de prova para o grupo de controle e mais três corpos de prova para cada intervalo de exposição ao óleo bruto e à atmosfera salina, totalizando 23 corpos de prova conforme a distribuição do quantitativo está apresentada na tabela 6. A posição de impressão selecionada foi a *flat*, e o tempo de cura foi padronizado em uma hora. Após decorridos os intervalos de exposição determinados, os

corpos de prova foram submetidos a ensaio de tração uniaxial em um equipamento DL200 EMIC à velocidade de 5mm/min, conforme o padrão ISO 527: tipo 5B.

Tabela 6 – Distribuição do quantitativo de corpos de prova.

Meio	Intervalo (dias)	Quantitativo
Controle	0	5
Óleo	30	3
Óleo	60	3
Óleo	90	3
Atmosfera Marinha	30	3
Atmosfera Marinha	60	3
Atmosfera Marinha	90	3

Fonte: elaborada pelo autor.

3.3 Ensaaios complementares para melhor entendimento dos mecanismos de dano

3.3.1 Microscopia eletrônica de varredura

Para melhor compreensão dos mecanismos de dano associados à aplicação do material em atmosfera salina ou com óleo bruto, foi realizada a microscopia eletrônica de varredura, tanto na superfície de fratura quanto nas zonas de degradação dos corpos de prova da resina 1 que sofreram o ataque químico por óleo ou exposição à atmosfera marinha.

Esse ensaio complementar foi realizado com a intenção de observar possíveis alterações na microestrutura devido aos processos de fotodegradação e degradação química. O equipamento utilizado para esse ensaio foi o TM4000 do fabricante Hitachi, no qual foi

possível observar variações na estrutura do material que corroboraram as mudanças nas propriedades mecânicas.

3.3.2 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier

Outro ensaio realizado com a resina 1, foi a espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), no qual é possível determinar as características estruturais e de composição do polímero, como grupos funcionais e ligações químicas. Além disso, esse ensaio é capaz de realizar uma análise semiquantitativa dos componentes químicos do material de interesse.

Dessa forma, foi possível avaliar se houve interação entre o petróleo e a resina durante o período dos experimentos de degradação. O equipamento utilizado para o FTIR foi o IRtracer-100 do fabricante Shimadzu, que tem absorbância ou transmitância no espectro 400 a 4000 cm^{-1} .

3.3.3 Espectrofotometria no ultravioleta visível

Diferente do FTIR, a espectrofotometria no ultravioleta visível utiliza outro espectro de ondas eletromagnéticas. Essa técnica geralmente é utilizada para estabelecer relações entre grupos funcionais e revelar transições eletrônicas entre orbitais moleculares. Dessa forma, as amostras da resina 2 foram submetidas a uma espectrofotometria no ultravioleta visível no intuito de compreender as possíveis alterações químicas a partir da análise dos comprimentos de onda absorvidos durante o ensaio. O equipamento utilizado para essas análises foi o do fabricante Shimadzu. O espectro associado é de 220 – 1400 nm.

3.3.4 Rugosidade superficial

No ensaio de rugosidade superficial, as amostras submetidas ao óleo e à atmosfera marítima foram comparadas às amostras sem ataque utilizando um rugosímetro Digimess

modelo TR400.220 com 19 parâmetros. No ensaio, utilizou-se um *cutoff* de 0,8mm, conforme parâmetros definidos na norma ISO 4288-1998.

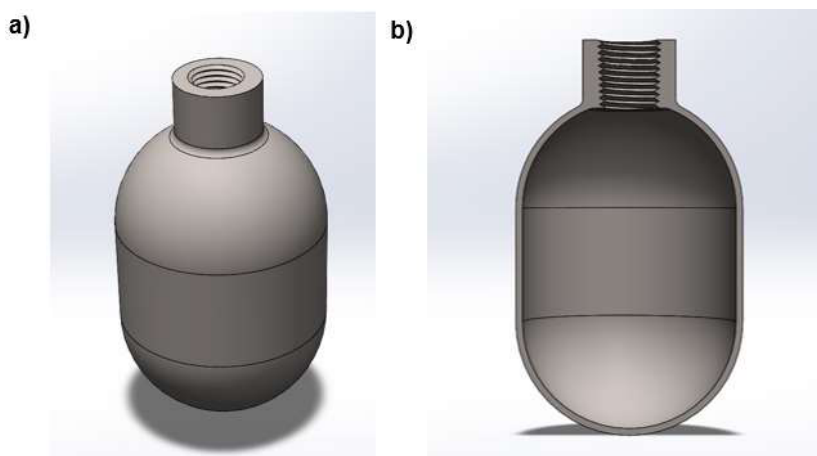
A rugosidade superficial das amostras é um parâmetro complementar no estudo das degradações dos materiais, servindo para corroborar os demais ensaios realizados. Desta forma, pode-se correlacionar os resultados e obter uma compreensão maior dos mecanismos de falha.

Dentre os parâmetros estudados, destacam-se 2 principais: Ra , que é obtido pela média aritmética dos valores absolutos de picos e vales em uma amostragem, e Rz , obtido pela somatória do valor do maior pico e do maior vale em uma amostragem. O teste foi realizado com as resinas que passaram pelos procedimentos do item 3.2, para critério de comparação, foram avaliados os grupos de controle, assim como as amostras que sofreram exposição de 90 dias em óleo e atmosfera marinha.

3.4 Impressão de um vaso de pressão em escala reduzida

Para avaliar se as teorias de distribuição de tensão em vasos de paredes finas se aplicam em vasos de pressão de manufatura aditiva por fotopolimerização, foram feitos vasos de pressão em miniatura com diâmetro interno de 50mm. Esses protótipos, conforme ilustrado na figura 4 a e b, foram projetados com diâmetro interno de 50mm e formados por um corpo cilíndrico, dois tampos esféricos e uma tomada com conexão roscada de 1/4" padrão NPT.

Figura 14 – Modelagem tridimensional do vaso de pressão: (a) vista geral; (b) vista seccional.



Fonte: elaborada pelo autor.

Com intuito de promover avaliação do desempenho do material submetido à pressão interna, foram confeccionados vasos com espessuras de referência de 1mm, 1,5mm e 2mm. Para cada espessura de referência, foram confeccionados quatro protótipos, o detalhamento técnico de cada protótipo se encontra nos anexos 1, 2 e 3, o tempo de cura em câmara ultravioleta foi de duas horas. A geometria foi escolhida para induzir falha no casco cilíndrico do protótipo durante o teste de pressão, a resina selecionada foi a Esun Precision Model devido às propriedades mecânicas que as amostras da resina apresentaram após a etapa de ataque químico.

A pressão teórica da falha foi calculada com base na equação 3, utilizando-se a média do limite de resistência da resina aferido de forma experimental no teste de tração dos corpos de prova sem ataque químico. Os protótipos de vaso foram submetidos à pressurização com vazão constante até ruptura no laboratório de aderência da UERJ – Campus Nova Friburgo, os transmissores de pressão e acessórios se encontravam devidamente certificados e calibrados.

Como resultado dos testes, pôde-se obter as rampas de pressurização (pressão x tempo) e a pressão final de ruptura. Em um segundo momento, foi realizada a análise dos resultados dos testes de pressão dos vasos de pressão e a comparação da pressão de ruptura do teste com a pressão teórica de ruptura calculada pela equação 3.

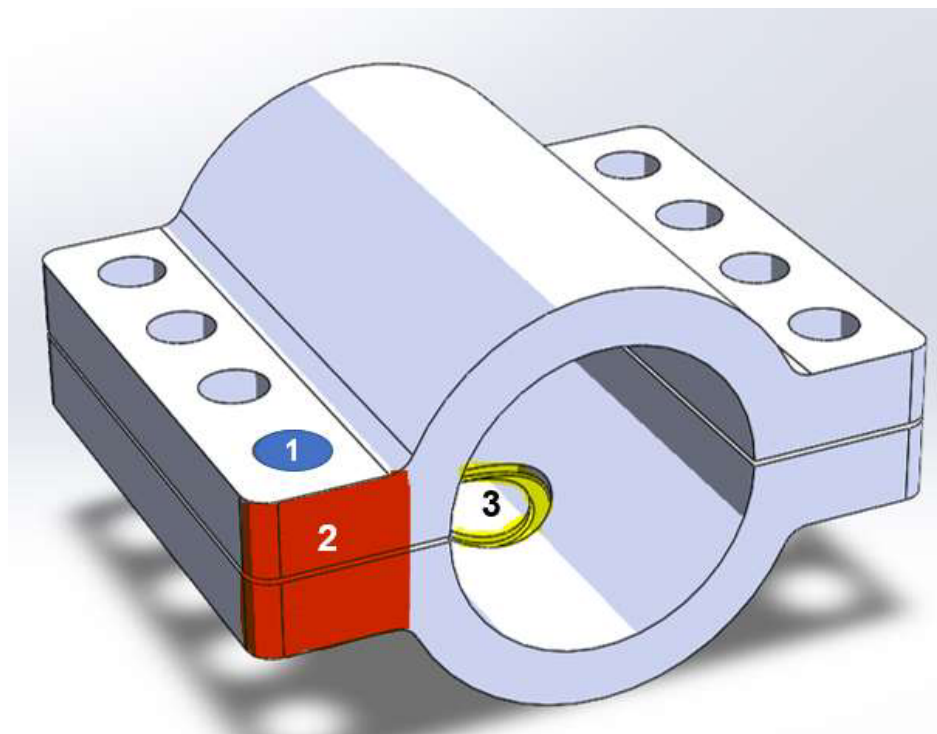
3.5 Proposição, projeto e simulação reparo tipo luva

Para fins de comparação com as pressões das unidades de processamento primário e aos reparos empregas na indústria do petróleo, foi desenvolvido o projeto de reparo tipo *clamp* para linhas com 2" de diâmetro e sch. 40 com as propriedades mecânicas de resina que obteve melhor desempenho após os processos da etapa 3.2 deste trabalho. Para composição do reparo, foi previsto um anel de 25mm de diâmetro e 4mm de espessura como elemento de vedação. Além disso, foram previstos 8 estojos B7 e 8 pares de porcas 2H de ½" como elementos de aperto.

Com intuito de respeitar o limite das aplicações de elementos pressurizados em paredes finas estipulado pela ASME PCC-2 (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2018), a qual define uma espessura de no máximo 1/6 do diâmetro interno, foi proposta uma

espessura base de 10mm para os componentes na peça. Apesar disso, foram adicionados os furos para inserção dos estojos (identificado como área 1 na figura 15), sobreespessura de 5mm na região de aperto dos estojos (identificado como área 2 na figura 15), e um canal de 2mm para acoplamento do elemento de vedação (identificado como área 3 na figura 15). O detalhamento técnico completo do reparo se encontra no Anexo 4.

