



AVALIAÇÃO DE CASCO EM MATERIAL COMPÓSITO PARA SEPARADOR SUBMARINO

Rodrigo Duarte Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

Orientadores: Marysilvia Ferreira da Costa
Ilson Paranhos Pasqualino

Rio de Janeiro
Setembro de 2020

AVALIAÇÃO DE CASCO EM MATERIAL COMPÓSITO PARA SEPARADOR
SUBMARINO

Rodrigo Duarte Ribeiro

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Orientadores: Marysilvia Ferreira da Costa
Ilson Paranhos Pasqualino

Aprovada por: Prof.^a Marysilvia Ferreira da Costa
Prof. Ilson Paranhos Pasqualino
Prof. Julio Cesar Ramalho Cyrino
Dr. Valber Azevedo Perrut
Prof. Hector Guillermo Kotik

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2020

Ribeiro, Rodrigo Duarte

Avaliação de Casco em Material Compósito para Separador Submarino/ Rodrigo Duarte Ribeiro. – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2020.

XVI, 80 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marysilvia Ferreira da Costa.

Ison Paranhos Pasqualino

Dissertação (Mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 74 – 80.

1. Separador Primário. 2. Material Compósito. 3. Absorção de Água. 4. Fibra de Aramida. 5. Modelagem Numérica. I.

Costa, Marysilvia Ferreira da *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. III. Título.

"The only thing we have to fear is fear itself"

Franklin D. Roosevelt

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, Gilson e Cristina, que proporcionaram minha educação, minha felicidade e minha chegada até este ponto.

Dedico à minha namorada, Paloma, pelo amor, cumplicidade, carinho e atenção compartilhados.

Dedico também ao meu irmão, Caetano, pelo companheirismo e pela amizade.

Dedico à minha avó, Ruth, por todos esses anos de carinho e amor imensuráveis aos netos.

Agradecimentos

Agradeço à minha família por todo o suporte ao longo desses anos e por fornecer as condições necessárias para meu estudo, aprendizado e desenvolvimento pessoal.

Agradeço à minha namorada, Paloma, por sempre me apoiar e incentivar.

Agradeço aos meus orientadores, o professor Ilson Paranhos Pasqualino e a professora Marysilvia Ferreira da Costa, pela orientação e suporte para a conclusão de mais um projeto.

Ao professor Marcelo Igor pelo conhecimento compartilhado e pela amizade.

Ao Laboratório de Tecnologia Submarina por fornecer a infraestrutura necessária para realização deste trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

À Dupont pelo fornecimento do tecido de aramida.

Aos funcionários Antônio Robson, Luciano Crespo, William Monteiro e Reinaldo que foram fundamentais e me ajudaram durante a parte experimental do projeto.

Ao Francisco de Assis e à Cristiane Silva por estarem sempre dispostos a ajudar.

Aos demais amigos do laboratório que fizeram os longos dias de trabalho parecerem menos entediante e cansativos.

À Olga Oliveira do Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN/COPPE/UFRJ) pela realização das análises tomográficas.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

AVALIAÇÃO DE CASCO EM MATERIAL COMPÓSITO PARA SEPARADOR SUBMARINO

Rodrigo Duarte Ribeiro

Setembro/2020

Orientadores: Marysilvia Ferreira da Costa

Ibson Paranhos Pasqualino

Programa: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

O separador submarino é um equipamento indispensável para o processamento submarino de petróleo. O módulo separador geralmente é composto por diversos equipamentos, sendo uma estrutura gigantesca e muito pesada, pois é todo fabricado em aço. Essa enorme massa gera dificuldades operacionais e custos, pois demanda embarcações muito específicas para realizar a instalação. Os materiais compósitos de fibra e resina apresentam baixa densidade e propriedades mecânicas excelentes, sendo uma ótima alternativa ao aço em termos de redução de peso sem perda de segurança estrutural. Este trabalho analisou a absorção de água salgada por placas feitas de resina epóxi e fibra de aramida submetidas à pressão externa de 3000 psi (20,7 Mpa) e temperatura de 4°C. Testes de tração e cisalhamento foram realizados para se avaliar a influência da absorção de água nos módulos de elasticidade e cisalhamento e na resistência do material. Um modelo numérico foi desenvolvido para analisar o comportamento do vaso sob diferentes níveis de pressão externa e para comparar o vaso compósito com um vaso metálico. Concluiu-se que a absorção de água não altera significativamente os módulos elásticos nem a resistência à tração do material e que, para uma mesma pressão externa, o vaso compósito apresenta parede mais espessa e menor massa quando comparado

com um vaso metálico. Nesse sentido, o casco do separador em material compósito pode ser considerado uma solução viável para este tipo de equipamento.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

EVALUATION OF COMPOSITE HULL FOR SUBSEA SEPARATOR

Rodrigo Duarte Ribeiro

September/2020

Advisors: Marysilvia Ferreira da Costa

Ilson Paranhos Pasqualino

Department: Metalurgical and Materials Engineering

The subsea oil separator is one of the most important equipment in a production site, since it is responsible for separating the fluids extracted from the reservoir. The separation module may be composed by injection bombs and several other equipment, besides the separator tank, which makes it an enormous structure. Since it is fabricated in steel, the separator is extremely heavy and requires very specific and expensive crane vessels for installation. Composite materials made of polymeric resins and fibers usually have very low density compared to steel, and very good mechanical properties, which make them a good alternative in terms of reduction of weight without losing structural safety. This work evaluated salt water absorption of composite plates under conditions of 3000 psi (20,7 MPa) of external pressure and temperature of 4°C. Tensile and shear tests were performed to assess the influence of water absorption on the tensile strength and elastic and shear moduli of the material. A numerical model was also developed to evaluate the behavior of the structure under different levels of external pressure and to compare a metallic with a composite hull. It was possible to conclude that the absorption did not cause significant changes on the elastic and shear moduli nor on the tensile strength of the material. In addition, the numerical results showed that, for the same external pressure, the composite hull has a thicker wall and a lower mass when compared

with a metallic one. In that sense, the hull of the separator in composite material can be considered a viable solution for this type of equipment.

Sumário

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Motivação.....	2
1.3 Objetivo.....	3
1.4 Organização do Trabalho	4
CAPÍTULO 2 – REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Separadores de Produção.....	5
2.1.1 Características dos Separadores.....	6
2.1.2 Tipos de Separadores.....	8
2.2 Compósitos	10
2.2.1 Matriz do Compósito	11
2.2.2 Material de Reforço.....	14
2.3 Absorção de Água em Polímeros.....	16
2.3.1 Mecanismo de Absorção.....	16
2.3.2 Efeitos da Absorção	19
2.4 Efeitos da Pressão Hidrostática	23
2.4.1 Efeito da Pressão nas Propriedades Mecânicas	23
2.4.2 Efeito da Pressão na Absorção de Água	26
2.5 Estruturas Sanduíche	28
CAPÍTULO 3 – ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	30
3.1 Introdução.....	30
3.2 Materiais Utilizados.....	30
3.3 Preparo do Material – A Laminação	30

3.4	Envelhecimento sob Pressão	34
3.5	Preparo dos Corpos de Prova	35
3.6	Testes de Tração e Cisalhamento	36
3.7	Avaliação da Porosidade e Espessura Estrutural	37
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE NUMÉRICA		39
4.1	Introdução.....	39
4.2	Etapas da Análise Numérica	40
4.2.1	Geometria do Modelo.....	40
4.2.2	Carregamento e Condições de contorno	41
4.2.3	Malha do Modelo.....	41
4.2.4	Propriedades dos Materiais	43
4.2.5	Simulações Realizadas.....	45
CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO		47
5.1	Resultados da Análise Numérica	47
5.2	Resultados da Análise de Porosidade e Espessura	51
5.3	Resultados do Teste de Absorção	55
5.4	Resultados dos Testes de Tração.....	62
5.4.1	Propriedades Mecânicas.....	62
5.4.2	Modos de Falha	68
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES		71
6.1	Conclusão.....	71
6.2	Sugestão de Trabalhos Futuros	72
REFERÊNCIAS.....		74

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Módulo de um separador primário (BIGOURDAN <i>et al.</i> , 2006) em (a) e o módulo real de separação em (b).	1
Figura 1.2 - Comparação de custos para o separador metálico e compósito. Adaptado de BIGOURDAN <i>et al.</i> , 2006.....	2
Figura 2.1 - Seções do separador (SILVA <i>et al.</i> , 2007).....	6
Figura 2.2 - Extrator de névoa (Adaptado de MANNING <i>et al.</i> , 1995).....	8
Figura 2.3 - Separador trifásico vertical (SILVA <i>et al.</i> , 2007).....	8
Figura 2.4 - Esquema de separador horizontal trifásico.	10
Figura 2.5 – Comparação qualitativa de propriedades específicas entre materiais monolíticos e compósitos. Aço em azul, alumínio em cinza e compósitos em roxo. Adaptado de CHAWLA, 2012.....	11
Figura 2.6 - Resina epóxi. Molécula de éter diglicidil de bisfenol A – DGEBA.	13
Figura 2.7 - Estrutura química da fibra de aramida - poli-para-fenileno tereftalamida (CHANG, 2001).	15
Figura 2.8 - Absorção de água em um laminado de fibra de carbono e epóxi para três valores de umidade relativa do ar (45, 75 e 97%). Adaptado de MALLICK, 2007.	17
Figura 2.9 - Curva teórica da difusão que obedece a Lei de Fick (DHAKAL <i>et al.</i> , 2016).	19
Figura 2.10 - Típicos comportamentos de absorção não-fickiana. Absorção sigmoide (a) e em dois estágios (b) (DHAKAL <i>et al.</i> , 2016).	19
Figura 2.11 - Absorção por difusão e pelas microtrincas em (a); pelos poros em (b); efeito da água na fibra em (c) e (d), causando o inchamento e gerando mais trincas. Adaptado de CHILALI <i>et al.</i> , 2016.	20
Figura 2.12 - Efeito da quantidade de absorção na Tg para seis tipos de resina epóxi. Adaptado de GIBSON, 2016.....	21
Figura 2.13 - Diagrama tensão-deformação para um compósito de carbono/epóxi carregado transversalmente e sob diversas combinações de temperatura e umidade do ar. Adaptado de GIBSON, 2016.	22
Figura 2.14 - Resistência à compressão vs pressão hidrostática para diversos compósitos reforçados com fibras. Adaptado de HOPPEL <i>et al.</i> , 1995.	24

Figura 2.15 - Resistência à tração vs pressão hidrostática para diversos compósitos reforçados com fibras. Adaptado de HOPPEL et al., 1995.	24
Figura 2.16 - Esquema de construção de uma estrutura sanduíche usando <i>honeycomb</i> como núcleo.	28
Figura 2.17 - Relação entre rigidez, resistência à flexão e peso da estrutura com a espessura do núcleo. Adaptado de CAMPBELL, 2010.	29
Figura 3.1 - Camadas da laminação. (1) Armalon®, 2) tecido de aramida, (3) peel-ply, (4) Acrylon®, (5) plástico furado e (6) plástico bolha.	32
Figura 3.2 - Aplicação da resina sobre o tecido.	32
Figura 3.3 - Laminados preparados através da técnica de <i>vacuum bagging</i> . ..	32
Figura 3.4 - Calombo formado pela bomba de vácuo em (a) e regiões de concentração de resina em (a) e (b).	33
Figura 3.5 - Retirada da câmara do banho para pesagem das placas.	34
Figura 3.6 - Placas compósitas logo após a laminação em (a) e pesagem de um dos laminados com as bordas seladas em (b).	35
Figura 3.7 - Corpos de prova não envelhecidos com os <i>strain gages</i> colados.	36
Figura 4.1 - Domínio 2D discretizado com elementos triangulares (FENNER, 1996).	39
Figura 4.2 - Modelo Geométrico com as dimensões principais, onde D_b é o diâmetro da borda e D_c é o diâmetro do centro.	40
Figura 4.3 - Força de tampo e linhas de acoplamento.	41
Figura 4.4 - Elemento de casca convencional e contínuo (ABAQUS MANUAL, 2014).	42
Figura 4.5 – Malha de elementos utilizada no modelo.	43
Figura 5.1 - Seções do casco sanduíche.	47
Figura 5.2 - Comparação do vaso antes (a) e depois (b) do colapso no modelo numérico.	50
Figura 5.3 - Comparação das espessuras da parede do vaso para estrutura sanduíche (azul) e metálica (laranja).	50
Figura 5.4 - Comparação de massa entre o casco sanduíche (azul) e metálico (laranja).	51
Figura 5.5 - Relação de material e poros na amostra original 5C-90.	52
Figura 5.6 – Distribuição do tamanho de poros na amostra original 5C-90.	52
Figura 5.7 - Histograma de poros para a amostra original 5C-90.	53

Figura 5.8 - "Linhas de poros" para a amostra a $\pm 45^\circ$ em (a) e $0/90^\circ$ em (b)...	53
Figura 5.9 - Distribuição de espessura para as amostras originais (fase 1) e envelhecidas (fase 2).	54
Figura 5.10 - Curvas totais de absorção para as amostras com tecido a $0/90^\circ$	58
Figura 5.11 – Curvas totais de absorção para as amostras com tecido a $\pm 45^\circ$.	58
Figura 5.12 - Comparação do percentual absorvido para todas as amostras. .	59
Figura 5.13 – Curvas tensão cisalhante x deformação cisalhante dos CPs não envelhecidos com tecido a $-45/+45^\circ$	63
Figura 5.14 – Curvas tensão x deformação dos CPs não envelhecidos com tecido a $0/90^\circ$	63
Figura 5.15 - Curvas tensão x deformação dos CPs envelhecidos com tecido a $0/90^\circ$	64
Figura 5.16 - Curvas tensão cisalhante x deformação cisalhante para os CPs envelhecidos com tecido $-45/+45^\circ$	64
Figura 5.17 - Comparação dos testes de cisalhamento antes (linha sólida) e depois (linha tracejada) do envelhecimento.	65
Figura 5.18 - Comparação dos testes de tração antes (linha sólida) e depois (linha tracejada) do envelhecimento.....	65
Figura 5.19 - Curvas de carga vs extensão para os CPs a $\pm 45^\circ$ destacando a falha progressiva das camadas.....	68
Figura 5.20 - Curvas de carga vs extensão para os CPs a $0/90^\circ$ destacando a falha progressiva das camadas.....	68
Figura 5.21 - Diferentes graus de delaminação nos CPs $\pm 45^\circ$ -15 em (a) e $0/90^\circ$ -15 em (b). Vista lateral de (b) em (c).....	70

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Dimensões em mm dos CPs com tecido a $0/90^\circ$	37
Tabela 3.2 - Dimensões em mm dos CPs com tecido a $\pm 45^\circ$	37
Tabela 3.3 - Parâmetros de aquisição utilizados na microtomografia.	38
Tabela 4.1 – Análise de sensibilidade de malha.	43
Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais usados na modelagem numérica.	44
Tabela 4.3 - Propriedades de falha do compósito.	45
Tabela 5.1 - Simulações numéricas para os cascos compósito e sanduíche. .	48
Tabela 5.2 - Especificações para vaso metálico.	49
Tabela 5.3 - Porosidade encontrada pela tomografia para as amostras originais e envelhecidas.	54
Tabela 5.4 - Frações mássicas e volumétricas calculadas para as amostras. .	55
Tabela 5.5 - Quantidade absorvida em gramas e a porcentagem em relação ao peso da amostra seca para as placas com tecido a $0/90^\circ$	56
Tabela 5.6 - Quantidade absorvida em gramas e a porcentagem em relação ao peso da amostra seca para as placas com tecido a $\pm 45^\circ$	56
Tabela 5.7 – Pesagem em g do Tubolit: material utilizado na selagem das bordas.	57
Tabela 5.8 – Massa, em gramas, de Tubolit utilizada em cada amostra e quantidade absorvida.	57
Tabela 5.9 - Módulo de elasticidade calculados antes e depois do teste sob pressão.	66
Tabela 5.10 - Resistência à tração antes e depois do envelhecimento.....	66
Tabela 5.11 - Módulo de cisalhamento calculados antes e depois do teste de absorção.....	67

Capítulo 1 – Introdução

1.1 Introdução

A exploração de petróleo e gás é uma das atividades mais caras e de maior risco da indústria energética. Quando tratamos da exploração em águas ultraprofundas, os custos e riscos são ainda maiores. Esses ambientes demandam equipamentos de subsuperfície maiores, mais robustos e que necessitem de pouca ou nenhuma intervenção durante sua vida operacional.

O aço figura como o principal material de fabricação desses equipamentos, o que os torna extremamente pesados e de difícil manuseio. Entretanto, materiais alternativos, como os compósitos, vêm ganhando espaço na indústria devido às suas excelentes propriedades mecânicas e outras vantagens em relação ao aço.

Um dos equipamentos mais importantes num arranjo submarino de processamento de produção é o separador primário. Ele é responsável por separar o fluido do reservatório em duas ou três correntes de fluidos isolados, facilitando e reduzindo o custo de escoamento da produção.

O módulo do separador primário pode ser composto de diversos equipamentos que se agregam em uma enorme estrutura metálica, como pode ser visto na representação idealizada da Figura 1.1a (BIGOURDAN *et al.*, 2006). Na Figura 1.1b, temos uma foto real apenas do módulo de separação.

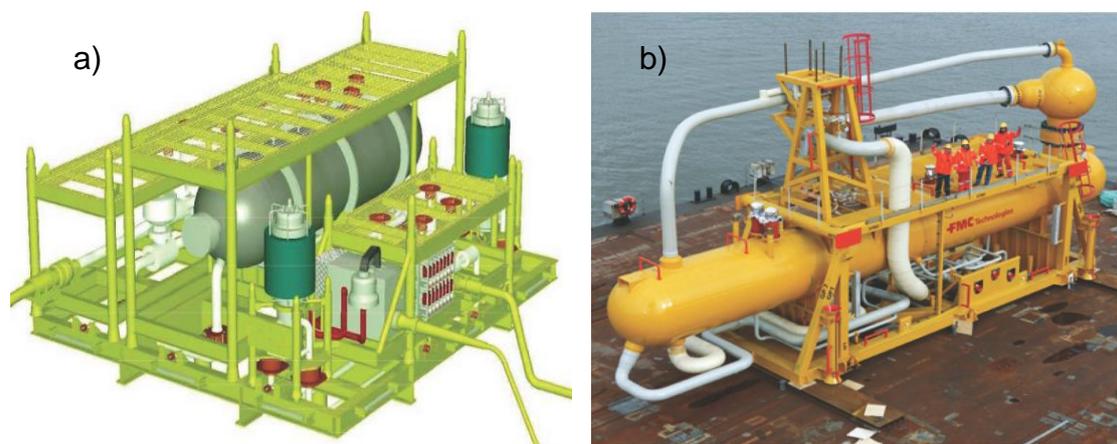


Figura 1.1 – Módulo de um separador primário (BIGOURDAN *et al.*, 2006) em (a) e o módulo real de separação em (b).

1.2 Motivação

O separador submarino de produção pode ser instalado na plataforma de produção ou no leito marinho, a depender principalmente do tipo de plataforma e da profundidade de operação. Num campo *offshore* de águas profundas ou ultraprofundas, com profundidades que podem superar 2500 m, a instalação de um separador primário no leito marinho pode ser interessante em função de aspectos de garantia de escoamento. Esses separadores são de grandes dimensões e por serem construídos em aço, são equipamentos extremamente pesados e difíceis de manejar.

Alguns materiais compósitos de fibra e resina possuem propriedades mecânicas, como resistência à tração e à fadiga, por exemplo, melhores que a maioria dos aços e pesam bem menos, além de serem bem mais resistentes à corrosão e ao ataque por diferentes substâncias químicas.