Figura 15 - Protótipo do *clamp*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Em um segundo momento, foi realizada uma simulação computacional na qual o *clamp* recebeu esforços mecânicos que representavam um furo de até 25mm de diâmetro em uma linha pressurizada. O defeito teve dimensão selecionada para comparação com as bandagens comerciais. Para a simulação, foram utilizadas as ferramentas do *solidworks*, a pressão de 1100 PSI foi estabelecida para correlação com as pressões das linhas no ambiente *offshore*, conforme a Tabela 1, apresentada na revisão bibliográfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Aferição das propriedades mecânicas em diferentes posições de impressão

Dos ensaios de tração uniaxial dos corpos de prova em diferentes posições de impressão, foram obtidos os limites de resistência e o módulo de elasticidade para as resinas 3D Fila Basic e Anycubic Basic. Os resultados dessas propriedades mecânicas se encontram na Tabela 6, assim como os respectivos desvios padrões.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas das resinas em diferentes posições de impressão.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 6 / <i>flat</i>	25,24	2,995	232,4	18,24
Resina 6 / <i>on edge</i>	20,22	2,734	213,4	26,5
Resina 6 / <i>upright</i>	22,09	2,166	242,5	26,97
Resina 1 / <i>flat</i>	34,31	5,877	328,3	15,64
Resina 1 / <i>on edge</i>	28,2	2,883	274,2	22,7
Resina 1 / <i>upright</i>	31,37	3,139	290,7	12,23

Fonte: elaborado pelo autor.

Com os resultados obtidos, foi possível encontrar evidências estatísticas suficientes de que a resina *Anycubic Basic* apresentou propriedades mecânicas distintas nas três posições de impressão, quando avaliadas a um nível de confiança de 95%. Isso foi apontado pois os corpos de prova impressos na posição *flat* apresentaram módulo de elasticidade superior aos das demais posições e os corpos de prova impressos na posição *on edge* apresentaram limite de resistência e módulo de elasticidade inferiores. Não se pôde encontrar evidências estáticas de que a tensão de ruptura variou entre as posições *flat* e *upright*.

Por outra ótica, os resultados da 3D Fila Basic mostraram que as propriedades mecânicas da resina não variaram tanto com a posição de impressão. Não foi possível encontrar evidência estatística que o módulo de elasticidade dos corpos de prova variou de acordo com a direção de impressão, porém, a tensão de ruptura dos corpos de prova

impressos na posição *flat* apresentaram valores de tensão de ruptura mais altos em comparação aos demais.

Os resultados encontrados apontam que a direção de impressão pode ter um impacto nas propriedades mecânicas do material acabado. Esse resultado é corroborado por Saini *et al.* (2020), o qual menciona que a direção de impressão também pode influenciar nas propriedades mecânicas e no módulo de falha da amostra ensaiada.

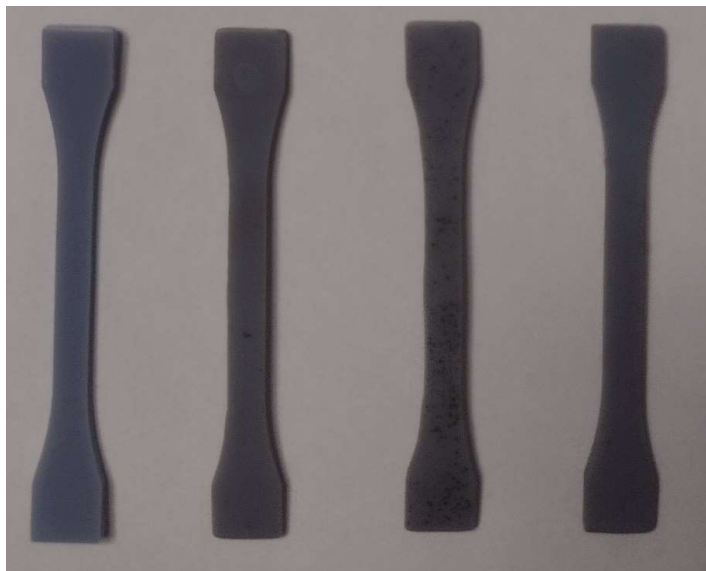
Contudo, os resultados obtidos nos experimentos realizados por Garcia, Ayranci e Qureshi (2020) apontaram que direção de impressão que obteve maior tensão de ruptura foi a posição *upright*, quando utilizado uma impressora SLA. Os dados deste estudo divergiram dos resultados encontrados nesse trabalho, essa divergência provavelmente deve estar ligada ao fato das amostras do presente estudo serem processadas em uma impressora DLP.

4.2 Aferição das propriedades mecânicas após ataque químico

4.2.1 Imersão em óleo

Após a seleção das resinas, com base nas informações dos fabricantes sobre o limite de resistência e módulo de elasticidade, os corpos de prova, impressos na direção *flat*, das resinas 1, 2, 3, 4, e 5 foram imergidos em óleo cru e posteriormente removidos após intervalos de 30, 60 e 90 dias. Por mais que os corpos de prova não tenham apresentado deformações físicas visuais, foi possível notar processo de interação química entre as resinas e o óleo bruto. Embora isso tenha ocorrido em todas as amostras, independente da resina e do tempo de imersão, o processo teve maior intensidade a partir de 60 dias de contato com o fluido. A Figura 16 apresenta, da esquerda para a direita, respectivamente, o aspecto visual dos corpos de prova: sem inserção, após 30 dias, após 60 dias e após 90.

Figura 16 - Aspecto visual dos corpos de prova após imersão em petróleo cru.



Fonte: elaborada pelo autor.

No aspecto das propriedades mecânicas, pode-se notar, na Tabela 7, que as amostras de controle da resina Anycubic Basic apresentaram limite de resistência e módulo de elasticidade superiores aos das amostras com 30, 60 e 90 de imersão, em um nível de confiança de 95%. Apesar disso, não houve variação significativa quando comparadas as propriedades mecânicas das resinas com 30, 60 e 90 dias de imersão. Dessa forma, é possível inferir que degradação química teve impacto nas propriedades mecânicas das amostras em um primeiro momento, porém, a evolução desses impactos não foi significativa em um período de até 90 dias de imersão.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas da resina Anycubic Basic após ataque químico em óleo.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 1 – controle	34,40	5,94	328,3	15,64
Resina 1 - 30 dias	25,00	2,33	219,67	19,43
Resina 1 - 60 dias	26,67	2,08	233,33	7,09
Resina 1 - 90 dias	26,00	2,16	242,00	11,97

Fonte: elaborada pelo autor.

Diferente da resina Anycubic Basic, os corpos de Anycubic Standard + só apresentaram redução significativa no limite de resistência nas amostras com 90 dias de exposição ao óleo, conforme descrito na Tabela 8. Além disso, pode-se notar um aumento significativo nos módulos de elasticidade nas amostras de 30 e 60 dias de exposição.

Desse modo, há evidências para se acreditar que o tempo de cura de uma hora, padronizado nos experimentos, afetou os resultados das propriedades mecânicas da resina Anycubic Standard +, visto que o limite de resistência do grupo de controle atingiu valores inferiores ao indicado pelo fabricante (cerca de 55Mpa). Contudo, é possível inferir que degradação química teve impacto nas propriedades mecânicas das amostras que permaneceram em imersão por um período de 90 dias.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas da resina Anycubic Standard + após ataque químico em óleo.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 2 - controle	23,77	2,05	220,50	14,76
Resina 2 - 30 dias	21,65	0,63	247,76	12,01
Resina 2 - 60 dias	21,85	2,08	252,63	28,74
Resina 2 - 90 dias	18,87	2,01	233,17	23,48

Fonte: elaborada pelo autor.

Assim como a Anycubic Standard +, os resultados da resina 3DLab Pro Alta Performance, apresentados na Tabela 9, também devem ter sido afetados pelo tempo de cura padronizado nos experimentos, dado que o limite de resistência do grupo de controle atingiu apenas 27% do valor indicado pelo fabricante (cerca de 75Mpa). Durante os experimentos, foi possível notar que o limite de resistência e o módulo de elasticidade das amostras com 60 dias imersão foram superiores aos do grupo de controle e das amostras de 30 e 90 dias de imersão.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas da resina 3DLab Pro Alta Performance após ataque químico em óleo.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 3 – controle	20,53	3,35	235,52	21,65
Resina 3 - 30 dias	16,83	1,71	217,63	22,64
Resina 3 - 60 dias	26,49	5,19	298,17	40,25
Resina 3 - 90 dias	15,74	3,46	248,45	13,66

Fonte: elaborada pelo autor.

Com um comportamento mais estável que outras resinas avaliadas, independente do tempo de exposição, a resina Esun Hard Tough não apresentou mudança significativa no limite de resistência das amostras, conforme descrito na tabela 10. Dessa forma, pode-se inferir que a resina apresentou maior resistência à degradação química por petróleo. Apesar disso, é possível notar aumento significativo nos módulos de elasticidade nas amostras de 60 e 90 dias de exposição, que provavelmente está correlacionado com o tempo de cura estabelecido.

Tabela 11 - Propriedades mecânicas da resina Esun Hard Tough após ataque químico em óleo.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 4 – controle	18,98	1,49	192,28	14,38
Resina 4 - 30 dias	19,61	2,82	215,25	22,64
Resina 4 - 60 dias	19,85	1,25	228,88	3,57
Resina 4 - 90 dias	18,51	0,74	224,41	7,85

Fonte: elaborada pelo autor.

Sobre o aspecto das propriedades mecânicas da resina Esun Precision Model, pode-se notar que as amostras do grupo de controle apresentaram limites de resistência superiores aos das amostras com 30, 60 e 90 dias de imersão, em um nível de confiança de 95%. Apesar disso, não houve variação significativa no módulo de elasticidade das amostras independente do período de imersão em óleo.

Não houve variação significativa quando comparadas as propriedades mecânicas das resinas com 30, 60 e 90 dias de imersão. Dessa forma, é possível inferir que a degradação

química teve impacto nas propriedades mecânicas das amostras em um primeiro momento, porém, a evolução desses impactos não foi significativa em um período de até 90 dias de imersão.