A Figura 1.2 mostra um estudo realizado por Bigourdan et al. (2006). Tal estudo mostra que a construção de um separador com material compósito poderia reduzir os custos totais em aproximadamente 32%, demonstrando a importância do estudo em questão para a indústria.

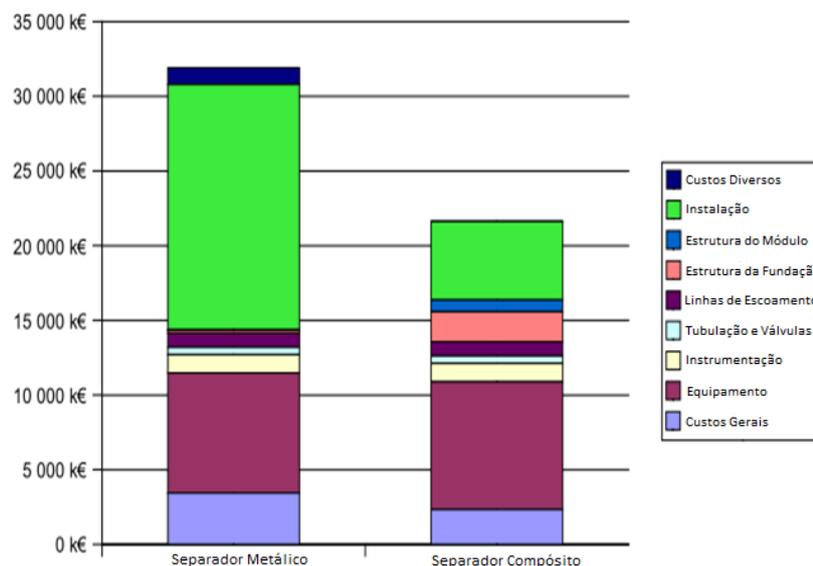


Figura 1.2 - Comparação de custos para o separador metálico e compósito.
Adaptado de BIGOURDAN et al., 2006.

Assim, a fabricação do vaso do separador com esses materiais compósitos levaria a uma redução nos gastos com instalação e manutenção e aumentaria a segurança nos processos de manuseamento do equipamento, uma vez que cargas bem mais leves seriam manejadas.

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho é complementar o trabalho já iniciado pelo autor neste assunto (RIBEIRO, 2015). No trabalho anterior, observou-se pela análise numérica que a construção de um vaso somente com camadas de fibra seria inviável para grandes profundidades, pois seriam necessárias muitas camadas de tecido e, conseqüentemente, mais resina teria que ser utilizada, o que aumentaria o peso da estrutura em comparação com o casco sanduíche. Assim, a opção do casco sanduíche se torna bem mais interessante do que o casco só compósito. A análise numérica também mostrou que o principal modo de falha era a compressão da fibra. Na análise experimental, foi observado que a porcentagem de água absorvida reduzia com o aumento do número de camadas do compósito.

No trabalho anterior, a análise numérica foi realizada utilizando-se propriedades mecânicas retiradas da literatura. Este trabalho objetiva caracterizar experimentalmente o material através de testes de tração e cisalhamento para que o modelo numérico melhor represente o real comportamento do material.

Objetiva-se, também, analisar experimentalmente o comportamento quanto à absorção de água de um material compósito de Kevlar 29 (fibra de aramida) e resina epóxi quando submetido a uma grande pressão hidrostática, simulando assim o ambiente de trabalho do vaso de um separador submarino.

O kevlar figura entre as principais fibras em termos de propriedades mecânicas, sendo inferior apenas às fibras de carbono. Entretanto, por possuir custo bem inferior a essas fibras, a utilização do kevlar foi a opção mais viável para o trabalho.

O efeito da absorção de água nos módulos elásticos e na resistência à tração do compósito também será avaliada.

Adicionalmente, para complementar os estudos experimentais, pretende-se determinar a partir de um modelo de elementos finitos, a resistência ao colapso e o modo de falha de um vaso metálico e de um vaso em estrutura sanduíche. O objetivo será determinar as deformações e tensões envolvidas, o modo de falha e a pressão de colapso do vaso.

1.4 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro traz uma rápida introdução ao tema junto com a motivação e objetivo do estudo.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos principais assuntos relacionados ao tema estudado.

Os capítulos três e quatro trazem, respectivamente, as descrições das análises experimental e numérica realizadas.

Os resultados e a discussão são apresentadas no capítulo cinco.

O capítulo seis traz a conclusão do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Revisão da Literatura

2.1 Separadores de Produção

Após a perfuração de um poço de petróleo e sua respectiva completação, etapa que condiciona o mesmo para produzir, dá-se início à etapa de produção, onde o fluido escoar do reservatório para o interior do poço e então em direção à unidade de produção.

Este fluido produzido da formação pode ser composto por diferentes componentes: óleo (hidrocarbonetos na fase líquida), gás (hidrocarbonetos na fase gasosa), condensado (gases de hidrocarbonetos condensados devido à queda de pressão), água da formação e gases contaminantes, além de sólidos como minerais, areia e até mesmo partes da rocha reservatório (THRO, 2007).

Para se ter um melhor escoamento da produção, é necessário que seja realizada a separação desses componentes. Uma das etapas de maior importância ocorre no separador primário, equipamento que tem por objetivo separar a mistura em correntes compostas praticamente por apenas um fluido. Eles normalmente são instalados na plataforma de produção, e seu dimensionamento depende do local de operação, tipo de plataforma, vazões de produção e das particularidades de cada reservatório (PASQUALINO, 2014).

A instalação do equipamento no leito marinho apresenta algumas vantagens, dentre as quais podemos citar: escoamento mais fácil dos fluidos produzidos, possibilidade de reinjeção da água produzida sem necessidade de escoar até a superfície, menos espaço ocupado na plataforma de produção entre outros (BAI e BAI, 2012).

A separação pode ser bifásica ou trifásica, sendo a escolha entre um ou outro condicionada a inúmeros fatores. A separação bifásica se encarrega de separar a produção em uma corrente de óleo e água e outra corrente de gás. Já na separação trifásica, além de separar o gás do líquido, separa-se também a água do óleo, gerando três efluentes na saída.

De acordo com Manning (1995) a separação deve ser realizada o quanto antes na linha de produção devido aos seguintes fatores:

- O processamento separado das fases água, gás e óleo é mais barata e tecnicamente mais simples;

–A água produzida muitas vezes possui alto poder de corrosão. Assim, o escoamento separado dessa fase reduz gastos com materiais especiais para construção das tubulações e diminui a chance de corrosão no escoamento das demais fases;

–Menos energia é gasta para transportar as fases separadamente. Menor energia significa uso de menores pressões, que por sua vez significa aumento na produção do poço.

2.1.1 Características dos Separadores

Os separadores de produção são geralmente classificados de acordo com sua geometria, podendo ser: verticais, horizontais, esféricos ou casco duplo. Todos estes tipos possuem algumas características comuns, as quais são explicitadas nas seções seguintes.

2.1.1.1 Características Comuns aos Separadores

Todos os tipos de separadores citados possuem seções semelhantes que serão discutidas na presente subseção e podem ser vistas na Figura 2.1.

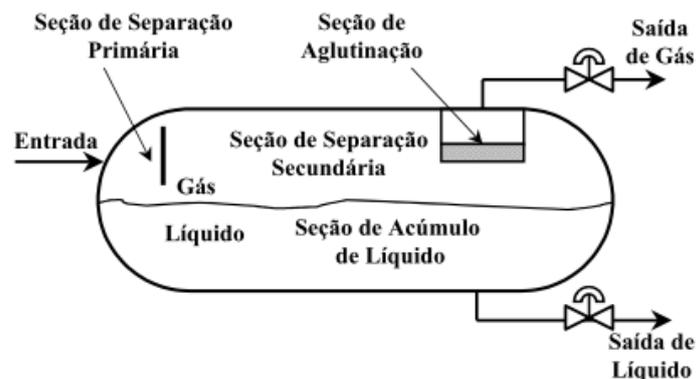


Figura 2.1 - Seções do separador (SILVA et al., 2007).

Todos os separadores de produção têm uma região inicial denominada seção de separação primária. Esta seção se caracteriza pela presença de um defletor de entrada (nos separadores horizontais) ou um difusor (nos separadores verticais) e tem por objetivo separar a maior parte do gás do líquido.

Segundo Arnold e Stewart (2008), quando o fluido se choca com o defletor, há uma brusca mudança na velocidade e na direção de escoamento e

um fino filme de líquido se forma na parede do defletor. Como o líquido tem mais dificuldade de mudar a direção e a velocidade de escoamento que o gás, boa parte do gás é separada do líquido. Já os difusores geram uma força centrífuga forçando o líquido para a parte inferior do vaso (por ação da gravidade) e o gás para a parte superior.

A segunda região comum aos separadores é a seção de separação secundária. Nesta seção a velocidade do gás e a turbulência são diminuídos para que as gotas maiores de líquido possam ser separadas do gás pela ação da gravidade.

A seção de acúmulo de líquido recebe o líquido separado do gás e tem por objetivo separar, também por ação da gravidade, eventuais bolhas de gás que ainda estejam dispersas no líquido, nos separadores bifásicos e, além disso, também separar o óleo da água nos separadores trifásicos.

Por diferença de densidade, o gás tende a se deslocar para a parte superior do vaso e a água para a parte inferior, ficando o óleo em uma região intermediária. Sendo assim, esta seção deve possuir comprimento e volume suficientes para admitir as vazões indicadas e para prover um tempo de retenção adequado para que tais separações ocorram. Possíveis sólidos presentes acabam por se depositar no fundo do separador e também são retirados através de saídas específicas.

A seção de aglutinação é composta de meios porosos que promovem a aglutinação das menores gotas de líquido que não foram retiradas na seção de separação secundária e possivelmente ainda estão sendo carreadas pelo gás. Esta seção faz com que as gotas coalesçam em gotas maiores e decantem para a seção de acúmulo de líquido. Segundo Silva (2007), os meios porosos mais comuns são: almofadas de tela de arame, placas pouco espaçadas e aletas de metal. A Figura 2.2 mostra um extrator de névoa tipo serpentina.

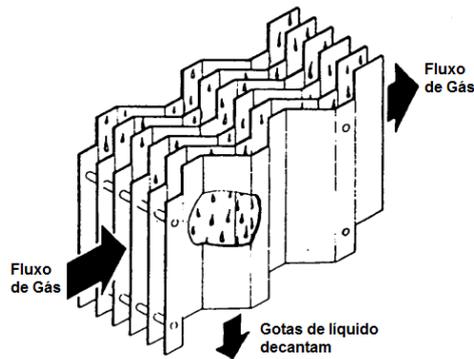


Figura 2.2 - Extrator de névoa (Adaptado de MANNING *et al.*, 1995).

2.1.2 Tipos de Separadores

Como mencionado anteriormente, há principalmente quatro tipos de separadores: vertical, horizontal, esférico e de casco duplo. Uma vez que separadores de casco duplo e esféricos estão praticamente obsoletos na indústria de petróleo, este trabalho apresentará as definições e explicações pertinentes somente aos separadores verticais e horizontais.

2.1.2.1 Separadores Verticais

Uma representação esquemática de um separador vertical trifásico pode ser vista na Figura 2.3.

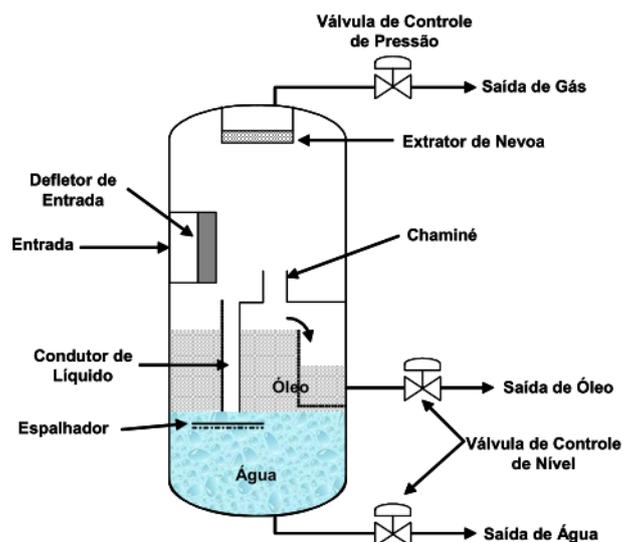


Figura 2.3 - Separador trifásico vertical (SILVA *et al.*, 2007).

Estes separadores, como o nome já explica, possuem uma configuração vertical de separação. Segundo Manning e Thompson (1995), eles são mais

indicados para produções com alto teor de sólidos (como areias, parafinas e/ou ceras), uma vez que sua geometria facilita a deposição e a retirada dos mesmos do fundo do separador. Além disso, os separadores verticais são menos influenciados pela movimentação da embarcação e pela variação do nível interno de líquido (golfadas) do que os separadores horizontais. Eles também se tornam uma boa alternativa quando há uma limitação de espaço para instalação do separador.

Dentre as vantagens dos separadores verticais podemos citar:

- São mais versáteis;
- O controle de nível não é crítico;
- Maior facilidade de limpeza;
- Menor chance de entupimento;
- São menores e ocupam menos espaço.

Dentre as desvantagens, temos:

- São mais caros;
- Possuem uma montagem mais complicada;
- Dificuldade de acesso às válvulas localizadas no topo do separador;
- Podem requerer grandes diâmetros para mesma vazão de gás em separadores horizontais.

2.1.2.2 Separadores Horizontais

De acordo com Manning e Thompson (1995), a geometria horizontal desses separadores faz com que eles lidem melhor com a formação de espuma e altas razões gás/óleo do que os separadores verticais, uma vez que sua grande área de separação facilita o escape das bolhas de gás do líquido. Além disso, a configuração horizontal não permite um fluxo contracorrente das gotas dispersas no gás ou das bolhas dispersas no líquido, como ocorre no separador vertical, facilitando a separação. A Figura 2.4 traz um esquema simplificado de um separador horizontal trifásico.

As principais vantagens dos separadores horizontais são:

- Menor custo;
- Requerem menores diâmetros para uma mesma capacidade de gás;

– Não há fluxo em contracorrente, ou seja, o fluxo de gás não influencia a extração da névoa;

– Grande área para dispersão de espuma;

Como desvantagens desse tipo de separador, temos:

– São maiores e ocupam mais espaço na planta de produção;

– Controle do nível de líquido é mais crítico;

– Mais difícil de retirar sólidos produzidos (areia);

– Menor capacidade de absorver golfadas (grandes variações de fluxo).

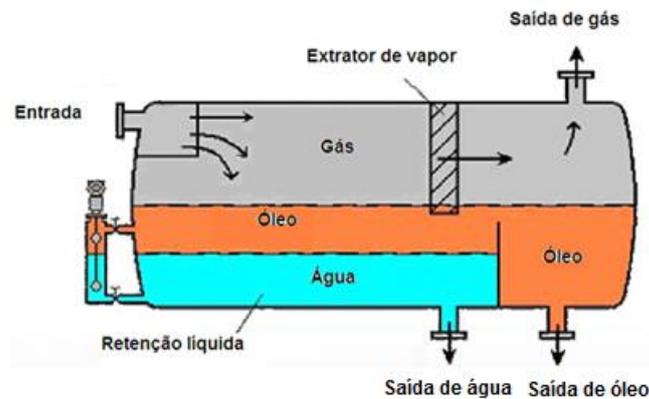


Figura 2.4 - Esquema de separador horizontal trifásico.

2.2 Compósitos

Os compósitos são materiais formados pela combinação de dois ou mais materiais quimicamente diferentes e não solúveis entre si. Essa combinação gera um novo material que conjuga as principais propriedades dos materiais componentes, tendo características específicas e aplicação que os materiais isoladamente não possuem. Os materiais compósitos não são apenas sintéticos, mas também existem naturalmente, como por exemplo os músculos, os ossos e as madeiras (CARNEIRO, 2004).

Neste trabalho, o material compósito é de origem sintética, sendo formado por uma matriz (resina polimérica termorrígida) e por um material de reforço na forma de tecido de fibras contínuas. Estes materiais são denominados polímeros ou plásticos reforçados com fibras, chamados de *fiber reinforced plastics* or *polymers* (FRP) na literatura internacional. Estes materiais vêm sendo cada vez mais utilizados em substituição ao aço em diversas aplicações devido às suas excelentes propriedades mecânicas.

A Figura 2.5 traz uma comparação qualitativa entre algumas propriedades específicas de materiais convencionais monolíticos e materiais compósitos. Quanto mais alta a barra, maior o valor da propriedade em questão.

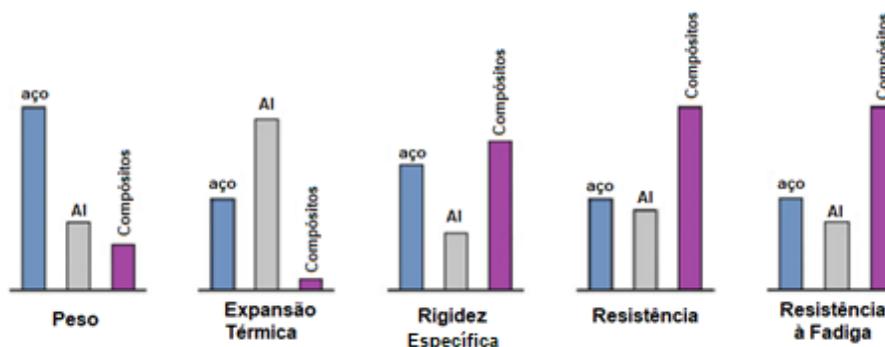


Figura 2.5 – Comparação qualitativa de propriedades específicas entre materiais monolíticos e compósitos. Aço em azul, alumínio em cinza e compósitos em roxo. Adaptado de CHAWLA, 2012.

Existe uma grande variedade de fibras e resinas disponíveis. A escolha de qual fibra e qual resina utilizar depende, entre outros, de fatores como o ambiente de aplicação, método de fabricação, resistências e rigidez necessárias (BUNSELL e RENARD, 2005).

As propriedades do compósito vão depender da matriz, do tipo de reforço utilizado, da quantidade de defeitos, das propriedades da interface, entre outros. Entre as propriedades mais influenciadas pela matriz, temos a resistência à compressão, ao cisalhamento e resistência à degradação ambiental. Já as fibras respondem principalmente pela resistência à tração do material (SHEN et al., 2018).

Um material compósito pode ser fabricado de maneira a ter comportamento semelhante a um material dúctil, mas geralmente os compósitos se assemelham mais a materiais frágeis, tendo um comportamento praticamente linear da curva tensão-deformação até a fratura (GIBSON, 2016).

As subseções a seguir se destinam a explicar os dois principais componentes do compósito. A matriz será tratada na seção 2.2.1 e o reforço na seção 2.2.2.

2.2.1 Matriz do Compósito

A matriz do compósito, é a parte inicialmente fluida (e sólida após a cura) onde as fibras são mergulhadas. Ela é responsável principalmente por manter

as fibras na posição desejada, transferir a carga e proteger as fibras de danos externos, podendo também contribuir na ductilidade, dureza e condutividade elétrica (GIBSON, 2016).

Segundo Mallick (2007), a matriz não contribui significativamente para a resistência à tração do compósito, porém é muito importante na resistência à compressão e ao cisalhamento.

A matriz deve ser quimicamente compatível com o reforço utilizado, evitando que reações químicas indesejadas ocorram e afetem o desempenho do compósito (GIBSON, 2016).

Os materiais compósitos podem apresentar como matriz metais, cerâmicos ou polímeros, sendo este último o mais comum e o utilizado neste trabalho.

Como o nome explica, os compósitos de matriz polimérica utilizam como matriz um polímero, o qual pode ser reforçado com uma variedade de partículas e fibras, como vidro, carbono e aramida. Neste projeto, a matriz polimérica foi reforçada com fibra de aramida.