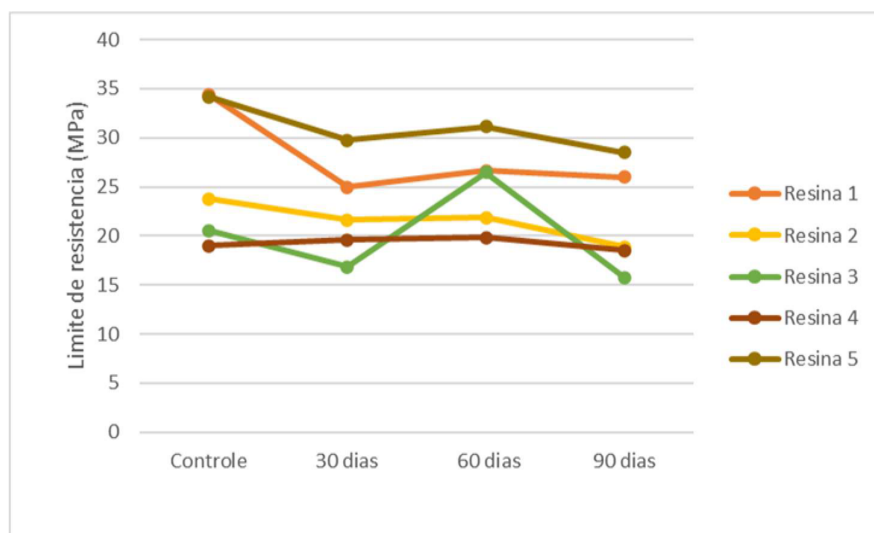
Tabela 12 - Propriedades mecânicas da resina Esun Precision Model após ataque químico em óleo.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 5 – controle	34,20	0,50	314,51	29,40
Resina 5 - 30 dias	29,76	1,39	316,41	39,98
Resina 5 - 60 dias	31,11	3,58	343,69	39,57
Resina 5 - 90 dias	28,53	1,69	330,50	23,28

Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos apontam que, de forma geral, as propriedades mecânicas são afetadas de forma negativa pela degradação química dos polímeros, conforme apontado na figura 17 e corroborado por Viana, Vasconcelos e Vasconcelos (2021). Por mais que tenha sido notado comportamento instável nas amostras das resinas que não atingiram os valores de resistência mecânicas próximo ao enunciado pelo fabricante.

Figura 17 – Gráfico de limite de resistência após inserção em óleo bruto.



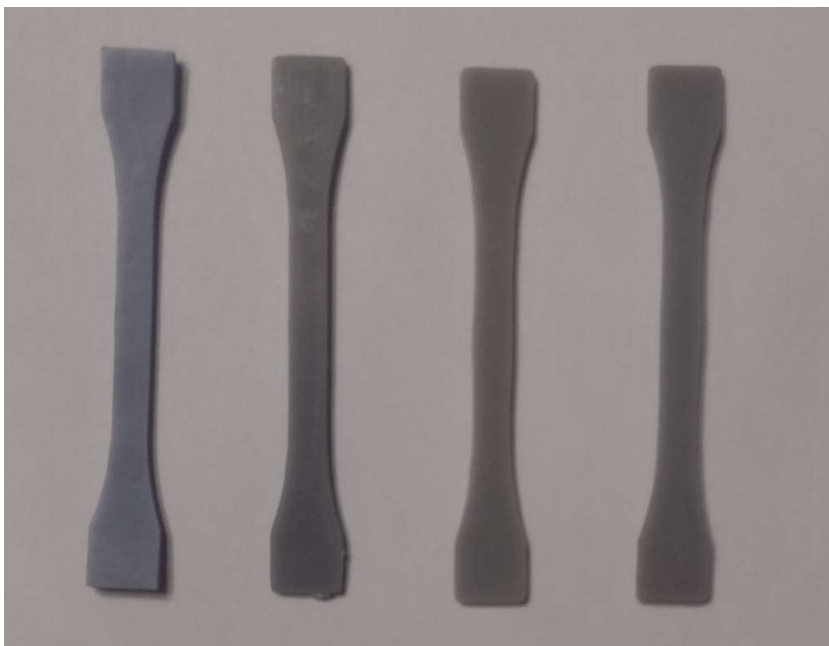
Fonte: elaborada pelo autor.

Nessa ótica, é possível inferir que o tempo de cura utilizado para o experimento, de uma hora, não foi adequado para as resinas 2, 3 e 4. Dado que, conforme Kim *et al.* (2020), o tempo de cura das amostras é um fator de alto impacto nas propriedades mecânicas de objetos manufaturados de resinas fotossensíveis, é provável que, caso as amostras tivessem tido tempo de cura apropriado, as propriedades mecânicas das amostras, após os ataques químicos em óleo, tivessem apresentado comportamento similar aos das resinas 1 e 5.

4.2.2 Imersão na atmosfera marinha

Assim como ocorrido nos ensaios de imersão em óleo cru, a seleção das resinas foi realizada com base nas informações dos fabricantes sobre o limite de resistência e módulo de elasticidade foi realizada da imersão em óleo cru, os corpos de prova das resinas 1, 2, 3, 4 e 5, impressos na direção flat, foram removidos após intervalos de 30, 60 e 90 dias. Por mais que os corpos de prova não tenham apresentado deformações físicas visuais, foi possível notar o aspecto visual fosco nos corpos de prova. A Figura 18 apresenta, da esquerda para direita, respectivamente, os corpos de prova: sem inserção, após 30 dias, após 60 dias e após 90.

Figura 18 - Aspecto visual dos corpos de prova após imersão na atmosfera marinha.



Fonte: elaborada pelo autor.

No aspecto das propriedades mecânicas, pode-se notar, na Tabela 12, que as amostras de controle da resina Anycubic Basic apresentaram limites de resistência inferiores aos das amostras de 30 dias de imersão e superiores aos das amostras de 90 dias de imersão, em um nível confiança de 95%. Apesar disso, o módulo de elasticidade das amostras de todos os períodos de imersão foi superior ao das amostras do grupo de controle.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas da resina Anycubic Basic após inserção em atmosfera marinha.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 1 – controle	34,40	5,94	328,3	15,64
Resina 1 - 30 dias	42,00	1,73	430,33	28,45
Resina 1 - 60 dias	37,00	4,36	451,67	2,52
Resina 1 - 90 dias	26,25	5,32	407,00	91,47

Fonte: elaborada pelo autor.

O processo de melhoria das propriedades mecânicas também foi observado na resina Anycubic Standard +. Como pode-se notar na Tabela 13, as amostras de controle da resina Anycubic Basic apresentaram limites de resistência e módulos de elasticidade inferiores aos das amostras de 30, 60 e 90 dias. Além disso, ocorreu uma redução significativa do limite de resistência quando comparadas as amostras de 60 e 90 dias de imersão.

Tabela 14 - Propriedades mecânicas da resina Anycubic Standard + após inserção em atmosfera marinha.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 2 – controle	23,77	2,05	220,50	14,76
Resina 2 - 30 dias	51,49	7,56	572,54	17,21
Resina 2 - 60 dias	56,81	2,11	593,55	35,79
Resina 2 - 90 dias	50,76	2,71	601,25	24,67

Fonte: elaborada pelo autor.

Além disso, foi possível notar comportamento mecânico similar entre a resina 3DLab Pro Alta Performance e a Anycubic Standard +, como pode ser observado na Tabela 14, pois ambas apresentaram limites de resistência e módulos de elasticidade inferiores aos das amostras de 30, 60 e 90 dias. Além disso, a resinas da 3DLab também tiveram suas propriedades mecânicas afetadas pela fotodegradação, dada a redução significativa no limite de resistência quando comparadas as amostras de 30 e 90 dias de imersão.

Tabela 15 - Propriedades mecânicas da resina 3DLab Pro Alta Performance após inserção em atmosfera marinha.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 3 – controle	20,53	3,35	235,52	21,65
Resina 3 - 30 dias	70,19	1,24	683,26	19,57
Resina 3 - 60 dias	65,24	1,80	651,16	32,08
Resina 3 - 90 dias	61,88	1,94	630,43	40,57

Fonte: elaborada pelo autor.

Nesta ótica, os limites de resistência e os módulos de elasticidade das amostras de controle da resina Esun Hard Tough também foram inferiores aos das amostras de 30, 60 e 90 dias de exposição. Porém diferente da resina 3 que teve uma redução progressiva nas propriedades mecânicas, só se pode observar a redução significativa no limite de resistência e no módulo de elasticidade após o período de 60 dias, como pode-se observar na tabela 15.

Tabela 16 - Propriedades mecânicas da resina Esun Hard Tough após inserção em atmosfera marinha.

Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 4 – controle	18,98	1,49	192,28	14,38
Resina 4 - 30 dias	56,08	0,54	560,45	14,03
Resina 4 - 60 dias	57,81	0,38	588,38	8,14
Resina 4 - 90 dias	41,05	1,75	437,36	5,57

Fonte: elaborada pelo autor.

Contudo, a resina Esun Precision Model foi a única dentro das analisadas que apresentou evidências estáticas, a um nível de 95% de confiança, de que o limite de resistência de fato atingiu valores superiores a 60 dias de exposição em comparação com as amostras de 30 e 90 dias de exposição, como pode ser observado na tabela 16. Mesmo assim, o limite de resistência e as amostras de controle foram inferiores aos das amostras de 30, 60 e 90 dias de exposição, como constatado nas demais resinas.

Tabela 17 - Propriedades mecânicas da resina Esun Precision Model após inserção em atmosfera marinha.

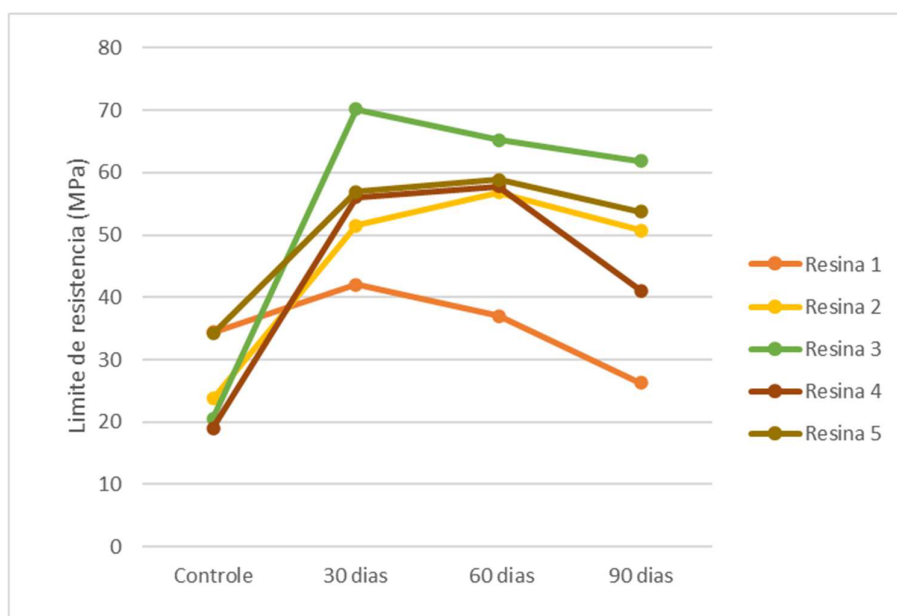
Materiais / posição de impressão	Limite de resistência (MPa)	Desv. Padr.	Módulo de elasticidade (MPa)	Desv. Padr.2
Resina 5 – controle	34,20	0,50	314,51	29,40
Resina 5 - 30 dias	56,93	0,45	550,12	46,44
Resina 5 - 60 dias	58,83	1,34	628,77	37,05
Resina 5 - 90 dias	53,72	0,97	586,89	31,76

Fonte: elaborada pelo autor.

Dessa forma, percebeu-se que, diferente do ocorrido nos testes de imersão em óleo, as resinas, apesar de serem produtos com composições distintas, apresentaram comportamento similar. Além disso, foi observado que, assim como em Garcia, Ayranci e Qureshi (2020), a

exposição à radiação UV a períodos prolongados pode aumentar a resistência mecânica das resinas fotossensíveis até um determinado limite, como exemplificado na figura 19.

Figura 19 – Gráfico de limite de resistência após inserção em atmosfera marinha.



Fonte: elaborada pelo autor.

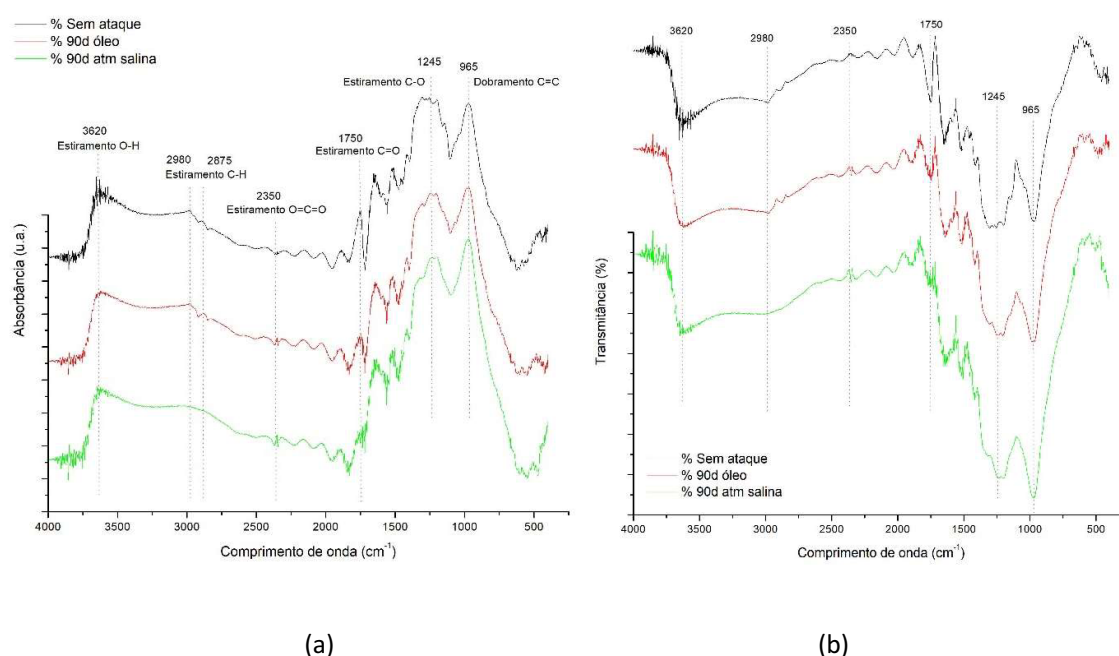
Porém, também foi observado em todos os produtos testados que, após atingidos os limites onde a resina estiver completamente curada, as matrizes poliméricas apresentam reduções no limite de resistência ou no módulo de elasticidade. Conforme Bazli et al. (2020), essa alteração das propriedades mecânicas de matrizes poliméricas está intimamente ligada à fotodegradação da radiação solar, mesmo que não se possa descartar a possibilidade de degradação química devido à interação da atmosfera marinha com a superfície da resina.

4.3 Aferição das propriedades físico-químicas após ataque químico

Dado comportamento mecânico da resina Anycubic Basic nos ensaios de tração, foram os corpos de prova submetidos a imersão foram avaliados através das técnicas de FTIR e

espectroscopia UV-VIS a fim de verificar possíveis alterações nas propriedades físico-químicas do material antes e após os ataques químicos em óleo e névoa salina. A Figura 20a e b apresenta as curvas normalizadas para os materiais sem ataque, com ataque de 90 dias em óleo e com ataque de 90 dias em atmosfera controlada. Os gráficos apresentam a absorbância e a transmitância para um comprimento de onda entre 4000 e 200 cm^{-1} .

Figura 20 - Ensaio FTIR normalizado: (a) absorbância; (b) transmitância das amostras sem ataque, 90 dias em óleo e 90 dias em atmosfera salina.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

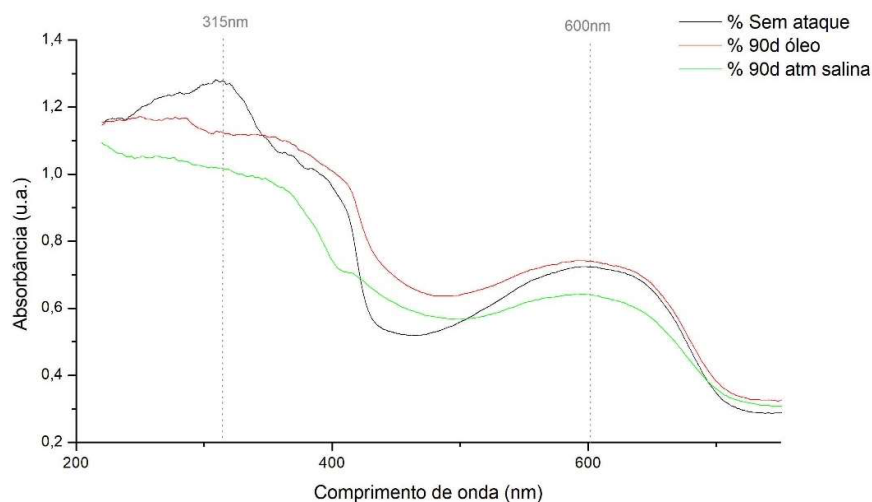
Alguns dos picos nos espectros das amostras estão diretamente relacionados com os tipos de ligações químicas, sua intensidade e sua morfologia. Para os materiais estudados, podem-se destacar os picos: 965 cm^{-1} , relacionado ao dobramento da ligação C=C; 1275 cm^{-1} , relacionado ao estiramento da ligação C-O; 1750 cm^{-1} , relacionado ao estiramento da ligação C=O (carbonila); 2350 cm^{-1} , relacionado ao estiramento da ligação O=C=O; 2980 e 2875 cm^{-1} , relacionados aos estiramento da ligação C-H; a faixa 3620 cm^{-1} , relacionada ao estiramento da ligação O-H (hidroxila) (JAWAD; AL-HAMDANI; HASAN, 2016; SHANTI *et al.*, 2017).

A degradação do material atinge diretamente algumas ligações, causando modificações importantes nas suas estruturas. Nas curvas normalizadas da Figura 20, podem ser

evidenciadas alterações na intensidade de alguns picos, em especial no aumento da intensidade nas regiões de 3600 cm^{-1} , e uma diminuição dos picos nas regiões de 2950 cm^{-1} e 1750 cm^{-1} . Os processos oxidativos e foto-oxidativos do material podem explicar o aumento na intensidade do pico na região do 3600 cm^{-1} para as amostras em óleo e em atmosfera salina, quando comparadas com a amostra sem ataque. Esse aumento está relacionado aos produtos hidroxílicos do processo foto-oxidativo. (DECKER; ZAHOUILY, 1999; SHANTI *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2018). A diminuição do pico na região 1750 cm^{-1} é resultado do processo oxidativo do composto carbonila, ocasionada pela clivagem das ligações cruzadas que são evidenciadas a uma exposição à radiação UV superior a 240 minutos. Esse processo resulta, ainda, no aumento das unidades de éster decompostas, que pode ser observado com a redução de intensidade do pico na região de 1245 cm^{-1} (SHANTI *et al.*, 2017).

Cromóforos são formados e decompostos conforme as reações de oxidação e fotodegradação que vão ocorrendo no material exposto a diferentes condições. Para o material estudado, é possível notar, nos ensaios de espectroscopia UV-Vis da Figura 21, a formação de um pico na região 315nm. Picos na faixa de 250 a 350nm correspondem a cromóforos carbonílicos, que corroboram os picos encontrados na Figura 20, na região de 1750 cm^{-1} (SHANTI *et al.*, 2017).

Figura 21 - Ensaio espectroscopia UV-VIS de absorbância normalizado das amostras sem ataque, 90 dias em óleo e 90 dias em atmosfera salina.



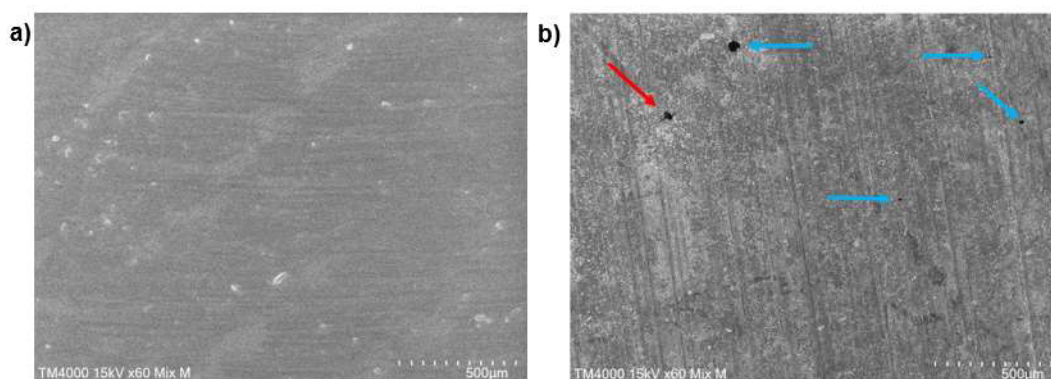
Fonte: elaborado pelo autor.