Os plásticos são caracterizados por apresentarem um comportamento viscoelástico, ou seja, apresentam simultaneamente características de fluidos e de sólidos elásticos e podem ser classificados segundo sua estrutura molecular em dois grandes grupos: termoplásticos e termorrígidos, sendo esta última a utilizada neste projeto.

Essas resinas termorrígidas são formadas por reações químicas não reversíveis. A reticulação (ligações primárias fortes) entre suas moléculas e o alto grau de polimerização formam uma estrutura tridimensional rígida, não permitindo que a resina funda se for aquecida após a cura. Se forem aplicadas altas temperaturas, as resinas degradam e têm, portanto, suas propriedades mecânicas alteradas significativamente (MALLICK, 2007).

A menor viscosidade das resinas termorrígidas fornece uma melhor impregnação das fibras e impede seu desalinhamento. Como exemplos de resina termorrígida podemos citar: epóxi, viniléster e poliuretano.

Dentre as propriedades esperadas para uma resina de alto desempenho, temos: boa resistência e rigidez, baixa temperatura e pressão de processamento, baixa redução de volume após a cura e baixa toxicidade (SHEN et al., 2018).

Outra propriedade desejada numa resina é que ela tenha uma boa aderência às fibras. Isso é necessário para que a resina consiga transferir adequadamente as tensões para as fibras e impeça a quebra das mesmas (GIBSON, 2016).

Apesar de existir uma grande variedade de resinas poliméricas termorrígidas, as três principais são: poliéster, viniléster e epóxi, sendo esta última a utilizada neste trabalho e explicada com mais detalhes na seção seguinte. Uma comparação das principais vantagens e desvantagens de cada tipo de resina pode ser encontrado no trabalho de Ribeiro (2015).

2.2.1.1 Resina Epóxi

Este é o grupo de resinas com as melhores propriedades entre as resinas citadas e foi a resina utilizada neste estudo. Sua estrutura molecular é baseada no óxido de etileno (também chamado epóxi), um grupo químico formado pela ligação de um átomo de oxigênio com dois átomos de carbono (GUPTA e VARMA, 2000).

A resina epóxi apresenta anéis aromáticos na cadeia molecular, possuindo boa resistência a impactos e a mudanças de temperatura. A principal forma de se obter a resina epóxi é reagindo a epicloridina com bisfenol-A, obtendo-se éter diglicidil de bisfenol A (DGEBA) como produto (SILVA, 2008).

A Figura 2.6 a seguir apresenta a estrutura molecular idealizada de uma resina epóxi.

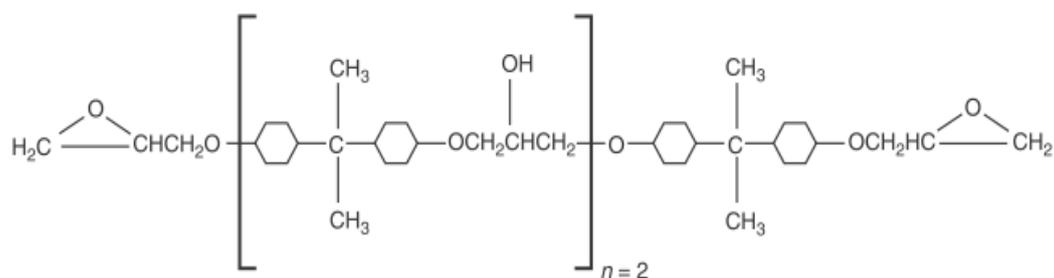


Figura 2.6 - Resina epóxi. Molécula de éter diglicidil de bisfenol A – DGEBA.

2.2.1.2 Processo de Cura

As resinas possuem consistência de líquidos viscosos, mas devem estar no estado sólido para que o compósito possa ser utilizado como componente

estrutural. Este processo de endurecimento é chamado de cura da resina. Podendo ser feito por um endurecedor nas resinas epóxi ou por um catalisador nas resinas de poliéster e vinil éster. Este material adicionado à resina causa o aumento de ligações cruzadas e faz com que ela passe de um estado viscoso para o estado sólido, atravessando um estado intermediário de gel.

A velocidade do processo depende da quantidade de endurecedor e do tipo de catalisador utilizado, sendo que existe uma quantidade ótima, acima da qual a adição desses materiais pode comprometer a qualidade da resina. Apesar das reações de cura já serem exotérmicas, em ambos os casos é possível acelerar o processo com a adição de calor.

Durante a cura há uma reorganização das moléculas da resina, o que causa uma contração da mesma. As resinas éster vinílicas e de poliéster geralmente sofrem maior contração do que as resinas epóxi.

2.2.2 Material de Reforço

O material de reforço é aquele adicionado à matriz para proporcionar melhores propriedades ao compósito. Diversos tipos de reforço podem ser utilizados, como por exemplo: partículas, flocos, fibras contínuas e não contínuas e tecidos de fibras. A maioria dos compósitos utiliza fibras contínuas como reforço pois este formato confere ao material maior resistência e rigidez do que qualquer outra forma (CHAWLA, 2012).

Para Kaw (2006), são quatro as características das fibras que contribuem para a melhora das propriedades mecânicas do material compósito:

Comprimento: fibras longas e contínuas são mais fáceis de processar, orientar e moldar do que fibras curtas, as quais podem acabar se orientando aleatoriamente. As fibras longas também trazem outros benefícios como, por exemplo, maior resistência ao impacto e menor retração na cura.

Orientação: As fibras possuem boa resistência e dureza na direção longitudinal as mesmas. Assim, um tecido com fibras orientadas em diversas direções possuirá boas propriedades em todas essas direções. Entretanto, para um mesmo volume de fibras por volume de compósito, um tecido de fibras unidirecionais apresentará melhor resistência e rigidez.

Formato: a maioria das fibras apresenta formato circular devido à facilidade de produção. Apesar de fibras com formato hexagonal ou quadrado serem possíveis, suas vantagens não justificam a dificuldade de produção.

Material: o material do qual a fibra é feita influencia diretamente suas propriedades. Em geral, espera-se que as fibras possuam alto módulo de elasticidade e resistência.

Essas características, além do fator custo, fazem com que três tipos de fibra se sobressaiam: fibras de vidro, carbono e aramida.

2.2.2.1 Fibra de Aramida

Essas fibras são formadas por materiais orgânicos aromáticos sintéticos, sendo carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio os principais componentes. Possuem uma estrutura molecular formada por cadeias de benzeno e amida (-CO-NH-) (CARNEIRO, 2004). Este é o tipo de fibra utilizado neste trabalho.

A composição química da aramida é o poli-para-fenileno tereftalamida e sua estrutura pode ser visualizada na Figura 2.7. Segundo Bellini (2012), na fibra de aramida pelo menos 85% dos grupos amida são conectados a anéis aromáticos.

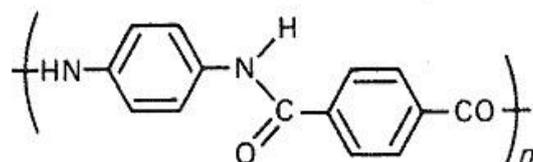


Figura 2.7 - Estrutura química da fibra de aramida - poli-para-fenileno tereftalamida (CHANG, 2001).

As fibras de aramida são conhecidas pela sua alta resistência a impactos, sendo muito utilizadas na fabricação de coletes à prova de balas.

Suas características principais são a baixa condutibilidade elétrica e densidade, alta resistência à tração e resistência moderada à corrosão, mas se degradam sob ataque de raios ultravioleta (CARNEIRO e TEIXEIRA, 2008).

Kevlar® é a marca registrada da *DuPont*™, empresa pioneira na fabricação de fibras de aramida.

2.3 Absorção de Água em Polímeros

Esta seção explica como ocorre a absorção de água em polímeros. Os mecanismos de absorção serão mostrados, sendo o principal modelo discutido e suas equações apresentadas. Além disso, os efeitos que o ingresso de água pode causar no material também serão discutidos.

A absorção de água pelos compósitos, seja ela em maior ou menor quantidade, é praticamente inevitável quando estes materiais atuam em ambientes úmidos e/ou submersos. Portanto, é importante entender como se dá essa absorção e como ela influencia o material.

2.3.1 Mecanismo de Absorção

Quando um compósito entra em contato com um ambiente úmido ou aquático, há inicialmente uma absorção instantânea de água pela superfície da matriz seguida da difusão dessas moléculas absorvidas pelo interior da matriz, pela interface e pelas fibras (MALLICK, 2007).

Segundo Dhakal *et al.* (2016), três mecanismos diferentes de absorção governam o ingresso de água em compósitos: difusão de moléculas de água pelo volume livre existente entre as cadeias poliméricas; efeito de capilaridade na interface entre fibras e matriz; e transporte de água por micro-trincas na matriz oriundas do inchamento das fibras.

Diversos modelos matemáticos podem ser utilizados para prever a absorção em compósitos. Entretanto, um dos mais utilizados, devido a sua simplicidade matemática e adequação com resultados experimentais, é o modelo desenvolvido por Adolf Eugen Fick (PARKS e HARPER, 2019). Duas leis compreendem esse modelo e são representados pelas equações (2.1) e (2.2) a seguir.

A primeira lei de Fick nos diz que o fluxo (J) das partículas é diretamente proporcional ao gradiente da concentração (∇c), e que o fator de proporcionalidade é dado pelo coeficiente de difusividade do material (D). Essa relação, considerando-se o caso de fluxo unidirecional, pode ser representada pela Equação (2.1) a seguir.

$$J = -D\nabla c = -D \frac{dc}{dz} \quad (2.1)$$

Onde z é a direção do fluxo e o sinal negativo vem do fato de o fluxo ocorrer na direção oposta ao gradiente, ou seja, o gradiente aumenta de onde há menos partículas para onde há mais partículas, e o fluxo ocorre em sentido contrário.

A segunda lei de Fick, também conhecida como Lei da Difusão, pode ser obtida a partir de sua primeira lei e do princípio de conservação das massas. Essa relação pode ser matematicamente expressa pela seguinte equação:

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{\partial J}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial z} \left(-D \frac{\partial c}{\partial z} \right) = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (2.2)$$

Onde (dc/dt) é a variação da concentração com o tempo, (dc/dz) é o gradiente de concentração, (dJ/dz) é a variação do fluxo, (D) é o coeficiente de difusividade e (t) é o tempo.

A absorção Fickiana, ou seja, aquela que pode ser descrita pela lei de Fick, é um processo caracterizado por duas fases. Inicialmente, há um aumento linear na quantidade absorvida até que uma região de saturação ou equilíbrio é alcançada, sendo que o tempo necessário para se alcançar a saturação depende, dentre outros aspectos, da espessura do compósito e da temperatura do ambiente em questão. (MALLICK, 2007)

Um comportamento real de absorção pode ser visto na Figura 2.8 a seguir, onde Mallick (2007) mostra um exemplo da quantidade absorvida com o tempo para um compósito de fibra de carbono com quatro camadas em três condições diferentes de umidade do ar (R.H.) e temperatura de 24°C.

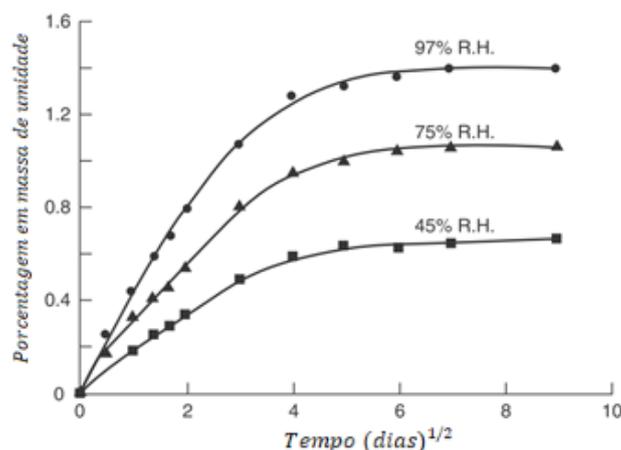


Figura 2.8 - Absorção de água em um laminado de fibra de carbono e epóxi para três valores de umidade relativa do ar (45, 75 e 97%). Adaptado de MALLICK, 2007.

Uma propriedade também importante é a quantidade de água absorvida pelo material em determinado momento. Chawla (2012) e Mallick (2007) explicam que a seguinte equação pode ser utilizada para este fim:

$$M = M_i + G(M_m - M_i) \quad (2.3)$$

Onde (M) é a quantidade absorvida, (M_i) é a quantidade inicial de água, (M_m) é a quantidade absorvida na condição de equilíbrio (saturação) e (G) é um parâmetro adimensional dependente do tempo e relacionado com o coeficiente de difusividade. Pode-se perceber que para uma amostra inicialmente seca ($M_i = 0$), o parâmetro G se resume à divisão da quantidade absorvida no tempo p pela quantidade absorvida na saturação ($G = M/M_m$).

Segundo Assarar *et al.* (2011), para a parte inicial da curva $M \times \sqrt{t}$, a qual ele delimita para valores de $M/M_m < 0,6$, o parâmetro G pode ser aproximado por:

$$G \approx \frac{4}{h} \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2.4)$$

E, para valores de $M/M_m > 0,6$:

$$\frac{M}{M_m} = G \approx 1 - \exp \left[-7,3 \left(\frac{Dt}{h^2} \right)^{0,75} \right] \quad (2.5)$$

Onde (D) é a difusividade, (h) é a espessura do laminado e (t) é o tempo.

Pode-se perceber a dependência da difusividade (D) com a quantidade absorvida na saturação (M_m). Essa dependência pode dificultar o cálculo de D caso M_m não seja um valor conhecido.

Segundo Mallick (2007), o coeficiente de difusividade do material (D) pode ser relacionado com coeficiente de difusividade da matriz (D_m), nas direções perpendicular e longitudinal, e com a fração volumétrica de fibras através da seguinte equação:

$$D = D_{11} \cos^2 \varphi + D_{22} \sin^2 \varphi \quad (2.6)$$

Onde:

$$D_{11} = D_m(1 - v_f) \quad (2.7)$$

E, assumindo que a difusividade da fibra seja bem menor que a difusividade da matriz ($D_f \ll D_m$), temos:

$$D_{22} = D_m \left(1 - 2\sqrt{\frac{v_f}{\pi}} \right) \quad (2.8)$$

Sendo (φ) o ângulo da fibra com a direção do fluxo ($\varphi = 90^\circ$ para fibras paralelas à superfície do laminado) e (v_f) a fração volumétrica de fibras.

A curva teórica da difusão Fickiana pode ser observada na Figura 2.9, onde a porcentagem absorvida é plotada versus a raiz do tempo.

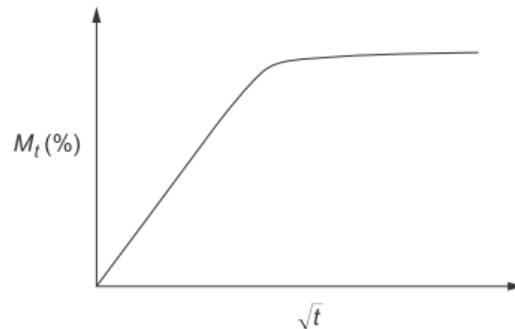


Figura 2.9 - Curva teórica da difusão que obedece a Lei de Fick (DHAKAL *et al.*, 2016).

Além do modelo de Fick, outros modelos de difusão também podem ser utilizados para explicar o processo de absorção e, para efeito de completude, a Figura 2.10 traz dois modelos de absorção não-fickianos: o modelo Sigmoidal e o modelo de dois estágios. Suas equações não serão discutidas aqui, mas podem ser encontradas no trabalho de Dhakal *et al.* (2016).

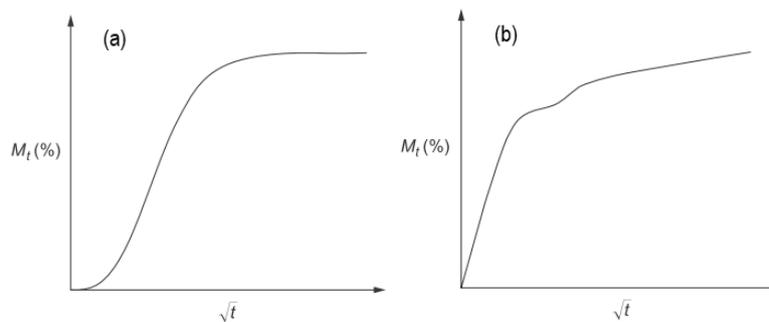


Figura 2.10 - Típicos comportamentos de absorção não-fickiana. Absorção sigmoideal (a) e em dois estágios (b) (DHAKAL *et al.*, 2016).

2.3.2 Efeitos da Absorção

Esta seção se destina a explicar os efeitos que o ingresso de água causa no material compósito.

A entrada de água no material causa, inicialmente, um inchamento da matriz, ou seja, gera uma variação volumétrica. Essa dilatação altera o estado

de tensões no compósito, gerando tensões compressivas na matriz e trativas nas fibras (CHAWLA, 2012).

A alteração do estado tensional do compósito pode levar à formação de microtrincas e à um descolamento entre fibra e matriz devido à quebra da ligação na interface entre esses dois materiais. Esse descolamento afeta diretamente a transferência de carga da matriz para a fibra, principal parâmetro para resistência mecânica do material. Além disso, as microtrincas também podem atuar como caminhos preferenciais para o ingresso de água no material e aumentar o percentual total de água absorvida (BUNSELL e RENARD, 2005).

A Figura 2.11 mostra o processo de absorção de água em compósitos.

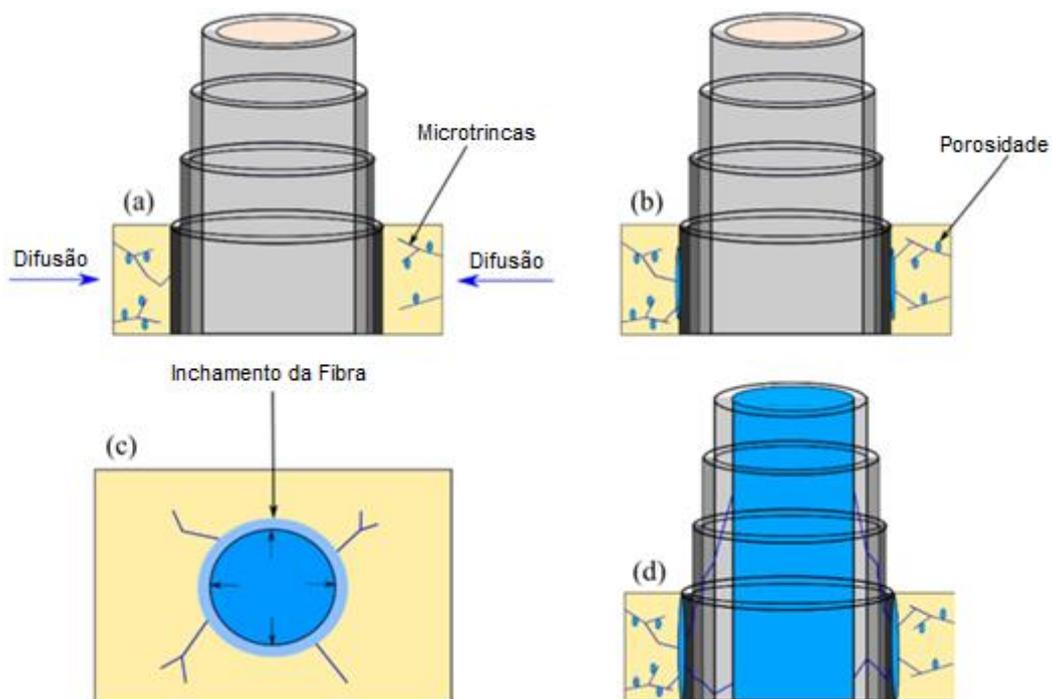


Figura 2.11 - Absorção por difusão e pelas microtrincas em (a); pelos poros em (b); efeito da água na fibra em (c) e (d), causando o inchamento e gerando mais trincas. Adaptado de CHILALI et al., 2016.

O ingresso de água também pode danificar o material ao causar uma mudança na temperatura de transição vítrea (T_g) do polímero. Na Figura 2.12, é possível perceber uma diminuição na T_g - com o aumento da quantidade de água absorvida para seis diferentes resinas testadas.

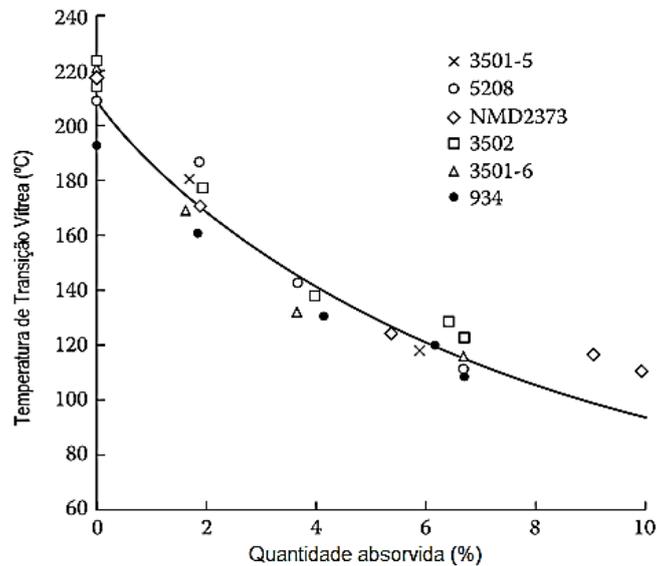


Figura 2.12 - Efeito da quantidade de absorção na Tg para seis tipos de resina epóxi. Adaptado de GIBSON, 2016.

De acordo com Gibson (2016), a temperatura de transição vítrea após o envelhecimento por absorção (T_{gw}) pode ser estimada utilizando-se a seguinte equação:

$$T_{gw} = (0.005M_r^2 - 0.1M_r + 1,0)T_{go} \quad (2.9)$$

Onde M_r é o percentual em peso de água absorvida e T_{go} é a temperatura de transição vítrea na condição seca.

Outro exemplo da influência da absorção de água, combinada com a variação de temperatura, pode ser visto na Figura 2.13 a seguir. Esta figura traz o diagrama de tensão-deformação para várias combinações de porcentagem absorvida e temperatura para um compósito de carbono/epóxi carregado transversalmente, mostrando comportamentos diferentes para cada combinação.

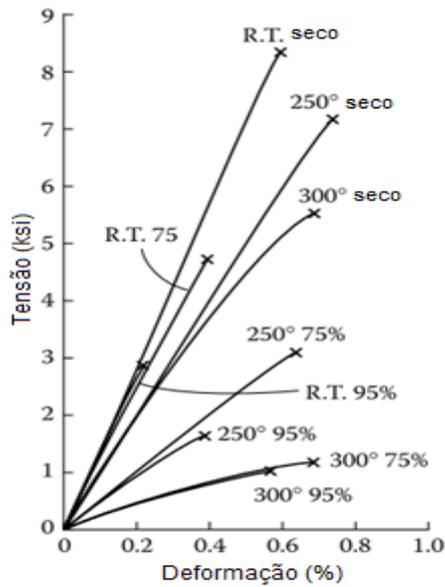


Figura 2.13 - Diagrama tensão-deformação para um compósito de carbono/epóxi carregado transversalmente e sob diversas combinações de temperatura e umidade do ar. Adaptado de GIBSON, 2016.

Deve-se considerar também a reação de cada tipo de fibra quando exposta à água. As fibras de carbono e de vidro se mostram mais insensíveis a esse aspecto do que a fibra de aramida, a qual absorve mais água, podendo, assim, piorar o efeito de descolamento e influenciar bastante o volume total absorvido na saturação.

A configuração do tecido de fibra utilizado também pode influenciar a absorção. Almudaihesh et. al (2020) mostraram que compósitos de tecido bidirecional nas configurações *plain weave* e *twill* apresentaram uma quantidade de absorção parecida entre si e menor do que compósitos com camadas unidirecionais de fibra de carbono. Esse estudo mostra que tecidos trançados oferecem maior barreira ao ingresso de água do que os unidirecionais, mas não esclarece sobre a influência do tipo e angulação do entrelaçamento das fibras.

Essas características diferentes resultam numa enorme variedade de comportamentos mecânicos em compósitos fabricados com diversos tipos de fibras. Desse modo, cada compósito terá sua resposta particular na absorção, na resistência à fadiga, na variação dos módulos de elasticidade e cisalhamento, na resistência à tração e à compressão, dentre outros aspectos. Abordar cada caso específico de absorção vai além do escopo desta dissertação, mas os trabalhos de Mallick (2007), Chawla (2012) e Gibson (2016), além das outras referências citadas, trazem informações mais detalhadas e podem ser consultados.

Como este trabalho avalia a absorção sob altas pressões, a seção a seguir explica quais efeitos a aplicação de pressão pode trazer para o comportamento mecânico e para a absorção de água em compósitos.

2.4 Efeitos da Pressão Hidrostática

A aplicação de pressão gera alterações dimensionais e tensionais no compósito, podendo influenciar seu comportamento mecânico e o mecanismo de absorção de água. Assim, as duas seções a seguir se destinam a explicar como a pressão hidrostática pode afetar o material compósito nesses dois sentidos.

2.4.1 Efeito da Pressão nas Propriedades Mecânicas

Os compósitos são afetados pela pressão hidrostática principalmente pelo efeito que ela causa na matriz polimérica do material, já que as propriedades das fibras por si só são praticamente insensíveis à mudança de pressão.

O trabalho de Hoppel et al. (1995) traz resultados de trabalhos que avaliaram a resposta à compressão, à tração e ao cisalhamento de materiais compósitos quando submetidos à pressão hidrostática. Para a resposta à compressão, os autores concluem que este parâmetro tem forte dependência com a pressão exercida e com a geometria dos corpos de prova, sendo que quanto maior a pressão hidrostática maior a resistência à compressão. Esse comportamento pode ser observado na Figura 2.14.

Vale notar que alguns materiais exibem comportamento bilinear da resistência à compressão com a pressão aplicada, ou seja, apresentam uma curva com duas inclinações diferentes.

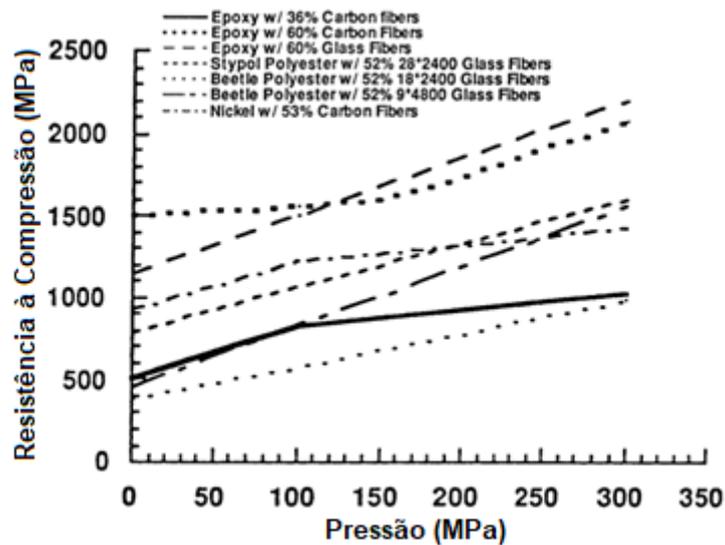


Figura 2.14 - Resistência à compressão vs pressão hidrostática para diversos compósitos reforçados com fibras. Adaptado de HOPPEL et al., 1995.

Hoppel et al. (1995) explicam que a pressão hidrostática aumenta o módulo de elasticidade e a tensão de escoamento da matriz e a adesão com as fibras, deixando o compósito mais resistente à compressão. Os autores comentam que, com essas mudanças, há uma menor quantidade de deformações plásticas localizadas na matriz, fazendo com que ela tenha mais capacidade de impedir a flambagem e a quebra das fibras sob compressão.

Quando submetido a tensões trativas, foi observado no compósito um comportamento diferente do anterior. Há uma tendência para a diminuição da resistência à tração com o aumento da pressão hidrostática, como pode ser visto na Figura 2.15.

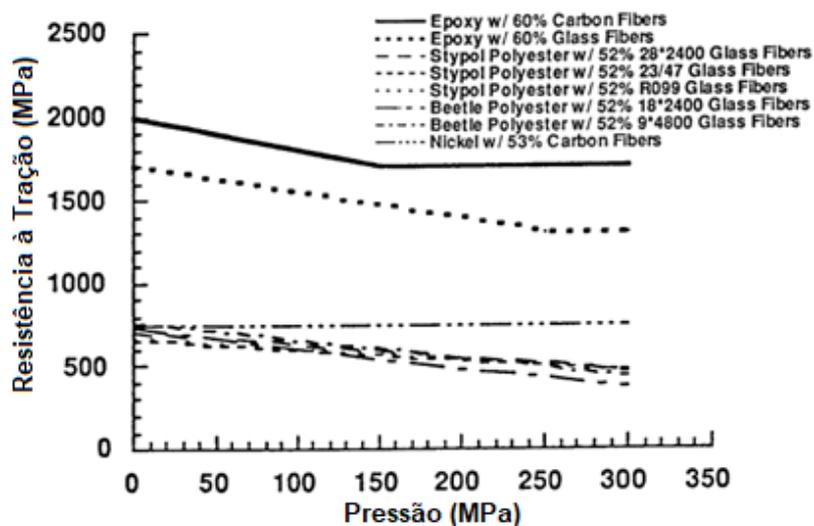


Figura 2.15 - Resistência à tração vs pressão hidrostática para diversos compósitos reforçados com fibras. Adaptado de HOPPEL et al., 1995.

Hoppel et al. (1995) concluem que o aumento no módulo de elasticidade da matriz deixa o compósito com comportamento mais frágil, tendo menos capacidade de impedir a propagação de trincas. Assim, quando o primeiro feixe de fibras falha, todo o compósito acaba falhando catastróficamente.

Para os autores, o aumento do módulo seria devido ao efeito de deformações finitas. Segundo a teoria clássica da elasticidade, as deformações no material são dadas como infinitesimais se o quadrado e o produto das deformações forem tão pequenos que podem ser desprezados. Caso as deformações sejam grandes o suficiente para que seus quadrados e seus produtos não possam ser desprezados, a teoria clássica da elasticidade não se aplica mais, e a teoria de deformações finitas deve então ser utilizada.

O comportamento sob cisalhamento dos materiais se mostrou o menos sensível ao aumento de pressão, exibindo apenas um moderado aumento. Esse acréscimo foi dado como resultado da atuação em conjunto do aumento do módulo de cisalhamento da matriz, melhoria da interação entre fibra e matriz e da supressão do crescimento de trincas devido à pressão hidrostática.

Hoppel et al. (1995) explicam, que as mudanças observadas no compósito devido a aplicação de pressão não dependem somente da mudança no valor do módulo, mas também estão relacionadas com o efeito da pressão na micromecânica da fratura, podendo haver mudança no modo como o compósito falha quando pressão hidrostática é ou não aplicada.

A Figura 2.14 e a Figura 2.15 mostram que para o nível de pressão avaliado neste trabalho (20 Mpa / 3000 psi) há pouca variação nas propriedades do material, não justificando a realização de testes mecânicos pressurizados.

Um outro trabalho, desenvolvido por Rhee, Lee e Park (2004), avaliou a resistência à compressão de um compósito unidirecional de fibra de carbono e resina epóxi sob crescentes pressões hidrostáticas, sendo utilizada água salgada como fluido pressurizante. Os autores observaram um comportamento bilinear crescente da resistência à compressão. Nos testes, o módulo de compressão aumentou 10% quando a pressão foi aumentada de 0,1 MPa (pressão atmosférica) até 200 MPa e outros 2,3% quando a pressão foi aumentada de 200 para 270 MPa. Além disso, foi possível notar que a absorção de água salgada foi aproximadamente dada como Fickiano.

Por fim, Rhee et al. (2004) concluíram que o aumento na resistência à compressão se deu devido a três fatores: o aumento de pressão causa uma compressão transversal no material e aumenta a resistência à iniciação e propagação de trincas; um aumento no coeficiente de atrito entre fibra e matriz dificultando o descolamento entre ambos; e deformações plásticas localizadas ao redor de poros levam estes a colapsar, reduzindo prováveis pontos de início de falha.

A seção a seguir se destina a explicar como a aplicação de pressão pode influenciar a absorção de água pelo material compósito.

2.4.2 Efeito da Pressão na Absorção de Água

Diversos trabalhos presentes na literatura já avaliaram a influência da pressão hidrostática na absorção de água em compósitos e os resultados não mostram uma tendência geral de comportamento.

Choqueuse et al. (1997) avaliaram o envelhecimento de cinco compósitos em água destilada durante um período de dois anos em quatro temperaturas (5, 20, 40 e 60°C) e duas pressões (0,1 e 10 MPa) diferentes. Os materiais testados tinham a seguinte composição: quatro compósitos de fibra de vidro sendo dois com resina epóxi, um com resina poliéster e um com resina estervinílica, e um compósito de fibra de carbono e resina PEEK. Os autores concluíram que a absorção na resina epóxi pode ser aproximada como fickiana e que apresenta forte dependência como aumento da pressão. Já a absorção nas outras resinas foi pouco influenciada pela pressão e não puderam ser aproximadas pela lei de Fick.

Tucker et al. (1993) concluíram que a pressão praticamente não afetou a absorção de água em resinas de poliéster e estervinílicas quando a pressão foi aumentada da atmosférica até 1500 psi (10,34 MPa). Com esse aumento de pressão, a resina poliéster variou apenas de 0,77% para 0,76% em peso de quantidade absorvida e a resina estervinílica variou de 1,18% para 1,21% também em peso. Além disso, os autores reportaram que a absorção foi fickiana e que a aplicação de pressão não alterou o coeficiente de difusão dos polímeros.

Tucker e Brown (1989) estudaram o comportamento de um compósito de fibra de carbono e resina estervinílica testada na pressão atmosférica e numa

pressão equivalente a 610 metros de água salgada. Eles reportaram que a pressão não influenciou o coeficiente de difusão do material e que a quantidade final absorvida aumentou de aproximadamente 5% para 8% em peso quando pressão foi aplicada.

Humeau et al. (2016) avaliaram o comportamento de absorção de quatro materiais (resina epóxi pura e três compósitos de fibra de carbono e resina epóxi) quando submetidas a três pressões diferentes: 1, 50 e 500 bar (0,1 MPa, 5 MPa e 50 MPa). A resina epóxi pura praticamente não sofreu aumento na quantidade absorvida com o aumento de pressão, permanecendo estável por volta de 3% em peso de água absorvida. Seu coeficiente de difusão ficou inalterado até a pressão de 50 bar e sofreu pequena redução até 500 bar. O compósito de fibra de vidro produzido por laminação manual teve o nível de saturação aumentado significativamente com o aumento de pressão. Na pressão de 1 bar a absorção foi de aproximadamente 1,5% em peso e nas pressões de 50, 250 e 500 bar, a absorção ficou em torno de 3,5%. Entretanto, o compósito não apresentou mudança no coeficiente de difusividade.

Os compósitos produzidos por infusão e os pré-impregnados mostraram que o nível de saturação não foi alterado com o aumento de pressão, ficando ambos em torno de 1,5% em peso de água absorvida nas pressões de 1 e 500 bar e 40°C. O coeficiente de difusão dos compósitos produzidos por infusão diminuiu nas pressões mais altas, variando aproximadamente de $18,5 \times 10^{-14}$ m²/s em 1 bar para $10,7 \times 10^{-14}$ m²/s em 500 bar. Já os pré-impregnados sofreram uma redução de apenas $0,3 \times 10^{-14}$ m²/s com o mesmo aumento de pressão.

Este estudo conduzido por Humeau et al. (2016) mostrou de forma bastante clara como o comportamento dos materiais pode variar. De fato, vimos que a mesma resina apresentou comportamentos diferentes quando avaliada com e sem as fibras de reforço.

Segundo Davies (2016), essa variabilidade de resultados pode ser explicada devido a existência de dois mecanismos competitivos. O primeiro é o efeito do volume livre. Este volume é reduzido em altas pressões, diminuindo assim os espaços disponíveis para ingresso de água. O segundo é um aumento no potencial químico com o aumento de pressão, o que aumenta a força na direção de ingresso de água.

Davies (2016) também reporta que testes em cilindros fabricados por enrolamento filantar sofreram grande efeito da pressão na absorção, uma vez que este método de produção gera alta porcentagem de poros no compósito. O autor complementa dizendo que o estudo realizado por Davies et al. (1997) concluiu que a absorção aumentou de 1,6% sem pressão para 3,5% com pressão aplicada. Entretanto, algumas propriedades residuais das amostras envelhecidas foram idênticas às amostras originais, não esclarecendo se essa água armazenada nos poros compromete ou não as propriedades mecânicas do material.

2.5 Estruturas Sanduíche

Estruturas no formato sanduíche são amplamente utilizadas na indústria marítima e aeroespacial, onde geralmente são necessárias elevada rigidez no plano do material, elevada resistência à flexão e baixo peso das estruturas. A estrutura sanduíche é formada por duas faces externas, que geralmente são bem rígidas e finas, separando um material intermediário mais espesso, flexível e leve (DANIEL e GDOUTOS, 2009).

O esquema de construção de um painel sanduíche é apresentado na Figura 2.16, que mostra as faces compósitas, o núcleo de *honeycomb* e as camadas adesivas para fixar as faces ao núcleo.

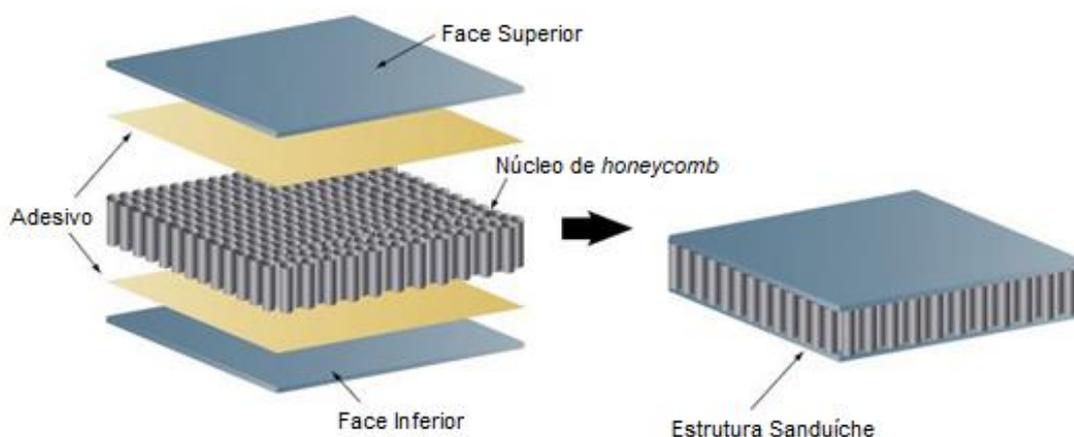


Figura 2.16 - Esquema de construção de uma estrutura sanduíche usando *honeycomb* como núcleo.