A degradação das ligações carbonila, identificadas, na Figura 20, com o decaimento do pico na região 1750 cm^{-1} , pode ser confirmada com os ensaios de espectroscopia de UV-VIS. O mesmo decaimento nos materiais atacados por óleo e por atmosfera salina são observados nas curvas da Figura 21. A diminuição inicial da intensidade do pico C=O (carbonila) em 315nm é explicada pelo rompimento fotoquímico da ligação π em C=O, que posteriormente causa redução na concentração. O elétron na ligação π sofre fotoexcitação do estado fundamental para o estado de maior energia (transição π / π^*) e quebra a ligação, resultando, assim, na diminuição do pico no gráfico (SHANTI *et al.*, 2017).

Contudo, a degradação fotoquímica também pode ser observada no microscópio eletrônico de varredura, assim como no estudo conduzido por Bazli *et al.* (2020). Durante a avaliação dos corpos de prova com 90 dias de exposição da resina Anycubic Basic, pôde-se notar que pontos com vazios gerados pelos raios ultravioletas são pontos com alta susceptibilidade de formação de trincas.

Na Figura 22a, é apresentada a microscopia de um corpo de prova da resina 1 pertencente ao grupo de controle, o qual não foi inserido na atmosfera marinha. Em contraste, na figura 22b pode-se notar uma trinca nucleada em um ponto de vazio, indicada por uma seta vermelha, e demais pontos de vazios, indicados por setas azuis.

Figura 22 - Microscopia eletrônica de varredura da amostra após exposição a UV e atmosfera marinha: a) referência; b) 90 dias de exposição.



Fonte: elaborada pelo autor.

Essas inclusões corroboram a eventual perda de resistência mecânica observada nos testes de tração após a exposição à atmosfera marinha e ultravioleta, visto que, apesar de não contribuírem para deformações físicas da amostra, os pontos de alteração do material

podem ser tratados como inclusões e se comportar como concentradores de tensão, diminuindo, assim, o limite de resistência (BAGGIO *et al.*, 2022).

O ensaio de rugosidade foi utilizado para aferir as alterações superficiais encontradas na microscopia eletrônica de varredura e nas análises de FTIR e UV-Vis. O resultado do ensaio pode ser visto na Tabela 17.

Tabela 18 - Resultados do teste de rugosidade.

Resina	Ra (μm)	Rz (μm)
Resina Anycubic Basic – controle	0,385	1,175
Resina Anycubic Basic – 90d em óleo	0,57	3,703
Resina Anycubic Basic – 90d em ATM	0,678	0,4171
Anycubic Standard + – controle	0,331	3,496
Anycubic Standard + – 90d em óleo	0,629	3,027
Anycubic Standard + – 90d em ATM	0,528	3,05
Esun Precision Model – controle	0,321	0,984
Esun Precision Model – 90d em óleo	0,365	2,82
Esun Precision Model – 90d em ATM	0,421	3
3DLab Pro – Controle	0,348	2,332
3DLab Pro – 90d em óleo	0,793	3,816
3DLab Pro – 90d em ATM	1,113	6,792
Esun Hard Tough – controle	0,488	3,378
Esun Hard Tough – 90d em óleo	0,618	3,582
Esun Hard Tough – 90d em ATM	0,779	3,269

Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados demonstram um aumento da rugosidade superficial após o ataque em óleo e atmosfera marítima. O aumento do valor de Ra comprova que a degradação observada na microscopia eletrônica de varredura, com a presença de furos e fissuras na superfície do material, se deve ao início do mecanismo de degradação. Os valores de Rz tiveram comportamento menos estável e direcional, já que sua obtenção é a soma da maior altura de um vale e um pico. Tal fenômeno pode se dar pela presença de alguma impureza no material ou pela degradação não uniforme na superfície, ocasionando aumento topográfico da amostra.

As modificações superficiais da amostra, ocasionadas pelos diferentes ataques em óleo ou em atmosfera marítima, podem ser responsáveis pelo aumento de tensões residuais na superfície do material. O aumento da rugosidade e a diminuição nos valores de resistência à tração podem ser resultado desse mecanismo de degradação (KIM *et al.*, 2022). A radiação UV, alinhada com a degradação química imposta pelo ambiente marinho, tem forte influência na perda das propriedades dos materiais plásticos, corroborada pelas alterações presentes nos diferentes ensaios apresentados neste trabalho.

4.4 Impressão de um vaso de pressão em escala reduzida

Visto que os mecanismos de degradação, que foram observados em um período de 90 dias, nos testes de ataque químico e imersão, não apresentaram uma ameaça grave à integridade do material, foram manufaturados quatro exemplares de vasos pressão em miniatura com espessura de parede de 1mm, 1,5mm e 2mm, figura 23. A resina selecionada foi a Esun Precision Model, o critério utilizado foi o limite de resistência da resina após o período de 90 dias de imersão em óleo e atmosfera marinha.

Figura 23 – Protótipos manufaturados.



Fonte: elaborada pelo autor.

Os protótipos passaram por teste hidrostático até a ruptura, conforme metodologia proposta. Com isso, foi possível observar que a pressão ruptura real teve um valor de pelo menos 20% superior à pressão de ruptura teórica calculada pela equação 3 com as propriedades mecânicas do grupo de controle da resina, conforme exposto na tabela 20.

Tabela 19 - Resultados do teste hidrostático: pressões reais e teóricas.

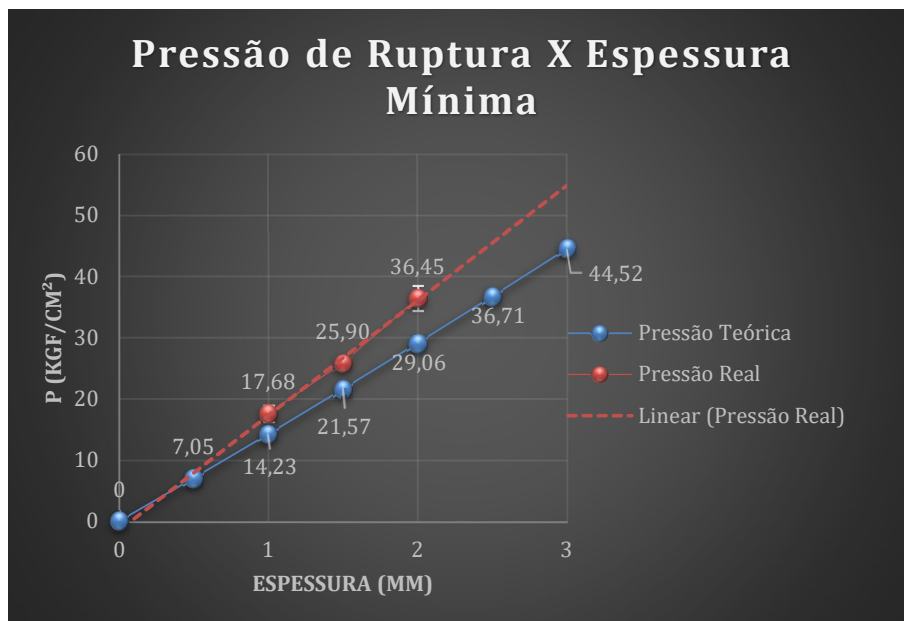
Espessura (mm)	Pressão teórica (Kgf/cm²)	Pressão real (Kgf/cm²)	Desvio padrão	Diferença (%)
1	14,23	17,68	1,26	24,17%
1,5	21,57	25,90	0,85	20,06%
2	29,06	36,45	2,04	25,42%

Fonte: elaborada pelo autor.

Contudo, o aumento expressivo na pressão de ruptura está relacionado ao aumento no tempo de pós-cura das amostras, visto que os corpos de prova confeccionados para os testes de tração, nos quais se obtiveram as propriedades mecânicas para o cálculo da pressão teórica de ruptura, foram submetidos a um processo de pós-cura com 1 hora a menos que os protótipos dos vasos de pressão. Com isso, já era esperado que a pressão de ruptura real fosse superior, visto que o tempo de pós-cura tem influência nas propriedades mecânicas, conforme enunciado por Kim *et al.* (2020) e observado nos ensaios de exposição à radiação UV e à atmosfera marinha.

Apesar do desvio nos valores absolutos da pressão de ruptura, é possível notar que, assim como os valores teóricos dimensionados a partir de equação 3, a pressão de ruptura e a espessura do vaso de pressão seguem uma relação muito similar a uma progressão linear, explicitada na Figura 24. Dessa forma, é possível inferir que os componentes confeccionados se comportaram de acordo com as teorias de vasos de pressão de paredes finas, conforme esperado (FIGUEIREDO, 2022).

Figura 24 - Gráfico de pressão de ruptura x espessura mínima.

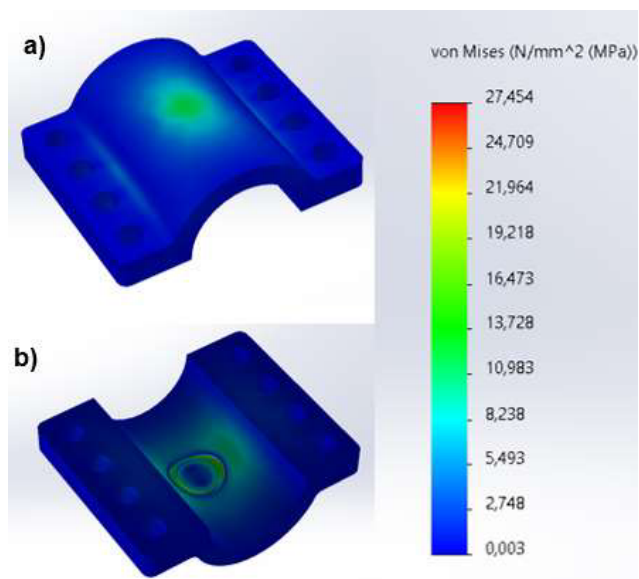


Fonte: elaborada pelo autor.

4.5 Proposição, projeto e simulação de reparo tipo luva

Como foi observado que o material teve comportamento compatível com a teoria de vasos de pressão de paredes finas, foi realizada a proposição, o projeto e a simulação de reparo tipo *clamp* submetido à pressão interna de 1100 PSI, conforme a metodologia proposta. Conforme apresentado na figura 25a e b, foi possível notar que a tensão máxima a qual o material foi submetido (27,454 MPa) foi inferior à tensão média de ruptura da resina Esun Precision Model (28,53 MPa) no pior cenário analisado neste trabalho, com pós-cura de uma hora e exposição de 90 dias em óleo bruto.