O conceito básico da estrutura sanduíche pode ser comparado ao da viga I, onde as faces são encarregadas de resistir às forças de flexão (tensão e

compressão) enquanto as forças de cisalhamento são concentradas no núcleo. Além disso, as propriedades do adesivo utilizado para unir as faces ao núcleo também serão muito importantes na resistência geral da estrutura sanduíche. (CAMPBELL, 2010)

A teoria nos diz que a rigidez à flexão de um painel é diretamente proporcional à sua espessura. Assim, aumentando-se a espessura, aumenta-se também a rigidez à flexão do material. Na engenharia, geralmente um material de baixa densidade é utilizado como núcleo em conjunto com o compósito para se aumentar a espessura e a rigidez da estrutura (LIU, XUE, LIU, et al., 2018).

A Figura 2.17 mostra um exemplo de como o peso, a rigidez e a resistência à flexão de uma estrutura podem variar com a variação da espessura do núcleo.

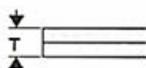
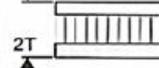
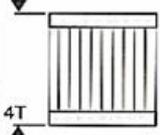
	Material Sólido	Núcleo de Espessura T	Núcleo de Espessura 3T
			
Rigidez	1.0	7.0	37.0
Resistência à Flexão	1.0	3.5	9.2
Peso	1.0	1.03	1.06

Figura 2.17 - Relação entre rigidez, resistência à flexão e peso da estrutura com a espessura do núcleo. Adaptado de CAMPBELL, 2010.

Diversos materiais metálicos e não metálicos podem ser usados nas faces e no núcleo. Os mais utilizados no núcleo são espumas sintéticas, estruturas *honeycomb* (favo) de fibras ou alumínio e madeira. Para aplicações em estruturas submersas, geralmente as faces são feitas de material compósito e o núcleo de *honeycomb* ou espuma polimérica.

Capítulo 3 – Análise Experimental

3.1 Introdução

A parte experimental deste projeto se propõe a analisar o comportamento de um material compósito quanto às suas propriedades mecânicas (módulo de elasticidade, resistência à tração e módulo de cisalhamento) e quanto à absorção de água, quando submetida à pressão hidrostática e baixa temperatura.

3.2 Materiais Utilizados

Para se fabricar o compósito foi utilizado um tecido bidirecional de kevlar® 29 (fibra de aramida) e resina epóxi. A resina utilizada foi a Araldite® LY 1564 BR e o endurecedor foi o Aradur® 2963, ambos fabricados pela HUNTSMAN e fornecidos pela empresa Maxepoxi. O tecido bidirecional (*plain woven*) de Kevlar® 29 (modelo S745 Greige) foi fornecido pela DuPont®, tendo gramatura de 439 g/m², espessura de 0,58 mm e 17 fios por polegada linear.

Os compósitos foram fabricados variando-se o número de camadas e a angulação das fibras do tecido. Duas orientações diferentes das fibras foram estudadas (0/90° e ±45°) sendo que para cada orientação, três quantidades de camadas foram utilizadas (5, 10 e 15 camadas).

Foram preparados seis corpos de prova para serem testados em uma câmara hiperbárica, sendo três com as fibras orientadas a 0/90° e três com as fibras orientadas a -45/+45°.

Uma massa epóxi bi-componente (Tubolit MEP 301) também foi utilizada para vedar as bordas dos laminados e evitar o ingresso de água por essas faces.

3.3 Preparo do Material – A Laminação

A primeira etapa foi cortar o tecido em exemplares com dimensões aproximadas de 150 mm de largura por 300 mm de comprimento. A resina foi preparada misturando-se a proporção de 2 partes de resina para 1 parte de endurecedor, como recomendado pelo fabricante, e homogeneizada por mistura manual durante cinco minutos. Os exemplares foram então laminados.

Sobre uma bancada horizontal, um pedaço retangular de Armalon® (tecido de fibra de vidro revestido com PTFE) foi fixado com o objetivo de evitar

a aderência da resina sobre a bancada. Um pouco da mistura resina/endurecedor foi despejada sobre o Armalon® e a primeira camada de kevlar foi adicionada. Uma segunda camada de resina/endurecedor foi então depositada sobre o tecido, sendo espalhado com um rolo 100% poliéster até deixar o tecido visualmente bem impregnado. Esta etapa foi repetida de acordo com o número de camadas de cada exemplar.

Após a inserção da última camada de aramida, um tecido roxo a base de poliéster chamado de *peel-ply* foi colocado. Ele tem o objetivo de dar um acabamento liso à superfície do material e criar uma superfície com boas propriedades de adesão. Sobre o *peel-ply* é aplicado um plástico perfurado bem fino, o qual permitirá a saída do ar na aplicação do vácuo. Sobre o filme perfurado uma camada de espuma de Acrylon® é adicionada. Ela irá absorver a resina em excesso e permitirá o escape de alguns voláteis. Finalmente, sobre o plástico perfurado é colocado o plástico bolha, que tem a função de distribuir uniformemente a pressão sobre o laminado.

A bomba de vácuo é então conectada ao conjunto através de uma mangueira, sendo o material deixado em vácuo por aproximadamente 180 min. Este processo, denominado *vacuum bag*, tem a finalidade de retirar as bolhas de voláteis que se formam no interior da resina durante o processo de cura (endurecimento), as quais podem comprometer o desempenho da resina e a aderência com as fibras. O vácuo também promove uma maior compactação do laminado, melhorando suas propriedades mecânicas. A bomba utilizada foi da marca PIAB e foi aplicada uma pressão de acionamento de 60 psi (0,4 MPa) para a obtenção do vácuo.

Após o vácuo, o material foi deixado descansando por mais 24 horas, aproximadamente, em temperatura ambiente para garantir que o material curasse completamente. Por fim, todos os materiais foram retirados ficando apenas o laminado de compósito.

Na Figura 3.1 temos os seis itens utilizados na laminação antes da aplicação do vácuo.

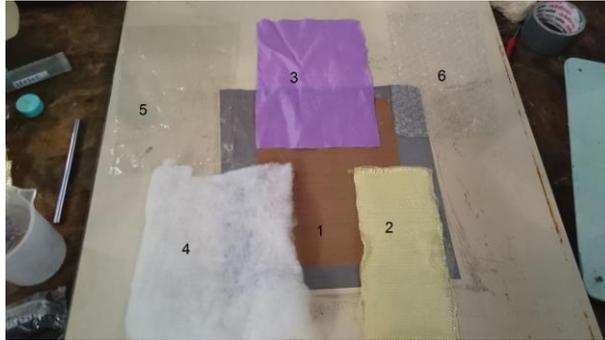


Figura 3.1 - Camadas da laminação. (1) Armalon®, (2) tecido de aramida, (3) peel-ply, (4) Acrylon®, (5) plástico furado e (6) plástico bolha.

A Figura 3.2 a seguir mostra o processo de aplicação da mistura de resina e endurecedor sobre as camadas do tecido, conhecido como laminação manual (*hand lay up*).



Figura 3.2 - Aplicação da resina sobre o tecido.

Já a Figura 3.3 mostra a bolsa de vácuo com a mangueira conectada para retirada do ar.



Figura 3.3 - Laminados preparados através da técnica de *vacuum bagging*.

Para garantir que a resina cobrisse 100% do tecido e que as imperfeições geradas após a laminação não permitissem entrada de água, mais uma camada de resina foi aplicada sobre os laminados, mas sem aplicação de vácuo.

Por fim, o laminado foi cortado ao meio para que coubesse na câmara hiperbárica, destinada a simular a pressão hidrostática.

Vale notar que durante o processo de laminação, algumas dificuldades foram encontradas. Primeiramente, a definição de qual pressão de acionamento da bomba de vácuo aplicar. Uma pressão mais alta talvez fosse mais eficiente para retirada das bolhas e resultasse em uma maior fração de fibras e menor fração de poros no laminado. Em contrapartida, essa maior pressão poderia retirar muita resina e parte das fibras, principalmente na superfície, poderiam ficar sem a matriz.

Em segundo lugar, o ponto de aplicação da bomba de vácuo provocou um acúmulo maior de resina na região e alguns laminados acabaram com uma deformação em formato de calombo, como pode ser visto na Figura 3.4 abaixo. Entretanto, no momento de corte dos corpos de prova, foi possível evitar essa região para a maioria dos CPs.

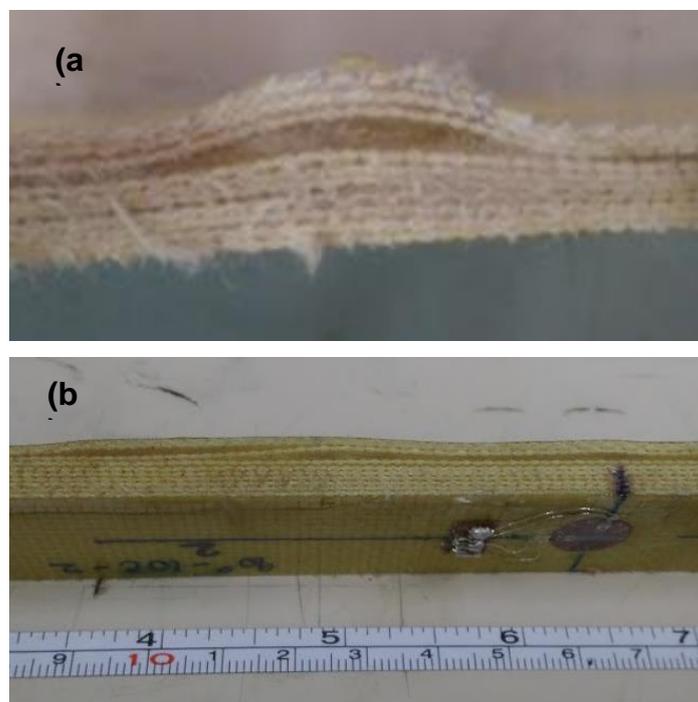


Figura 3.4 - Calombo formado pela bomba de vácuo em (a) e regiões de concentração de resina em (a) e (b).

3.4 Envelhecimento sob Pressão

Para realização do teste de absorção, um vaso foi construído para que a câmara hiperbárica fosse mergulhada em água refrigerada a 4°C. Os laminados foram inseridos na câmara, que foi selada, preenchida com água salgada com concentração de 34 mg/L e pressurizada. A Figura 3.5 mostra o aparato utilizado para a realização do experimento.



Figura 3.5 - Retirada da câmara do banho para pesagem das placas.

Os laminados foram pesados em uma balança digital semi-analítica da marca Shimadzu modelo BL3200H e tiveram as bordas seladas com massa epóxi bi componente Tubolit - MEP 301. A selagem tem como objetivo evitar a penetração de água pelas bordas, restringindo a absorção apenas pelas faces do compósito.

Finalmente, os laminados foram colocados na câmara hiperbárica e mantidos durante 189 dias, período durante o qual um total de 10 pesagens foram realizadas. Para as pesagens, a câmara era despressurizada, retirada do banho térmico, os laminados eram removidos, lavados e cuidadosamente secados.

As condições de teste foram definidas com 3000 psi (aproximadamente 20 MPa) de pressão e temperatura de 4°C. Tais parâmetros simulam uma profundidade de instalação do vaso separador a 2000 m e temperatura aproximada correspondente. Para simular a água do mar, uma solução de água salinizada foi preparada com concentração de 34 g/L.

A Figura 3.6 mostra os laminados fabricados e a pesagem de uma das placas com as bordas seladas.

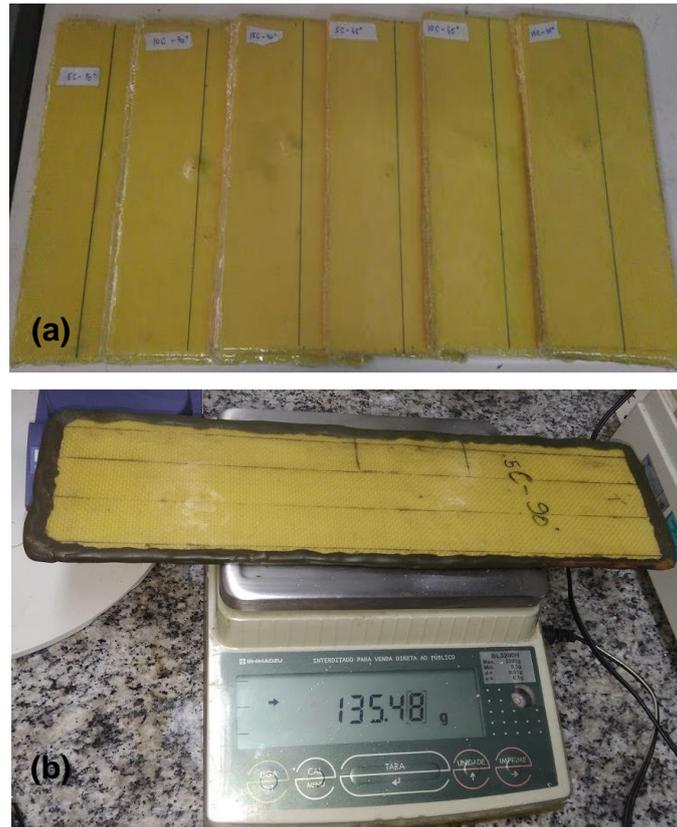


Figura 3.6 - Placas compósitas logo após a laminação em (a) e pesagem de um dos laminados com as bordas seladas em (b).

3.5 Preparo dos Corpos de Prova

Os corpos de prova foram cortados com jato de água e areia com dimensões de 25 mm de largura por 250 mm de comprimento. Os exemplares foram então preparados para os testes de tração seguindo-se as etapas a seguir.

Primeiro, a região central do corpo de prova foi marcada e lixada com lixas 400, 500 e 600, nessa ordem, para tirar irregularidades e permitir melhor adesão dos *strain gages* (extensômetros). Este equipamento permite a medição da deformação sofrida pelo material e foram colados utilizando-se a cola Tecbond-725. Os terminais de aquisição foram então colados ao material e foi realizada a solda dos terminais do *strain gage* no terminal de aquisição. Foram utilizados 5 *strain gages* uniaxiais e sete biaxiais nos CPs não envelhecidos, e todos os CPs envelhecidos foram instrumentados com *strain gages* biaxiais. Os corpos de provas (CPs) já instrumentados são mostrados na Figura 3.7.

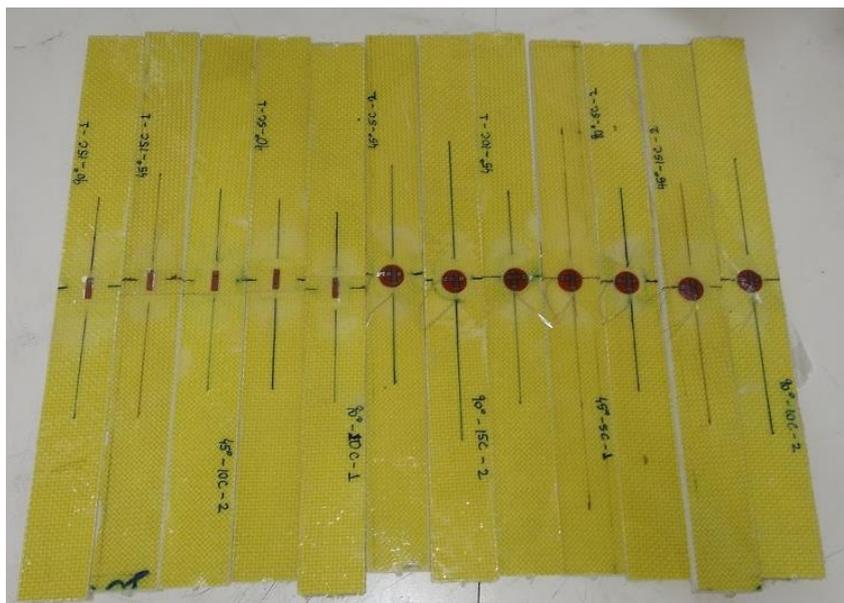


Figura 3.7 - Corpos de prova não envelhecidos com os *strain gages* colados.

A nomenclatura utilizada nos corpos de prova possui duas ou três partes e deve ser interpretada da seguinte forma: a primeira parte corresponde à orientação das camadas (90 ou 45); a segunda parte corresponde ao número de camadas da amostra (5C, 10C ou 15C); já a terceira parte corresponde à diferenciação para corpos de prova com mesma configuração de orientação e número de camadas (1 ou 2). Assim, por exemplo, o CP 90-5C-2, representa o CP de número 2 que possui fibras orientadas a 0/90° e 5 camadas de tecido.

3.6 Testes de Tração e Cisalhamento

Os testes mecânicos foram realizados em uma máquina universal de testes INSTRON modelo 8802. Realizou-se um total de 24 testes a uma velocidade de deslocamento de 2 mm/min da célula de carga. A medição da deformação foi realizada por *strain gages* uniaxiais ou biaxiais da marca Kyowa. A Tabela 3.1 e a Tabela 3.2 trazem as dimensões aproximadas dos CPs testados.

Tabela 3.1 - Dimensões em mm dos CPs com tecido a 0/90°.

Corpo de Prova	5C-1	5C-2	10C-1	10C-2	15C-1	15C-2	
CPs não envelhecidos	Largura	25,34	25,07	25,15	25,31	25,22	25,32
	Comp.	250,10	250,05	249,95	250,10	250,00	249,95
	Espessura	3,49	3,55	7,11	7,08	8,93	8,72
CPs envelhecidos	Largura	25,11	25,24	25,22	25,44	25,36	25,51
	Comp.	250,15	250,10	250,00	250,05	250,10	249,95
	Espessura	3,68	3,64	7,07	6,51	8,89	9,41

Tabela 3.2 - Dimensões em mm dos CPs com tecido a $\pm 45^\circ$.

Corpo de Prova	5C-1	5C-2	10C-1	10C-2	15C-1	15C-2	
CPs não envelhecidos	Largura	25,30	25,16	25,47	25,53	25,22	25,28
	Comp.	250,05	250,15	250,10	249,85	250,00	250,05
	Espessura	3,55	3,43	6,52	6,32	9,31	9,29
CPs envelhecidos	Largura	25,17	25,32	25,25	25,38	25,16	25,36
	Comp.	250,00	250,10	250,05	249,90	249,85	250,10
	Espessura	3,58	3,75	6,29	6,48	9,48	9,41

3.7 Avaliação da Porosidade e Espessura Estrutural

A quantidade de poros e a espessura estrutural das placas originais e algumas envelhecidas foi determinada por análises tomográficas. Amostras quadradas com lado de aproximadamente 15,5 mm foram colocadas em um

tomógrafo (modelo V|TOME|M 300 – GE) e a análise foi realizada com os parâmetros de aquisição mostrados na Tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3 - Parâmetros de aquisição utilizados na microtomografia.

Tensão	40 kV
Corrente	200 μ A
Frames	5
Filtro	0,5 mm de Al
Tamanho de Pixel	9,34
Passo angular	0,4°

Os resultados desta análise são mostrados na seção 5.2.

Capítulo 4 – Análise Numérica

4.1 Introdução

O Método de Elementos Finitos (MEF) é um método numérico que se baseia na resolução de equações diferenciais para produzir soluções para um problema de valor de contorno. A principal ideia do MEF é representar o domínio de forma aproximada pela reunião de um número finito de elementos, como mostra a Figura 4.1. Então, o somatório das respostas de cada elemento representa uma solução aproximada para o problema real.

As etapas do MEF são descritas no trabalho de Hutton (2004), o qual divide o processo de análise pelo MEF em três fases gerais:

i. Pré-processamento. Nesta etapa inicial deve ser definido o domínio geométrico do problema físico, o tipo de elemento a ser utilizado e suas propriedades, as condições de contorno e as cargas aplicadas.

ii. Solução. Aqui as equações algébricas que governam o problema são formadas em forma de matrizes e são resolvidas para as variáveis de interesse.

iii. Pós-processamento. Os resultados obtidos são aqui analisados e avaliados. Deve-se checar se os resultados estão de acordo com o problema físico proposto e se são fisicamente possíveis.

O programa utilizado neste projeto para a modelagem numérica foi o ABAQUS versão 6.14.

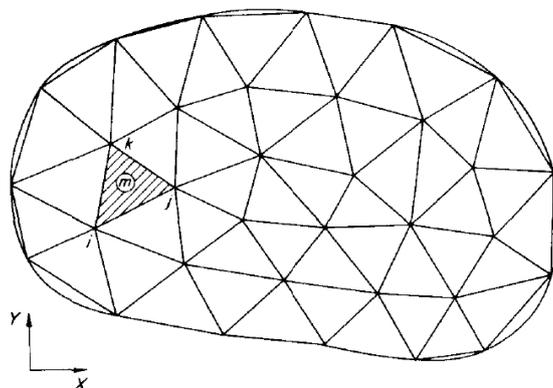


Figura 4.1 - Domínio 2D discretizado com elementos triangulares (FENNER, 1996).

4.2 Etapas da Análise Numérica

Um modelo numérico simplificado foi desenvolvido para analisar o comportamento do material sob diferentes condições. Esta seção mostra e explica o processo de criação e análise do modelo.

4.2.1 Geometria do Modelo

Uma casca em três dimensões (3D) foi criada com geometria de $\frac{1}{2}$ de circunferência, como pode ser visto na Figura 4.2. Essa simplificação da geometria foi escolhida devido à simetria do modelo, visando reduzir o tempo e esforço computacional. O plano de simetria corresponde ao plano YZ, sendo Z+ a direção longitudinal do casco cilíndrico.

A casca possui diâmetro interno de 2,3 m e comprimento de 7,0 m. As bordas são perfeitamente circulares enquanto uma ovalização de 0,5% foi utilizada no centro do modelo para simular imperfeições de construção e para evitar problemas de não convergência em função do carregamento de pressão externa a ser aplicado. Tais dimensões simulam a seção de um separador real e possibilitaram a análise com tempo computacional razoável. As dimensões do vaso foram obtidas do trabalho de Bigourdan *et al.* (2006).

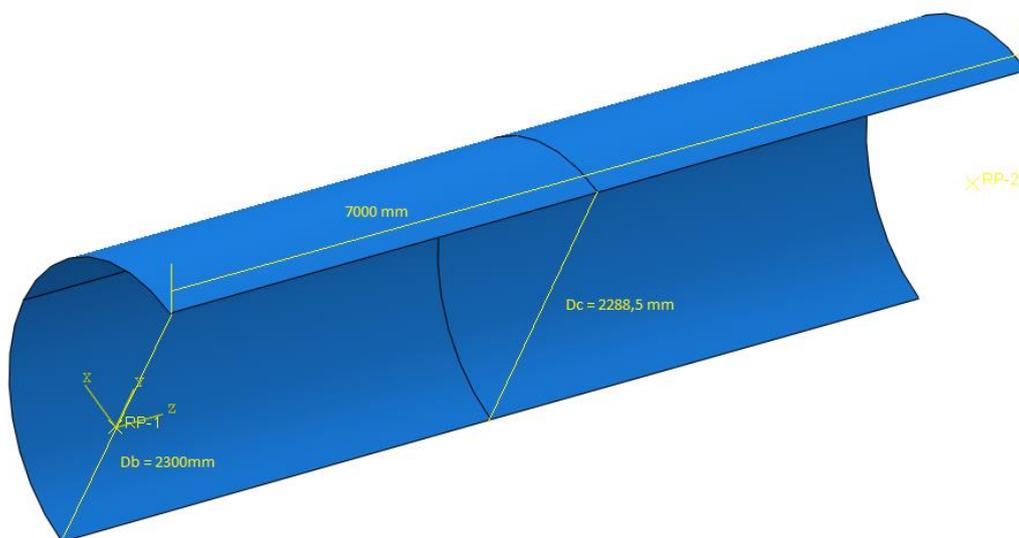


Figura 4.2 - Modelo Geométrico com as dimensões principais, onde Db é o diâmetro da borda e Dc é o diâmetro do centro.

4.2.2 Carregamento e Condições de contorno

Dois carregamentos foram aplicados ao modelo. O principal deles é a pressão externa em toda casca do vaso. O outro é uma força pontual, conhecida como *end cap effect*, ou efeito de tampo, aplicada em uma das bordas de fora para dentro em um ponto de referência no centro. Essa força foi calculada multiplicando-se a pressão externa pela área da seção transversal do casco dividida por dois, já que o modelo utiliza apenas metade da geometria. Para que o efeito desta força fosse transmitido para toda circunferência do vaso, uma função de acoplamento foi utilizada. Esses carregamentos podem ser vistos na Figura 4.3.

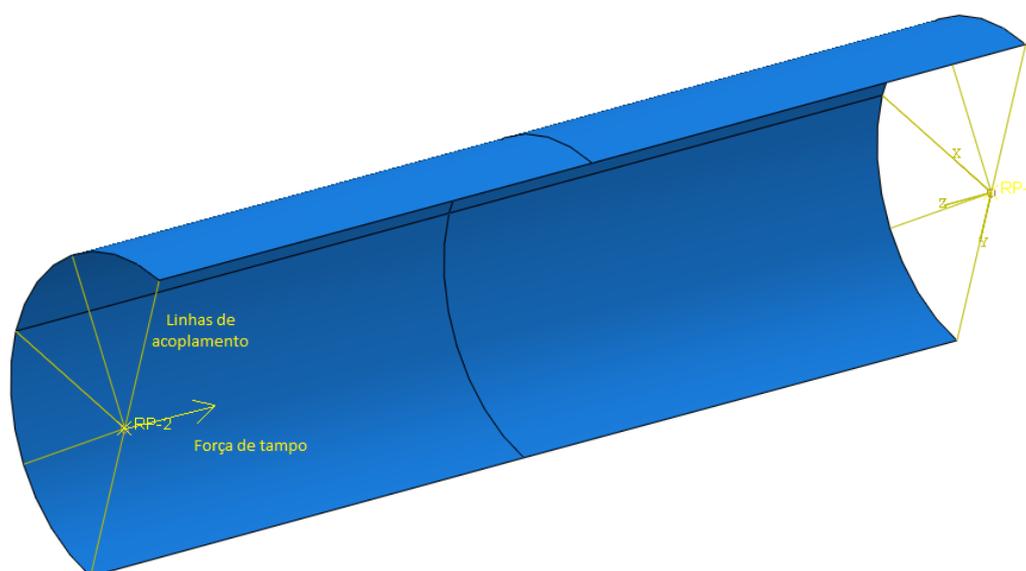


Figura 4.3 - Força de tampo e linhas de acoplamento.

Três condições de contorno foram utilizadas. No plano longitudinal, temos a condição de simetria em relação ao plano YZ; em uma das bordas, o ponto de referência RP-1 foi completamente fixado, sem possibilidade de movimento nem rotação em eixo algum. O ponto de referência RP-2 da outra borda teve apenas o movimento no eixo Z permitido.

4.2.3 Malha do Modelo

A malha utilizada para discretizar o modelo foi composta de elementos de casca (*shell elements*). Esse tipo de elemento é indicado quando a espessura é significativamente menor que as outras dimensões. Além disso, a utilização de

um modelo sólido tornaria muito mais complexa a utilização do modelo de falha para materiais compósitos embutido no programa (ABAQUS, 2014).

Dois tipos de elementos de casca estão disponíveis no Abaqus: convencional e contínuo, como pode ser visto na Figura 4.4. O trabalho de Barbero (2013), mostra que os resultados são muito próximos para um mesmo modelo utilizando elementos convencionais e contínuos.

Dado que o modelo compósito tem sua espessura definida pela quantidade de camadas, a opção mais prática para avaliar diferentes configurações de espessura é utilizar os elementos de casca convencionais. Isso facilita a variação da espessura da parede dentro do mesmo modelo, sem precisar criar um modelo para cada configuração.

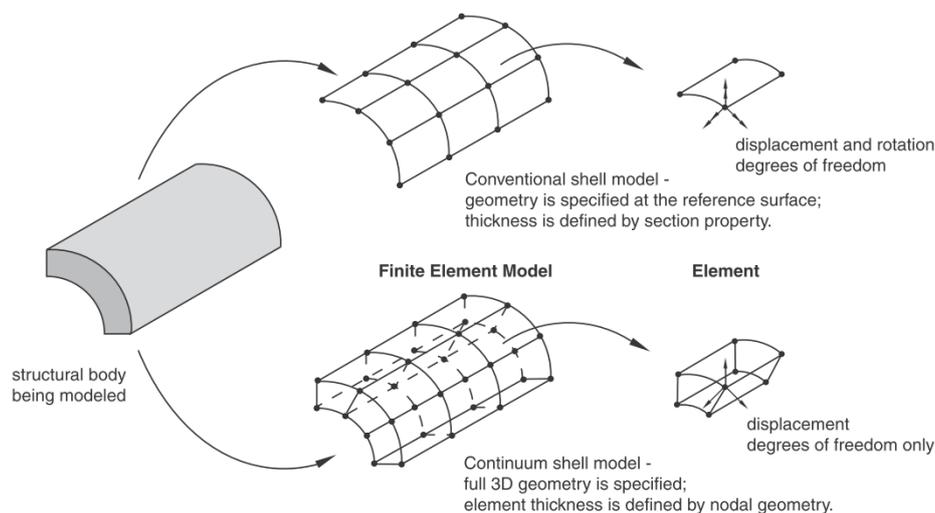


Figura 4.4 - Elemento de casca convencional e contínuo (ABAQUS MANUAL, 2014).

Dentre os elementos convencionais podemos optar por lineares ou quadráticos. Neste trabalho foram utilizados elementos do tipo S4R, o qual é um quadrilátero linear com 4 nós e integração reduzida.

Um estudo de sensibilidade de malha foi realizado para quatro refinamentos diferentes e pode ser observado na Tabela 4.1 abaixo. Nessa análise, um ponto no centro do casco teve a tensão de Von Mises avaliada para cada tamanho de elemento no incremento que antecede a falha.

Tabela 4.1 – Análise de sensibilidade de malha.

Tamanho do Elemento	Tensão de Mises (MPa)	Quantidade de Elementos na Malha
45	80,41	12.840
35	80,34	20.800
25	80,24	40.320
15	80,22	111.840

Como pode ser visto, até o tamanho 25 a mudança na tensão de Mises ocorre na primeira casa decimal. A partir desse tamanho, a variação passa a acontecer na segunda casa decimal. Entretanto, do tamanho 25 para o 15 há um aumento significativo da quantidade de elementos no modelo, aumentando também o tempo computacional. Desse modo, decidiu-se que o tamanho 25 era o mais viável a ser utilizado nas simulações, pois fornece uma malha bem refinada com resultados precisos e bom tempo computacional.

A Figura 4.5 a seguir mostra a malha utilizada no modelo.



Figura 4.5 – Malha de elementos utilizada no modelo.

4.2.4 Propriedades dos Materiais

Três materiais foram utilizados nas simulações numéricas: o compósito de fibra de aramida e resina epóxi caracterizado experimentalmente neste trabalho, a espuma polimérica sintética Divinycell® HCP100 desenvolvida para aplicações submersas em estruturas sanduíche e o aço ASME A570, o qual foi

considerado ter comportamento elástico perfeitamente plástico. As propriedades desses materiais podem ser vistas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Propriedades dos materiais usados na modelagem numérica.

(MPa)	Compósito	Espuma	Aço
E_1	13485	650	191000
E_2	13485	650	-
ν_{12}	0,23	0,3	0,3
G_{12}	1491	170	-
G_{13}	1000	170	-
G_{23}	1000	170	-
Tensão de Escoamento	-	-	586

Os módulos de elasticidade E_1 e E_2 e o coeficiente de Poisson, ν_{12} , do compósito foram extraídos do teste mecânico do exemplar envelhecido com 15 camadas orientadas a $0/90^\circ$. O módulo de cisalhamento G_{12} foi retirado do teste de cisalhamento do CP envelhecido com 15 camadas orientadas a $\pm 45^\circ$. Tais valores são apresentados no Capítulo 5. Os módulos G_{13} e G_{23} tiveram seus valores assumidos com base no valor do módulo de cisalhamento da resina epóxi utilizada por Manes et al. (2014). As propriedades do aço A570 foram retiradas de relatório de um estudo interno do Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS/COPPE/UFRJ). A configuração dos corpos de prova mencionados são descritas no Capítulo 3.

Além dos valores mostrados na Tabela 4.2, também foi definido uma densidade de 410 kg/m^3 para a espuma.

A Tabela 4.3 mostra os dados de falha utilizados para o compósito e foram retirados do trabalho de Manes et al. (2014). Os dados da espuma, assim como sua densidade, foram retirados do boletim técnico do fabricante (Diab Group, 2018).

Tabela 4.3 - Propriedades de falha do compósito.

Propriedade	Compósito (MPa)	Espuma (MPa)
X^T	1850	13,5
X^C	185	11,6
Y^T	1850	13,5
Y^C	185	11,6
S^T	77	7,3
S^L	77	7,3

Onde:

X^T é a resistência longitudinal à tração;

X^C é a resistência longitudinal à compressão;

Y^T é a resistência transversal à tração;

Y^C é a resistência transversal à compressão;

S^T é a resistência longitudinal ao cisalhamento; e

S^L é a resistência transversal ao cisalhamento.

O modelo de análise de falha de materiais compósitos incluído no programa Abaqus é baseado na teoria de Hashin e Rotem (1973). Nele, quatro tipos de falha são considerados: tração da fibra, compressão da fibra, tração da matriz e compressão da matriz.

4.2.5 Simulações Realizadas

O modelo foi executado para diversas configurações de espessura e profundidade para os vasos com parede feita apenas de compósito, feita de estrutura sanduíche e feita de aço ASME A570.

Para o casco compósito e sanduíche, o início da falha do compósito foi utilizado como parâmetro de falha do casco, onde foi analisado qual dos quatro tipos de falha mencionados anteriormente ocorria primeiro. Vale notar que tal modelo de falha serve apenas para o compósito e não avalia a falha do núcleo da estrutura sanduíche.

Para o casco de aço, a pressão de início de deformação plástica foi considerada como a pressão de falha do material.

As profundidades analisadas foram de 300 m, 500 m, 1000 m, 1500 m, e 2000 m e para cada uma foi utilizada uma sobre pressão de 30% na pressão equivalente aplicada como fator de segurança.

Esta função de análise de falha do compósito embutida no programa Abaqus apenas indica se houve o início da falha, não fornecendo informações sobre a propagação e evolução da mesma.

Capítulo 5 – Resultados e Discussão

5.1 Resultados da Análise Numérica

Diversas configurações de profundidade e parede do vaso foram utilizadas nas simulações do modelo numérico. Esta seção traz os resultados encontrados.

Para facilitar o entendimento, considere a representação simplificada de um casco sanduíche mostrada na Figura 5.1.

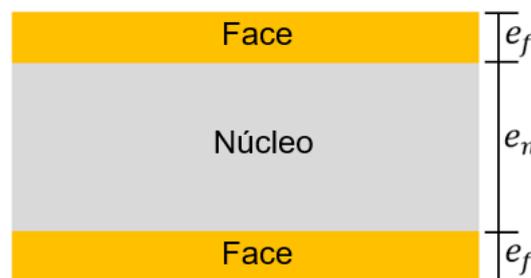


Figura 5.1 - Seções do casco sanduíche.

Nesta figura, em amarelo são representadas as duas faces compósitas (uma interna e outra externa) feitas de resina e Kevlar® e em cinza é representada a espuma do núcleo. Também são mostradas as espessuras de cada face (e_f) e a espessura do núcleo (e_n). Nas simulações numéricas, as espessuras das faces são sempre consideradas iguais e a espessura total do casco (e_t) é dada pela soma das duas faces mais o núcleo ($e_t = 2e_f + e_n$).

A Tabela 5.1 traz os resultados das simulações realizadas. Nesta tabela, a primeira coluna mostra a profundidade considerada e a segunda coluna mostra a pressão mínima de referência que o modelo deve suportar. A terceira mostra o tipo de casco da simulação, podendo ser só compósito ou sanduíche. A quarta coluna traz a espessura de uma face compósita (e_f) e a espessura da espuma do núcleo (e_n); a quinta coluna mostra a espessura total do casco (e_t). A sexta coluna mostra quantas camadas bidirecionais de Kevlar foram utilizadas para se obter a respectiva espessura da face. As três últimas colunas trazem, nessa ordem, a pressão de colapso do vaso, a pressão considerada como pressão de falha e o modo de falha do casco.

Nas simulações, as espessuras foram sendo gradativamente aumentadas até que a pressão de falha fosse maior ou igual a pressão mínima de referência,

indicando que tal configuração suportaria a pressão externa da profundidade em questão. A pressão de colapso indica o momento em que o vaso colapsa na simulação, e em todos os casos o colapso ocorreu após a falha do vaso.

Tabela 5.1 - Simulações numéricas para os cascos compósito e sanduíche.

Prof. (m)	Pressão mínima de referência (MPa)	Tipo de Casco	Espessura dos materiais*	Esp. Total (e_t)*	Nº de Camadas de tecido em uma face	Pressão de Colapso (MPa)	Pressão de Falha (MPa)	Modo de falha
300	5,85	Comp.	126	126	210	7,25	7,22	Compressão de fibra
300	5,85	Sand.	$e_f = 27$ $e_n = 100$	154	90	6,20	5,99	Compressão de fibra
500	6,8	Sand.	$e_f = 27$ $e_n = 125$	179	90	7,90	7,40	Compressão de fibra
1000	13,3	Sand.	$e_f = 45$ $e_n = 150$	240	150	18,67	16,30	Compressão de fibra
1500	19,3	Sand.	$e_f = 63$ $e_n = 175$	301	210	>24,12	20,12	Compressão de fibra
2000	26,5	Sand.	$e_f = 72$ $e_n = 250$	394	240	>30,05	25	Compressão de fibra

*todas as espessuras estão em mm

Para cada simulação, foi verificado de que modo o compósito falhava. Em todos os casos, o modo de falha foi a compressão da fibra na camada mais externa do casco, com o colapso da estrutura ocorrendo após a falha. A diferença entre a pressão de início de falha e a pressão de colapso se mostrou pequena para baixas profundidades e aumentou com o aumento da pressão externa.

Como mencionado anteriormente, não se obteve informações sobre a propagação da falha, apenas se houve o início ou não da mesma.

Para a profundidade de 300 m foi feita uma comparação do casco somente com compósito (mostrado na primeira linha da tabela) e em formato sanduíche (segunda linha). Observa-se que o vaso feito apenas com compósito precisa de 210 camadas para suportar a pressão de 5,85 MPa. Já na estrutura sanduíche, 90 camadas de tecido e uma camada de 100 mm da espuma são

suficientes para suportar a mesma pressão externa. A necessidade de menos camadas no laminado também reduz a quantidade de resina utilizada no laminado e, conseqüentemente, a massa total da estrutura.

A pressão de falha do casco compósito foi aproximadamente 20% maior que a pressão de falha do casco sanduíche. Entretanto, a tendência da tecnologia é a construção em formato sanduíche, pois com a espuma é possível aumentar a resistência e a rigidez sem, no entanto, aumentar demais o peso da estrutura, uma vez que a quantidade de fibra e resina necessárias para substituir a espuma do núcleo seriam mais pesadas. Dessa forma, para as demais profundidades só foram realizadas simulações com casco sanduíche.

Para a profundidade de 500 m, foram necessárias duas faces compósitas de 27 mm (45 camadas de Kevlar cada) mais 125 mm de espuma no núcleo. A mesma linha de interpretação deve ser utilizada para as demais profundidades.