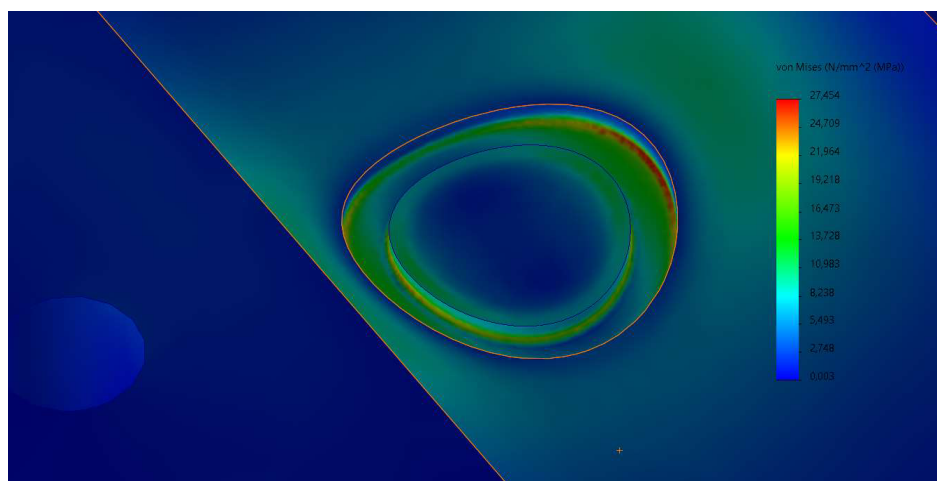
Figura 25 - Simulação do *clamp*: (a) vista externa;(b) vista interna.



Fonte: elaborada pelo autor.

Além disso, foi observado que os pontos simulados nos quais o material esteve submetido à maior tensão foram as fronteiras da região de alocação do elemento de vedação, conforme mostra a figura 26. Essas regiões têm espessura inferior às demais regiões pressurizadas e funcionam como concentradores de tensão (ZHAO *et al.*, 2020).

Figura 26 - Simulação do *clamp*, detalhe de pontos de concentração de tensão.



Fonte: elaborada pelo autor.

Com esses resultados obtidos na simulação e nas discussões promovidas até o momento, é possível inferir que o reparo proposto é compatível com a realidade da indústria do petróleo, por mais que tensões simuladas estejam muito próximas ao limite de resistência do material no pior cenário analisado, pois devem ser levados em consideração os seguintes fatores:

- A pressão simulada, com exceção das linhas de gás, é pelo menos 5 vezes superior às pressões de operação dos fluidos apontados na Tabela 1.
- O limite de resistência do material após 90 dias de ataque químico por óleo bruto pode ser aumentado de forma significativa caso seja possível realizar um processo de pós-cura de um tempo superior, conforme observado nos testes de pressão dos vasos em escala reduzida.
- As bandagens de reparos emergenciais atualmente disponíveis no mercado têm pressão de trabalho significativamente inferior à pressão de trabalho simulada. Por exemplo, existem a Tape Glass, com pressão de trabalho de 600 PSI, e a SeaLUX 1900, com pressão de trabalho de 450 PSI.

5 CONCLUSÃO

Após a análise geral dos resultados e das discussões apresentadas no decorrer do trabalho, constata-se que é possível realizar reparos em tubulações de petróleo com resinas fotossensíveis, tendo em vista que os testes e simulação apresentados indicam que:

- A exposição das amostras ao óleo bruto, de modo geral, diminuiu o limite de resistência e o módulo de elasticidade do material em um primeiro momento. Porém, não se pôde encontrar evidências de que os danos relacionados à degradação química evoluíram de forma catastrófica em um período de até 90 dias.
- Todos os produtos testados, quando expostos à atmosfera marinha, apresentaram um incremento inicial nas propriedades mecânicas devido a um processo de pós-cura. Contudo, os limites de resistência e o módulo de elasticidade do material começaram a diminuir, após determinado período, devido à ação da fotodegradação.
- Com os ensaios complementares, foi possível encontrar evidências de que a exposição das resinas ao óleo e à atmosfera marinha trazem mudanças físicas e químicas que corroboram as alterações dos resultados encontrados nos ensaios mecânicos.
- Os testes de pressão nos vasos de escala reduzida apontaram que o material se comporta como esperado pela teoria de vasos de paredes finas.
- Apesar de ter sido realizada uma simulação de *clamp* para reparo em uma linha de 2" sch 40, a metodologia aplicada neste trabalho pode ser adaptada para linhas de outras dimensões e classes de espessura.
- Com a simulação, foi possível mostrar que o reparo pode ser utilizado a pressões compatíveis com as pressões das bandagens disponíveis no mercado e com as pressões de operação da maioria dos fluidos de unidades flutuantes de processamento primário.

De fato, a possibilidade de fazer uma impressão 3D de reparo de tubulação para a manutenção de uma plataforma de petróleo é algo que pode combater os problemas de logística típicos desse ambiente. As possibilidades da combinação dessa tecnologia com gêmeos digitais, outra tecnologia da indústria 4.0, deixam os projetistas com alto potencial para criação.

Por mais que existam muitas vantagens em reparar tubulações por meio de manufatura aditiva, é importante reconhecer a falta de conhecimento dos mecanismos de dano do material base da tubulação a longo prazo. Mesmo que todos os testes propostos neste trabalho

apontem que o reparo proposto pode ser utilizado de forma segura, a confiabilidade e a integridade das tubulações devem continuar sendo estudadas até esse tipo de material ser amplamente empregado em unidades *offshore* ao longo de anos.

Além disso, é necessário apontar que toda a metodologia deste trabalho foi desenvolvida para aplicações de reparos em linhas de petróleo à temperatura ambiente. A aplicação desse tipo de material em outros fluidos ou em outras temperaturas de operação deve ser avaliada em trabalhos futuros.

Apesar disso, o emprego desses materiais associados a aplicações de baixo risco operacional é uma situação muito promissora em um primeiro momento. Ainda que exista a tendência de se mitigar os riscos no meio *offshore*, essa indústria, historicamente, sempre apostou em tecnologias inovadoras que agregam valor e tentam otimizar o tempo.

6 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Apesar de ter sido demonstrado no trabalho que os reparos de tubulações com resinas fotossensíveis podem ser uma alternativa viável para a indústria *offshore*, ainda podem ser exploradas alternativas para desenvolver o projeto e aplicar a tecnologia sugerida de forma mais eficaz na indústria do petróleo. Dado esse panorama, são propostas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Testes de ataque químico de resinas fotossensíveis com outros fluidos encontrados nas unidades de processamento primário.
- Manufatura do *clamp* proposto e teste hidrostático do protótipo.
- Teste de pressão de longa duração de vasos de pressão ou reparos manufaturados com o material proposto.
- Incorporação de aditivos e estudos com novas resinas, a fim de se obter propriedades mecânicas superiores às resinas disponíveis durante a elaboração deste trabalho.
- Criação de uma metodologia para encontrar um tempo de cura das resinas que seja ideal para o projeto de um reparo de tubulação.
- Desenvolvimento de metodologia e de testes para aplicação dos reparos propostos para temperaturas diferentes da temperatura ambiente.

REFERÊNCIAS

3D LAB. Impressora 3D DLP: aprenda como funciona essa tecnologia. **3D LAB**, 2020. Disponível em: <https://3dlab.com.br/impressora-3d-dlp/>. Acesso em: 17 nov. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Painéis dinâmicos sobre exploração e produção de petróleo e gás. **Gov.br**, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas>. Acesso em: 20 jul. 2021.

ALCANTAR-MARTÍNEZ, Laura Montserrat et al. Improving the Surface Properties of an API 5L Grade B Pipeline Steel by Applying the Boriding Process—Part II: On the Changes in the Mechanical Properties. *Coatings*, v. 13, n. 2, p. 470, 2023.

ALMEIDA, Antonio Gabriel Souza; ALVES, Tamires Pereira. Utilização da engenharia reversa e da manufatura aditiva na fabricação de peças de reposição: uma alternativa para manutenção de equipamentos médico-hospitalares. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 12, n. 3, 2020.

ALMEIDA, Lucas Evangelista de *et al.* Proposta de utilização de drones inteligentes na inspeção de plataformas de petróleo. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 45124-45136, 2021.

ALMEIDA JÚNIOR, José Humberto Santos. **Dano e falha em compósitos estruturais de carbono/epóxi processados por filament winding**. 2016. 162f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

ALVES, Rafael da Silva; AROUCHE, Marcio Moreira. Uso de compósitos em reparos na indústria naval e offshore. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, ano 05, ed. 05, v. 07, p. 62-81, 2020.

AMAECHI, Chiemela Victor *et al.* Review on fixed and floating offshore structures. Part I: Types of platforms with some applications. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 8, p. 1074, 2022.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Repair of pressure equipment and piping**: ASME PCC-2. New York: ASME, 2018.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Code for pressure piping**: ASME B31.3 process piping. New York: ASME, 2020.

ARAUJO, Sandro Santos Pires *et al.* Using Composite as a long-term repair on pressure boundary components in the offshore industry. In: **Offshore Technology Conference**, 2020.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO/ASTM 52900:2018 Manufatura Aditiva Princípios Gerais Terminologia. ABNT/CEE-261 Manufatura Aditiva, Rio de Janeiro RJ, Brasil, 2018.

AZEVEDO, Alexsander Wellington Nunes de. **Gestão de segurança operacional na indústria de petróleo e gás**: estudo de caso de uma unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência de petróleo. 2019. 2013f. Tese (Mestrado em Segurança e

Saúde do Trabalho) – Escola Superior de Tecnologia da Saúde de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2019.

AZRAAI, S. N. A. *et al.* Effect of silica sand filler on mechanical properties of epoxy grout for composite repair of steel pipelines. **Materials Performance and Characterization**, v. 9, n. 1, p. 1-8, 2020.

BAGGIO, Ailton *et al.* Obtenção de compósitos de baixa densidade e sua caracterização a partir do processo de laminação manual Hand Lay-Up com matriz poliéster insaturada reforçada com fibra de vidro. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, 2022.

BAZLI, Milad *et al.* Mechanical properties of pultruded GFRP profiles under seawater sea sand concrete environment coupled with UV radiation and moisture. **Construction and Building Materials**, v. 258, p. 120369, 2020.

BIEZMA, M. V. *et al.* Most fatal oil & gas pipeline accidents through history: A lessons learned approach. **Engineering failure analysis**, v. 110, p. 104446, 2020.