Um casco metálico também foi analisado no modelo numérico e a Tabela 5.2 mostra o valor da espessura da parede para as mesmas condições de profundidade e pressão. Neste caso, o critério utilizado para determinar o limite de operação do vaso foi a permanência no regime elástico. Assim, logo que se iniciava qualquer deformação plástica, esse foi considerado o momento em que a falha ocorria.

Tabela 5.2 - Especificações para vaso metálico.

Profundidade (m)	Pressão aplicada (MPa)	Espessura da parede (mm)	Pressão de Colapso (Mpa)	Início de deformação plástica (Mpa)
300	5,85	35	7,96	7,96
500	6,8	35	7,96	7,96
1000	13,3	45	16,36	15,69
1500	19,3	60	32,04	21,04
2000	26,5	80	43,99	28,09

O vaso metálico antes e após o colapso pode ser visto na Figura 5.2, que também mostra as tensões de Von Mises envolvidas. Os vasos compósitos

apresentaram o mesmo padrão de deformação, porém com deslocamentos menores.

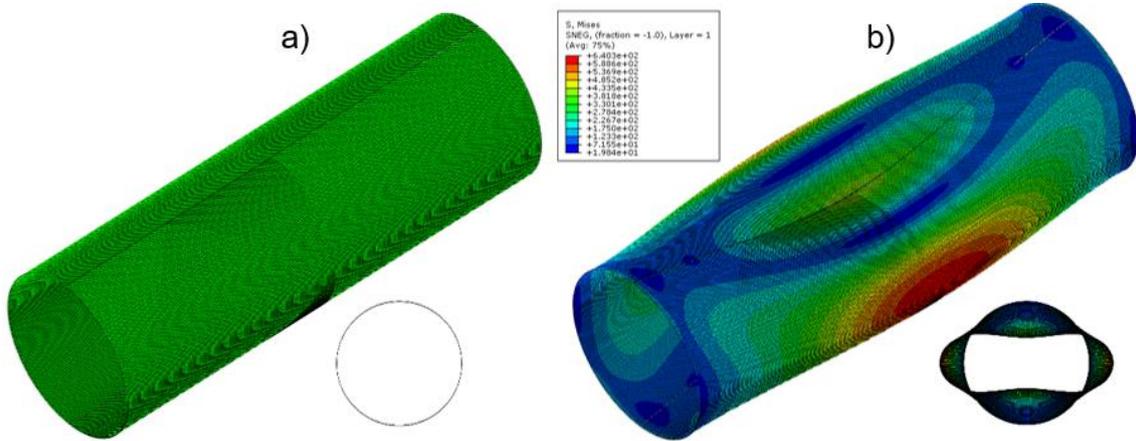


Figura 5.2 - Comparação do vaso antes (a) e depois (b) do colapso no modelo numérico.

Uma comparação entre o casco metálico e sanduíche pode ser vista na Figura 5.3, que traz em forma de gráfico as espessuras totais apresentadas na Tabela 5.1 e na Tabela 5.2.

Para o casco metálico (linha laranja), o valor entre parênteses representa a redução de espessura em relação à espessura do casco sanduíche (linha azul). Por exemplo, para 2000 m, a espessura do casco metálico é 79,7% menor do que a espessura do casco sanduíche.

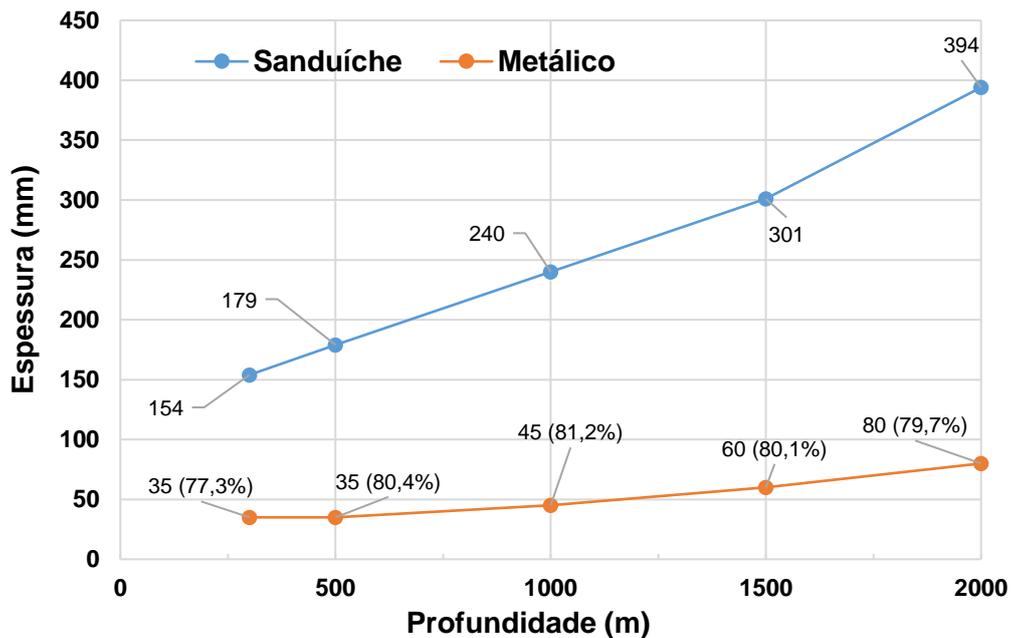


Figura 5.3 - Comparação das espessuras da parede do vaso para estrutura sanduíche (azul) e metálica (laranja).

Caso fossem construídos cascos com as configurações apresentadas acima, a Figura 5.4 mostra a comparação entre a massa do vaso metálico (em azul) e a massa do vaso sanduíche (em laranja), calculadas aproximadamente a partir da densidade dos materiais. A porcentagem apresentada mostra a redução de massa do casco sanduíche em relação à massa do casco metálico.

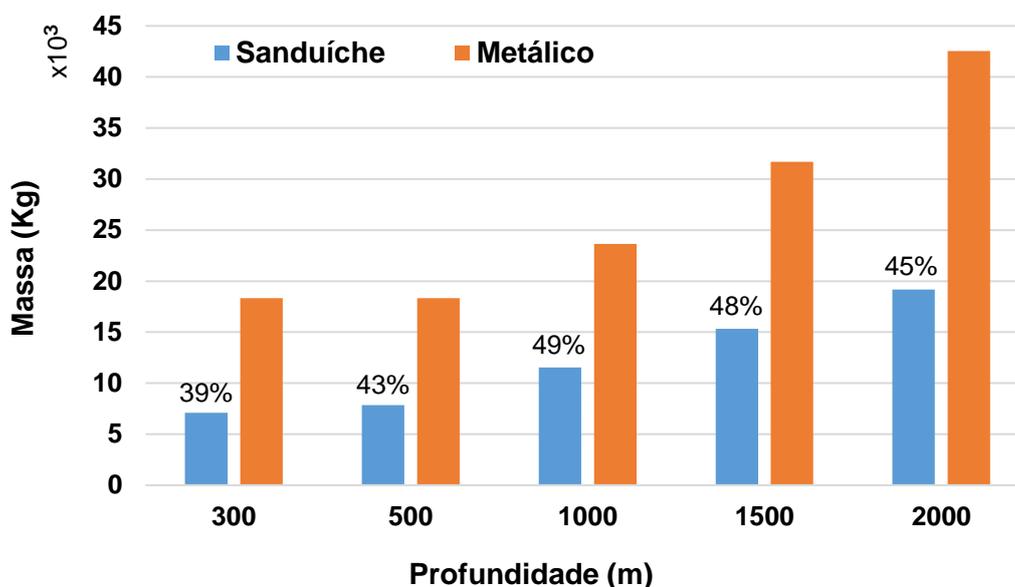


Figura 5.4 - Comparação de massa entre o casco sanduíche (azul) e metálico (laranja).

Analisando a Figura 5.3, é possível perceber que a espessura do vaso sanduíche é bem superior à espessura do vaso metálico. Em contrapartida, a Figura 5.4 mostra que apesar da maior espessura da parede, o vaso sanduíche apresenta significativa redução de massa em relação ao casco metálico. Por exemplo, para a profundidade de 2000 m, o vaso sanduíche apresenta uma massa 45% menor que a do casco metálico.

5.2 Resultados da Análise de Porosidade e Espessura

A análise tomográfica, mostrada na seção 3.5, permitiu calcular a porosidade das amostras, além de realizar uma análise da espessura das mesmas.

A Figura 5.5, a Figura 5.6 e a Figura 5.7 foram obtidas da análise tomográfica da amostra 5C-90.

Na Figura 5.5, a cor mais escura (mais alaranjada) mostra a localização dos poros, enquanto a cor mais clara mostra os demais materiais.

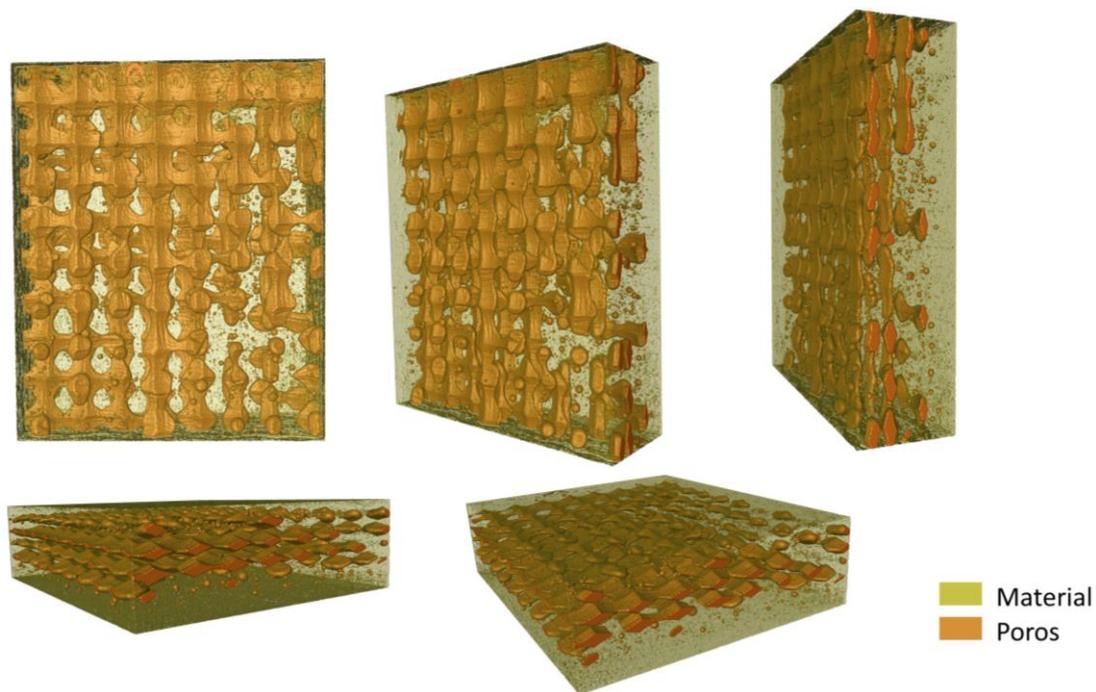


Figura 5.5 - Relação de material e poros na amostra original 5C-90.

Já a Figura 5.6 mostra a distribuição dos tamanhos dos poros para a amostra. Em vermelho temos os poros com menor diâmetro, o qual cresce passando pela cor verde até a cor azul, onde temos os maiores diâmetros, com o máximo de 0,50 mm.

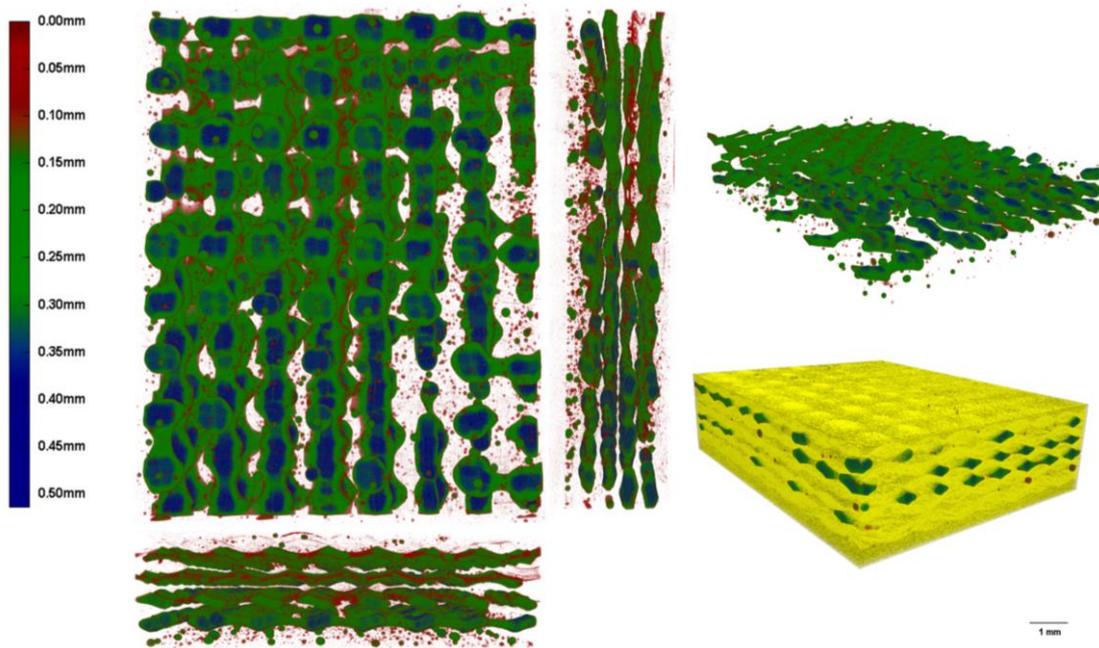


Figura 5.6 – Distribuição do tamanho de poros na amostra original 5C-90.

A Figura 5.7 mostra a distribuição mais detalhada dos poros em relação ao diâmetro.

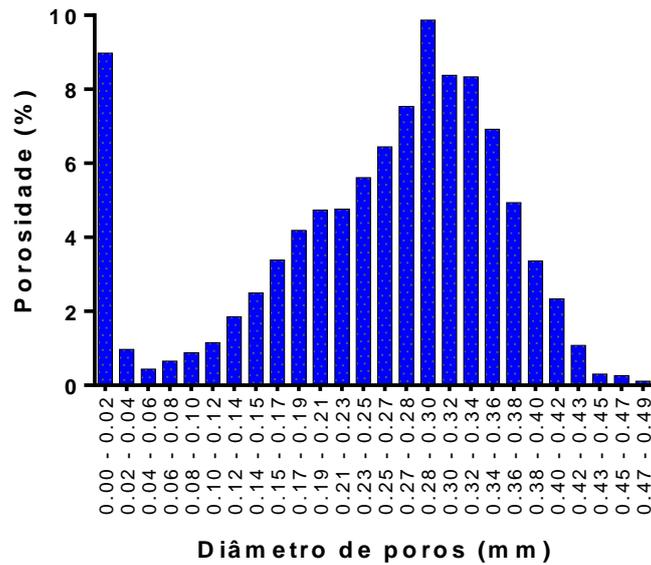


Figura 5.7 - Histograma de poros para a amostra original 5C-90.

A Figura 5.8, traz uma comparação de amostras a $\pm 45^\circ$ (a) e a $0/90^\circ$ (b). É interessante notar como a localização dos poros se concentra na interface fibra/matriz, claramente observável pela orientação das “linhas de poros”.

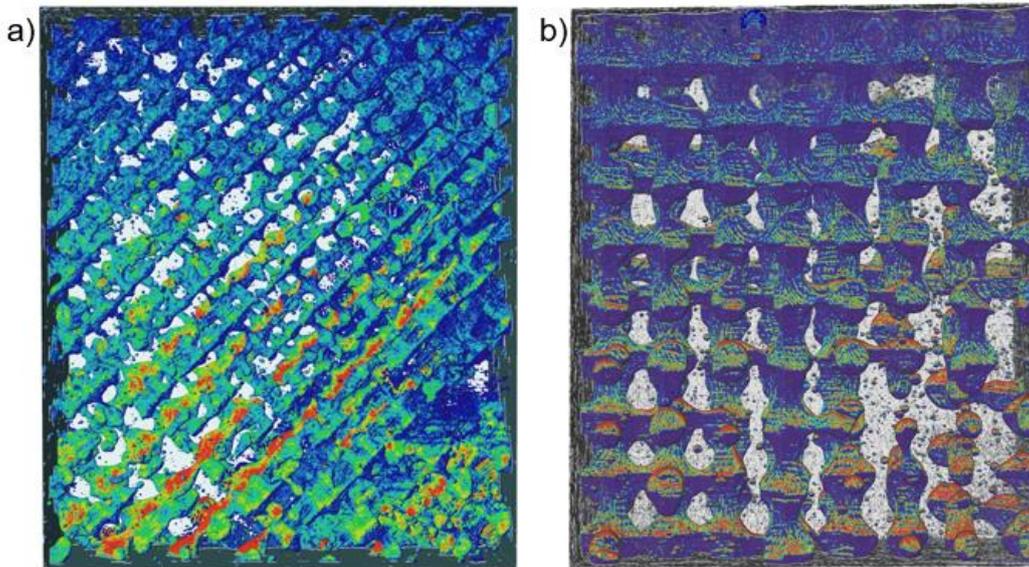


Figura 5.8 - "Linhas de poros" para a amostra a $\pm 45^\circ$ em (a) e $0/90^\circ$ em (b).

A Tabela 5.3 resume os valores de porosidade encontrados pela análise tomográfica e a redução da porosidade sofrida pelos materiais após o teste de absorção sob pressão.

Tabela 5.3 - Porosidade encontrada pela tomografia para as amostras originais e envelhecidas.

Amostras	Porosidade		
	Originais	Envelhecidas	Redução
90-5C	18,53%	16,81%	1,72%
90-10C	15,82%	-	-
90-15C	19,51%	18,59%	0,92%
45-5C	18,21%	14,87%	3,34%
45-10C	17,74%	-	-
45-15C	17,72%	13,76%	3,96%

Pode-se observar que as amostras envelhecidas apresentaram menor valor de porosidade, o que pode ter ocorrido pelo colapso de alguns poros devido à alta pressão externa. Adicionalmente, observou-se que as amostras com tecido a $\pm 45^\circ$ apresentaram maior redução na quantidade de poros do que as amostras a $0/90^\circ$.

A análise de espessura estrutural é mostrada na Figura 5.9. Tal análise mostra a distribuição de espessura para cada amostra e pode ser interpretada como os valores aproximados de espessura para cada camada.