CAIXETA, Danila; MORAIS, Eduardo. Panorama mundial de produção de plástico e estratégias de degradação. **Enciclopédia Biosfera**, v. 19, n. 39, 2022.

CULMONE, Costanza; SMIT, Gerwin; BREEDVELD, Paul. Additive manufacturing of medical instruments: a state-of-the-art review. **Additive Manufacturing**, v. 27, p. 461-473, 2019.

CURSO DE FORMAÇÃO DE BOMBEIROS CIVIS. **Apostila de estudos**. [S.l.: s.n.], 2021.

DECKER, C.; ZAHOUILY, K. Photodegradation and photo-oxidation of thermoset and UV-cured acrylate polymers. **Polymer Degradation and Stability**, v. 64, n. 2, p. 293-304, 1999.

DENTI, Andressa Franco; DALLAGO, Rogério Marcos; STEFFENS, Juliana. Engenharia de segurança contra incêndios: uma breve revisão a respeito do princípio de incêndios, classificações gerais e medidas de proteção. **Revista Perspectiva**, v. 46, n. 174, p. 7-16, 2022.

DJUKIC, Luke P. *et al.* Development of a fibre reinforced polymer composite clamp for metallic pipeline repairs. **Materials & Design**, v. 70, p. 68-80, 2015.

FIDUNIV, Daniel. Análise da corrosão em polímeros, termofixos e elastômeros. **Revista Innovatio**, ano 6, v. 3, 2019.

FIGUEIREDO, Carolina Della Ricco. **Metodologia numérica para a análise de tensões elásticas no projeto por análise de vasos de pressão nucleares**. 2022. 122f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) – Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2022.

FRANCESCHI, Sabrina; ENZWEILER, Heveline. Simulação de rede de integração energética nas etapas de pré-aquecimento e dessalinização do petróleo. Simulation of energy integration network in the oil preheating and desalination stages. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 88016-88036, 2021.

GARCIA, Elisa Aznarte; AYRANCI, Cagri; QURESHI, Ahmed Jawad. Material property-manufacturing process optimization for form 2 vat-photo polymerization 3D Printers. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 4, n. 1, p. 12, 2020.

GOES, Robson Oliveira. **Análise da degradação acelerada por umidade e radiação UV de vernizes para proteção do aço**. 2020. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2020.

HOSSEINABADI, Hossein Goodarzi *et al.* Ink material selection and optical design considerations in DLP 3D printing. **Applied Materials Today**, v. 30, p. 101721, 2023.

JAWAD, Inas A. M.; AL-HAMDANI, Ammar A.; HASAN, Rizgar M. A. Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy of modified heat cure acrylic resin denture base material. **International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering**, v. 5, n. 4, p. 130-140, 2016.

KIM, Dohyun. *et al.* Effects of post-curing time on the mechanical and color properties of three-dimensional printed crown and bridge materials. **Polymers**, v.12, n.11, p.2762, 2020.

KIM, Sunwoo *et al.* Analysis of mechanical property degradation of outdoor weather-exposed polymers. **Polymers**, v. 14, n. 2, p. 357, 2022.

KOUKETSU, Fernanda *et al.* Abrasive wear resistance of idler roll polymeric materials. **Surface Topography: Metrology and Properties**, v. 10, n. 3, p. 034002, 2022.

KOUSHIK, Bangalore Gangadharacharya *et al.* Review on modelling of corrosion under droplet electrolyte for predicting atmospheric corrosion rate. **Journal of Materials Science & Technology**, v. 62, p. 254-267, 2021.

LAVOIE, Fernando Luiz *et al.* Durability of HDPE geomembranes: an overview. **Química Nova**, v. 43, p. 656-667, 2020.

LEON, Al Christopher C. de *et al.* High performance polymers for oil and gas applications. **Reactive and Functional Polymers**, v. 162, p. 104878, 2021.

LOVO, João Fiore Parreira *et al.* Vat photopolymerization additive manufacturing resins: analysis and case study 1. **Materials Research**, v. 23, 2020.

MACHADO, Letícia Carvalho. Processamento Primário de Fluidos na Produção de Petróleo. **Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas**, UNIT-SERGIPE, v. 2, n. 3, p. 11-20, 2015.

MACIEL, Fernando *et al.* Renda do petróleo: uma revisão sistemática da literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e38110918320-e38110918320, 2021.

MAHDI, Elsadig.; ELTAI, E. Development of cost-effective composite repair system for oil/gas pipelines. **Composite Structures**, v. 202, p. 802-806, 2018.

MENA, Rodrigo *et al.* Fotodegradação de polímeros acompanhada por infravermelho: um tutorial. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 4, p. 959-968, 2020.

MOSQUEN, A. *et al.* Estudo teórico da influência da força de aperto em reparos por dupla calha com interferência (tipo A). In: **13ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos**, Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, 2015.

NEWELL, Richard *et al.* **Global energy outlook 2021**: pathways from Paris. Washington, DC: Resources for the Future, 2021.

PARIZE, Hian Nivaldo *et al.* Modelos para próteses fixas obtidos por manufatura aditiva: uma revisão sistemática. **Brazilian Oral Research**, v. 34, p. 440, 2020.

PEREIRA, Aldo Santos *et al.* Soldagem em operação de dutos de alta resistência e baixa espessura com ênfase nas trincas a frio. **Soldagem & Inspeção**, v. 17, n. 2, p. 88-95, 2012.

PETROBRAS. Fatos e dados. **Petrobras**, 2019. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/iniciamos-producao-da-p-77-quarta-plataforma-do-campo-de-buzios-no-pre-sal-da-bacia-de-santos.htm>. Acesso em: 07 abr. 2022

PINTO, Mike Alves. Estudo de caso em construção e montagem de plataforma de petróleo. **Boletim do Gerenciamento**, v. 23, n. 23, p. 25-33, 2021.

PIVESSO, Bruno Pasquini. **Efeito da velocidade de polimerização na qualidade da impressão 3D DLP de uma resina odontológica experimental fotopolimerizável**. 2018. 73f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

POTI, Leonardo; POMAR, Alina. Use of horizontal drilling and thruster technologies for a fast-track repair of a pipeline in Nikaitchuq Oil Field - Alaska. In: **OMC Med Energy Conference and Exhibition**, 2021.

ROCHA, Mirella Lopes da. **Efeito do envelhecimento acelerado em compósitos utilizados para recuperação de dutos na indústria petrolífera**. 2021. 118f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2021.

RUBINO, Felice *et al.* Marine application of fiber reinforced composites: z review. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 1, p. 26, 2020.

SAINI, J. S. *et al.* Investigations of the mechanical properties on different print orientations in SLA 3D printed resin. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, v. 234, n. 11, p. 2279-2293, 2020.

SCHWEITZER, Philip A. **Fundamentals of corrosion**: mechanisms, causes, and preventative methods. Nova York: Taylor & Francis Group, 2010.

SHAFIQ, Umar *et al.* A review on modeling and simulation of blowdown from pressurized vessels and pipelines. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 133, p. 104-123, 2020.

SHANTI, R. *et al.* Degradation of ultra-high molecular weight poly (methyl methacrylate-co-butyl acrylate-co-acrylic acid) under ultra violet irradiation. **RSC Advances**, v. 7, n. 1, p. 112-120, 2017.

STEPANHA, Amanda Sofia de Guimarães. **Avaliação da resistência química e mecânica de blendas de resina epóxi para aplicação em operações de reparo e abandono de poços de petróleo e de armazenamento geológico de CO₂**. 2021. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2021.

VALE, Renato Gomes de Souza Vale Junior *et al.* A priorização dos investimentos em petróleo e gás: uma revisão sistemática. **Mundo Livre: Revista Multidisciplinar**, v. 5, n. 2, p. 40-53, 2019.

VIANA, Edjardi de Pontes; VASCONCELOS, Marcelo Gadelha; VASCONCELOS, Rodrigo Gadelha. Análise do comportamento da resina composta frente aos diferentes mecanismos de desgaste: uma revisão de literatura. **Salusvita**, v. 40, n. 1, p. 158-178, 2021.

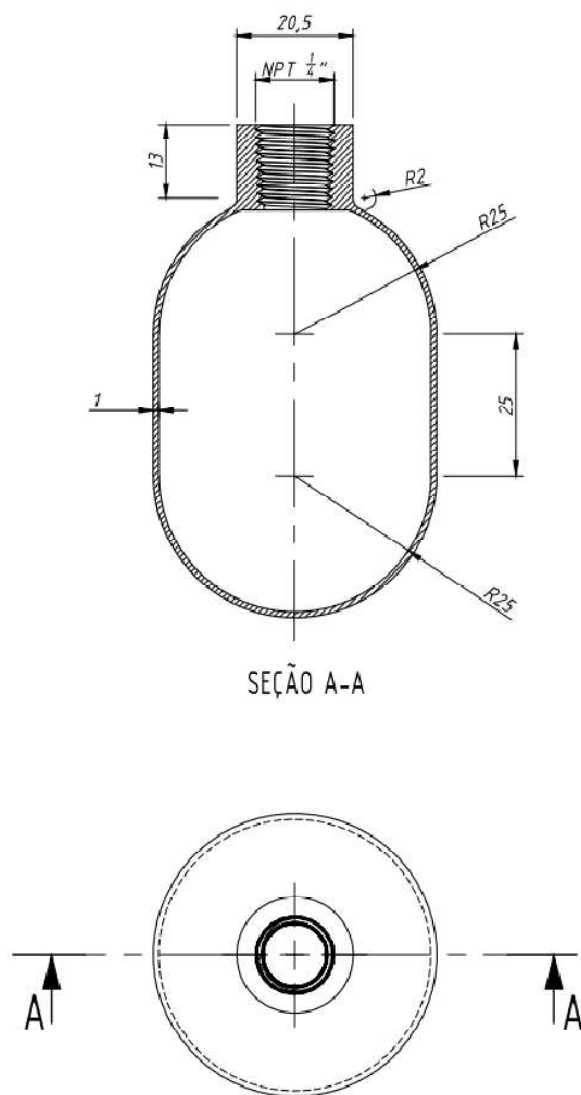
YUAN, Shining; LV, Guanglei. Application of nano composite ceramic anti-corrosion coiled material in trenchless repair of underground pipeline. In: **Proceedings of 2021 China-Europe International Conference on Pipelines and Trenchless Technology**, p. 125-131, 2023.

ZHANG, Xu; NI, Wenchi; SUN, Liping. Fatigue analysis of the oil offloading lines in FPSO system under wave and current loads. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 2, p. 225, 2022.

ZHANG, Xueqian *et al.* Aiming. Acrylate-based photosensitive resin for stereolithographic three-dimensional printing. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 136, n. 21, p.47487 - 47497, 2018.

ZHAO, B. J. *et al.* Circumferential sealing structure of a subsea oil and gas pipeline repair clamp. **Strength of Materials**, v. 52, p. 59-70, 2020.

Anexo 1: Detalhamento técnico, folha 1 de 4.

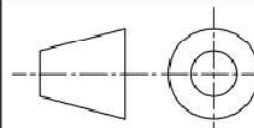


Título: Frasco para teste de pressão - espessura de parede 1mm

Nome: Henrique S. Ligeiro

Prof. Artur Caron Mottin

Mestrado em Eng. Mecânica

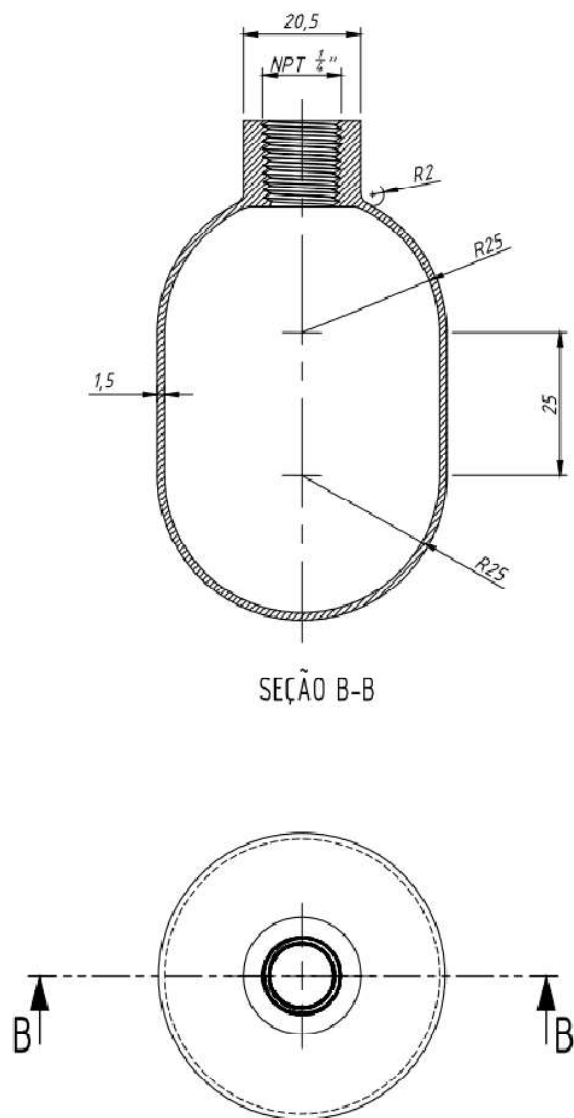


Data: 31/05/2023

Escala: 1 : 1

Folha: 01 de 04

Anexo 2: Detalhamento técnico, folha 2 de 4.

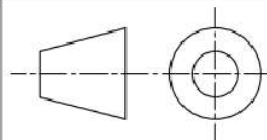


Título: Frasco para teste de pressão - espessura de parede 1,5mm

Nome: Henrique S. Ligeiro

Prof. Artur Caron Mottin

Mestrado em Eng. Mecânica

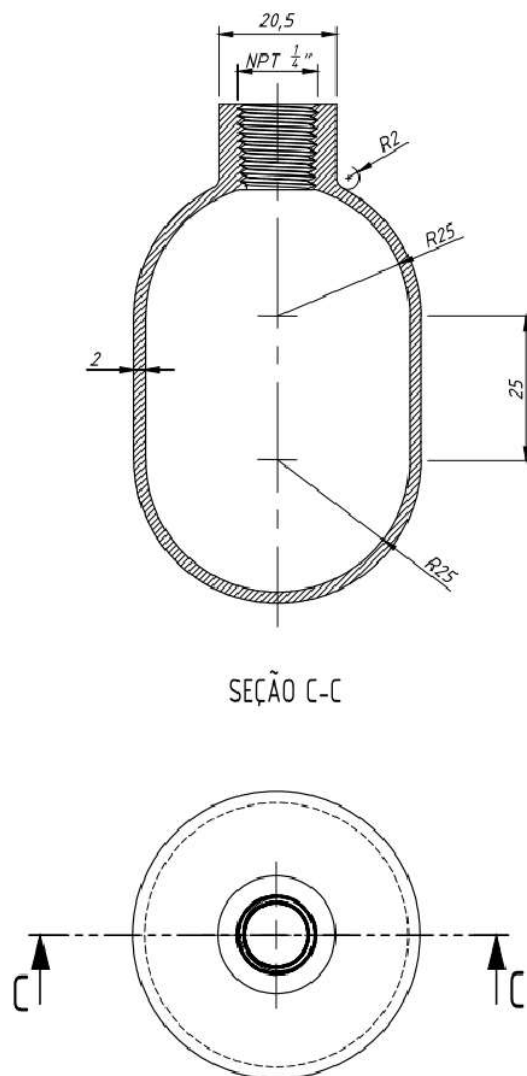


Data: 31/05/2023

Escala: 1 : 1

Folha: 02 de 04

Anexo 3: Detalhamento técnico, folha 3 de 4.

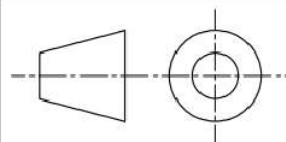


Título: Frasco para teste de pressão - espessura de parede 2mm

Nome: Henrique S. Ligeiro

Prof. Artur Caron Mottin

Mestrado em Eng. Mecânica

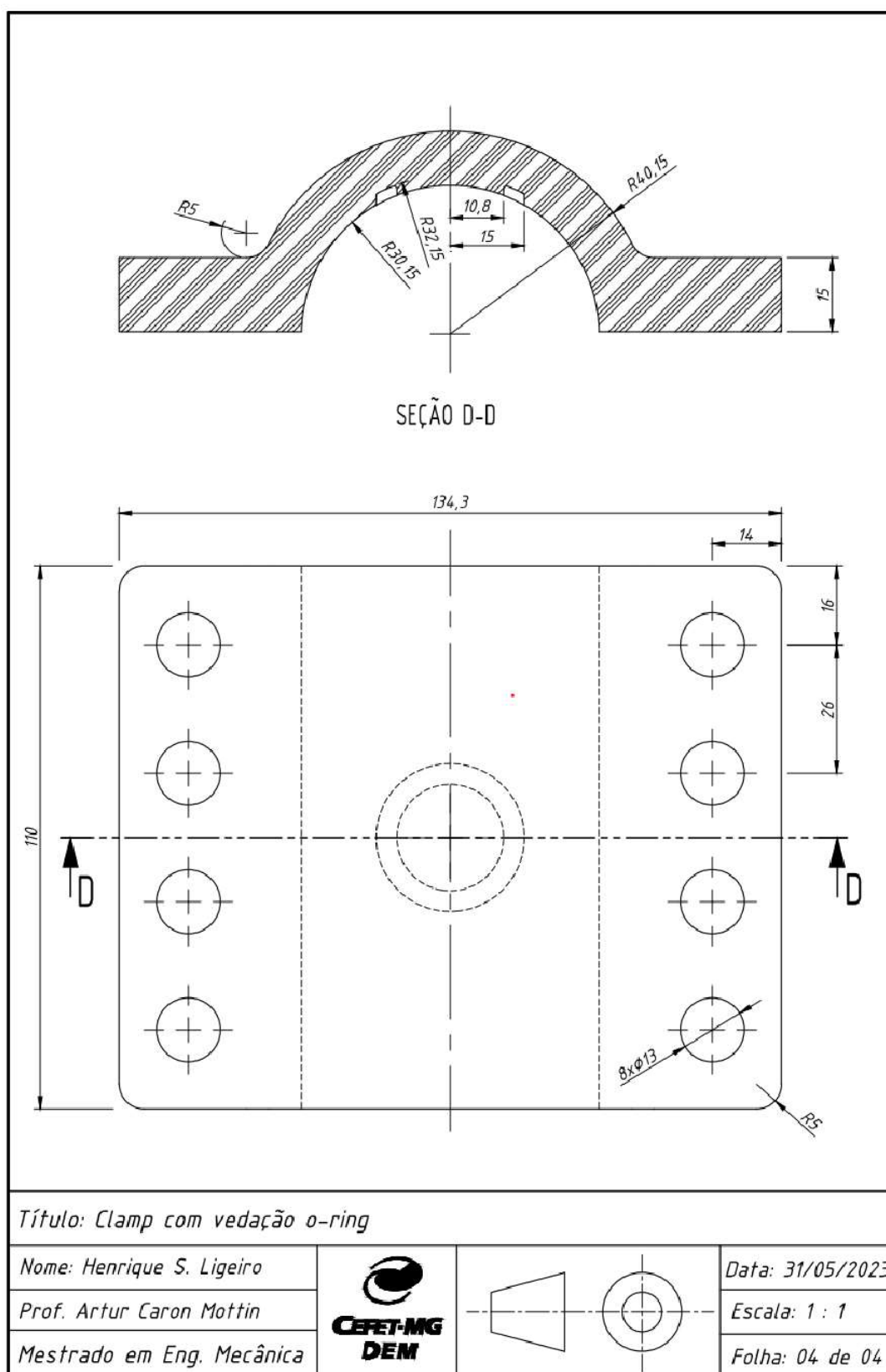


Data: 31/05/2023

Escala: 1 : 1

Folha: 03 de 04

Anexo 4: Detalhamento técnico, folha 4 de 4.



ANEXO – PRODUÇÃO CIENTÍFICA

Artigo completo publicado no periódico;
ISSN: 2448-0959;
Qualis (ENGENHARIAS III): B1;

LIGEIRO, HENRIQUE SANTOS; MOTTIN, ARTUR CARON

Mecanismos de dano em reparos de materiais poliméricos e compósitos em tubulações offshore: uma revisão integrativa. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v.05, p.118 - 130, 2023.

Palavras-chave: Polímeros, Mecanismos de dano, reparo, Tubulações offshore

Áreas do conhecimento: Engenharia Mecânica

Setores de atividade: Extração de Petróleo e Gás Natural, Manutenção, reparação e instalação de máquinas e equipamentos

Referências adicionais: Português.

Meio de divulgação: Meio digital.

Home page: [doi:10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-mecanica/materiais-polimericos]