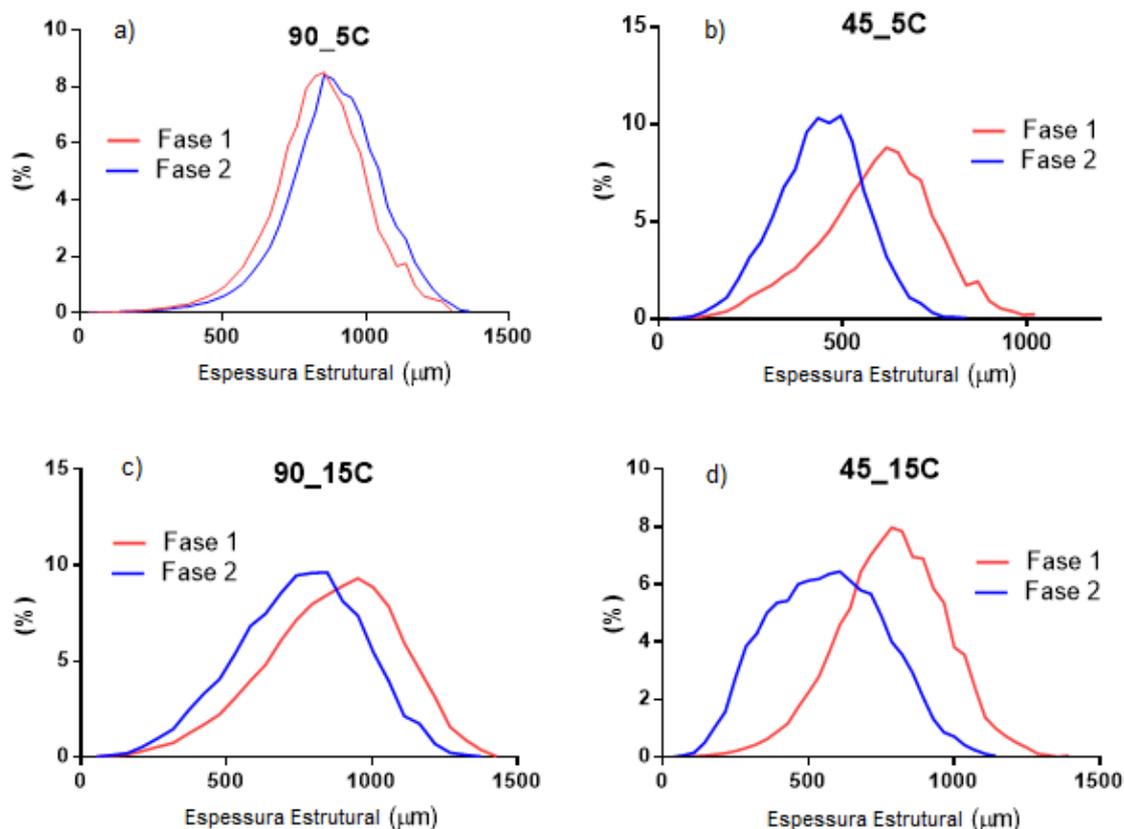


Figura 5.9 - Distribuição de espessura para as amostras originais (fase 1) e envelhecidas (fase 2).

5.3 Resultados do Teste de Absorção

O teste de envelhecimento sob pressão foi realizado colocando-se as amostras em uma câmara hiperbárica pressurizada a 3000 psi com água salgada na temperatura de 4°C. Durante o período de 189 dias, as amostras foram periodicamente pesadas para se avaliar a absorção de água do material. Os resultados experimentais obtidos das dez pesagens realizadas ao longo do período de teste são mostrados a seguir.

Primeiro, na Tabela 5.4, são apresentadas as frações mássicas e volumétricas dos componentes calculadas com base na Norma ASTM D3171 (2015). Nesta tabela, a segunda letra das siglas se refere ao tipo de fração calculado (“M” para fração mássica e “V” para volumétrica). Já a terceira letra é referente ao material (“R” para resina e “F” para fibra). Assim, a abreviação “FMF” quer dizer “fração mássica de fibra”, por exemplo.

Tabela 5.4 - Frações mássicas e volumétricas calculadas para as amostras.

Angulação	CP	FMF (%)	FMR (%)	FVF (%)	FVR (%)
	5C	54,6	45,4	43,3	47,2
0/90°	10C	53,0	47,0	43,0	49,9
	15C	62,2	37,8	51,7	41,1
	5C	55,6	44,4	43,7	45,7
-45/+45°	10C	59,5	40,5	47,5	42,3
	15C	58,6	41,4	49,2	45,4

Em seguida, a Tabela 5.5 traz o ganho de massa em gramas para as placas com tecido a 0/90° juntamente com a porcentagem que essa absorção representa em relação ao peso da amostra antes do teste. Na Tabela 5.6, temos os mesmos parâmetros da Tabela 5.5, mas em relação às placas com tecido a $\pm 45^\circ$. Essas tabelas mostram o ganho total de massa, ou seja, inclui a água absorvida pelas placas e pelo Tubolit (material utilizado na vedação das bordas).

Tabela 5.5 - Quantidade absorvida em gramas e a porcentagem em relação ao peso da amostra seca para as placas com tecido a 0/90°.

Placas com tecido a 0/90°						
Dias	5C		10C		15C	
	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	%
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	6,5	4,8	0,7	0,3	1,5	0,4
6	7,4	5,4	1,6	0,7	2,0	0,6
16	8,2	6,0	2,2	0,9	2,9	0,9
30	8,5	6,3	2,7	1,1	3,3	1,0
62	9,2	6,8	3,3	1,4	3,9	1,2
101	9,8	7,2	5,4	2,3	4,6	1,4
134	10,3	7,6	5,8	2,5	5,1	1,5
161	10,6	7,8	6,3	2,7	5,6	1,7
189	10,8	8,0	6,6	2,8	5,9	1,8

Tabela 5.6 - Quantidade absorvida em gramas e a porcentagem em relação ao peso da amostra seca para as placas com tecido a ±45°.

Placas com tecido a ±45°						
Dias	5C		10C		15C	
	Massa (g)	%	Massa (g)	%	Massa (g)	%
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	2,0	1,4	0,2	0,1	0,1	0,0
6	2,6	1,9	0,8	0,3	0,3	0,1
16	3,3	2,3	1,5	0,6	0,5	0,1
30	3,8	2,7	1,9	0,8	0,7	0,2
62	4,4	3,2	2,5	1,0	0,9	0,3
101	5,4	3,8	3,2	1,3	1,2	0,3
134	6,0	4,2	3,7	1,6	1,4	0,4
161	6,4	4,6	4,1	1,7	1,6	0,5
189	6,8	4,8	4,5	1,9	1,7	0,5

Para saber quanto o Tubolit absorve de água, um corpo de prova feito somente desse material também foi colocado na câmara hiperbárica e a massa ganha é mostrada na Tabela 5.7. É possível observar que o material alcança a saturação com um total de aproximadamente 1,10 g de ganho de massa, o que corresponde a 3,4% de seu peso.

Tabela 5.7 – Pesagem em g do Tubolit: material utilizado na selagem das bordas.

Dias	Tubolit (g)	%
0	0,00	0,00
15	1,05	3,24
60	1,09	3,36
100	1,11	3,42
134	1,11	3,42
167	1,10	3,39
189	1,11	3,42

A Tabela 5.8 mostra quantas gramas de Tubolit foram utilizadas em cada amostra e quanta água foi absorvida. Esses valores foram calculados com base na porcentagem absorvida (3,42%) pela amostra de Tubolit no teste de envelhecimento sob pressão.

Tabela 5.8 – Massa, em gramas, de Tubolit utilizada em cada amostra e quantidade absorvida.

Amostras	Massa de Tubolit (g)	Massa de água absorvida (g)
5C	26,10	0,89
0/90°	10C	22,73
	15C	40,21
	5C	31,94
-45/+45°	10C	37,56
	15C	34,49
		1,09
		1,29
		1,18

A Figura 5.10 e a Figura 5.11 mostram, respectivamente, as curvas totais de absorção (incluindo o absorvido pelo Tubolit) para as amostras a 0/90° e ±45°.

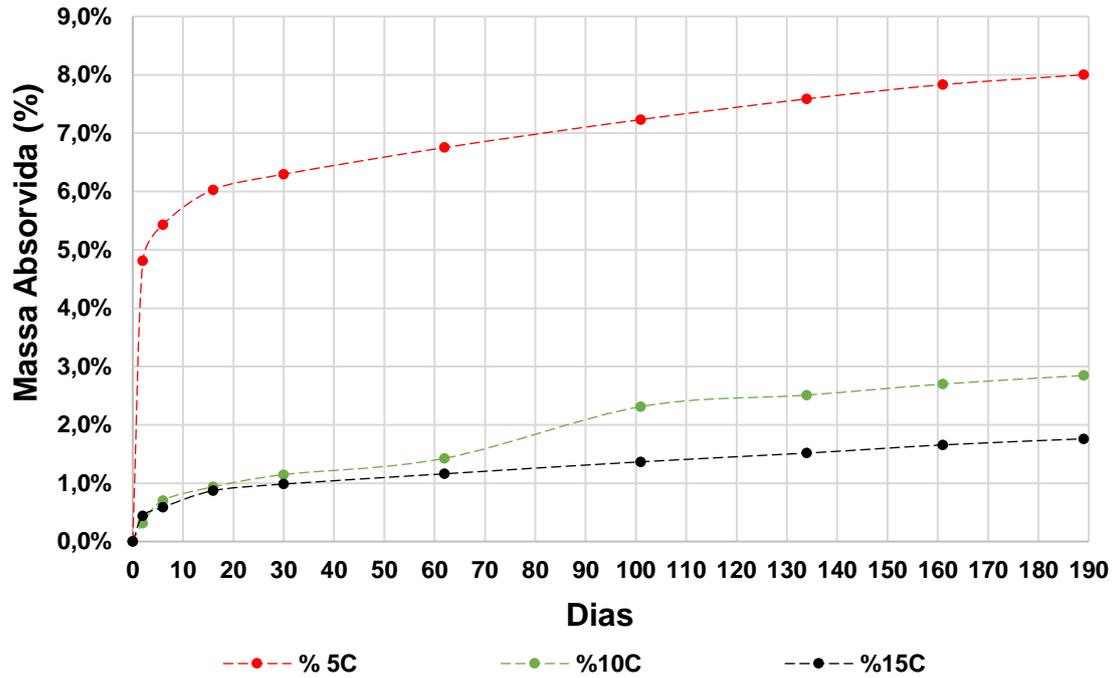


Figura 5.10 - Curvas totais de absorção para as amostras com tecido a 0/90°.

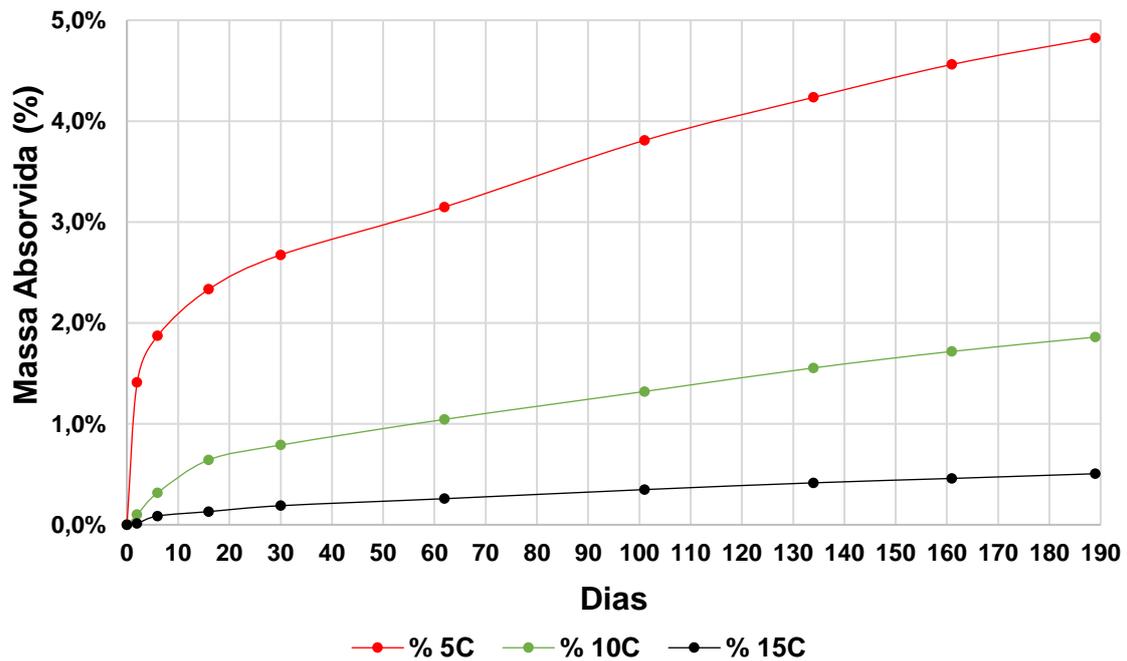


Figura 5.11 – Curvas totais de absorção para as amostras com tecido a ±45°.

Já a Figura 5.12 traz um comparativo do percentual total absorvido por todas as amostras. O valor entre parênteses na legenda representa a espessura, em mm, da respectiva amostra medida com o micrômetro.

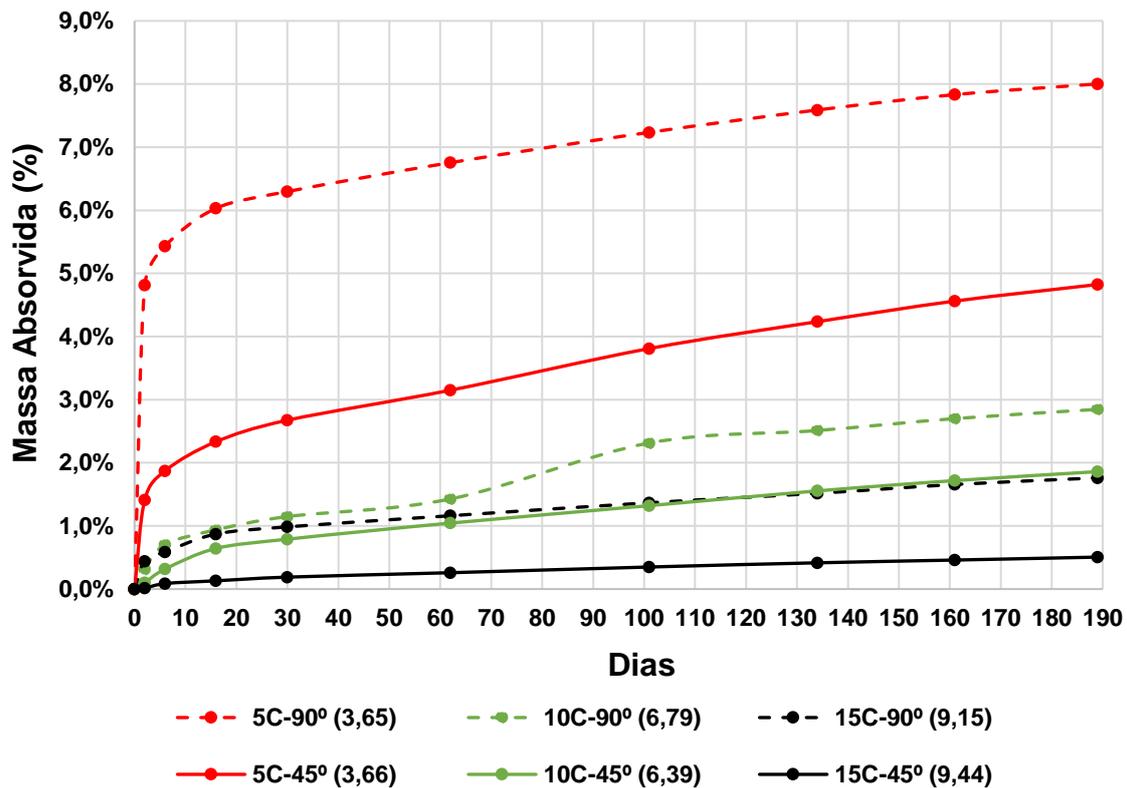


Figura 5.12 - Comparação do percentual absorvido para todas as amostras.

Analisando os resultados, pode-se perceber que as amostras apresentaram comportamento semelhante da curva de absorção, com uma absorção linear inicial seguida de uma taxa menor de aumento que tende ao equilíbrio. Observa-se que nenhuma das amostras alcançou o nível de saturação durante os 189 dias de exposição, como resume a Figura 5.12.

É possível notar que apesar de as curvas de absorção se assemelharem à absorção fickiana, não se pode afirmar que ela foi obedecida em nenhuma amostra, uma vez que a saturação não foi atingida durante o período avaliado. O principal problema decorrente deste fato é a impossibilidade de se calcular o coeficiente de difusão do material, já que a estimativa deste parâmetro depende da quantidade de água absorvida na saturação, como mostrado na equação (2.5) da seção 2.3.1.

O fato de o compósito não ter alcançado a saturação pode ser parcialmente explicado por Pilli et al. (2009). Os autores avaliaram a influência da espessura no tempo necessário para atingir a saturação em compósitos de fibra de carbono e resina epóxi. Eles observaram que, para uma mesma difusividade, uma amostra de 3 mm levaria 10 anos para saturar enquanto uma

amostra de 6 mm levaria 37 anos aproximadamente, mostrando como pode ser longo o processo de absorção.

Segundo Weitsman (2000), o processo de absorção apresentado pelas amostras, com uma região linear inicial seguida de um aumento constante sem atingir a saturação, pode ser classificada como Pseudo-Fickiana.

Para Carlsson e Du (2018), a absorção fickiana é mais observada em polímeros e compósitos com baixa presença de poros. Compósitos com maiores volumes de poros ou a presença de fissuras na matriz influenciam o mecanismo de ingresso de água e tendem a se desviar do comportamento fickiano, como foi o caso do compósito estudado aqui.

Outro comportamento apresentado pelas amostras testadas neste trabalho foi a diminuição da quantidade absorvida com o aumento da espessura do laminado, em consequência da menor taxa de difusão observada nas amostras mais espessas. Esse mesmo resultado foi encontrado pelo trabalho de Chilali et al. (2016), que utilizou fibras de linho com resina epóxi e acrílica. Segundo o autor, a taxa de difusão pode ser definida pela inclinação da parte linear inicial da curva de absorção.

Segundo Bunsell (apud CHILALI et al, 2016, p. 84), a menor taxa de difusão pode ser explicada pelo rearranjo das moléculas do polímero nas amostras mais espessas, o que causaria a menor taxa de absorção. Porém, o trabalho não detalha como seria esse rearranjo. Eles também atribuíram esse resultado ao maior inchamento sofrido pelas amostras mais finas, que foi de aproximadamente 6,17%, comparado com 5,47% das amostras de 10 mm. Segundo os autores, o maior inchamento gera micro trincas e maior descolamento da interface, permitindo que as moléculas de água ingressem mais facilmente no material e aumentando a absorção final.

Como foi observado, o compósito deste trabalho apresentou um comportamento semelhante ao trabalho de Chilali et al. (2016), apesar de a fibra usada ter sido diferente. Entretanto, a influência da absorção na matriz e na interface fibra/matriz pode ser considerada semelhante. Embora a variação da espessura não ter sido avaliada durante a pesagem das amostras, acredita-se que a maior absorção das amostras mais finas tenha sido causada pelo maior inchamento das mesmas, uma vez que a diferença na porcentagem de poros não é significativa entre as amostras que apresentaram tanta diferença de

absorção. Tal efeito pode ter sido acentuado pelo fato de a baixa temperatura do teste ter dificultado a relaxação das moléculas, deixando a matriz mais frágil e mais suscetível ao aparecimento de microfissuras.

Outro fator que pode ter contribuído para o comportamento observado é o exposto por Arnold et al. (2013). Segundo os autores, uma maior quantidade de camadas de fibra no compósito poderia atuar como uma barreira física e dificultar a difusão de água nesta direção, fazendo com que amostras mais espessas apresentem menor absorção do que amostras mais finas no mesmo período de tempo.

Alguns trabalhos encontraram resultados contrários aos obtidos aqui, ou seja, reportam um aumento de absorção com aumento da espessura ou nenhuma influência da espessura na absorção (Pal et al., 2012, Kootsookos e Mouritz, 2004). Porém, vale notar que esses trabalhos utilizaram resinas poliéster e vinil éster.

Como pode ser visto nos trabalhos supracitados, cada combinação de fibra/resina pode apresentar um comportamento específico de absorção, com alguns materiais sendo mais sensíveis ao ingresso de água do que outros.

Vale observar que as estruturas compósitas utilizadas em grandes profundidades apresentam espessura elevada por causa da grande pressão hidrostática, o que torna este resultado de absorção bastante interessante para tal aplicação.

A amostra 90°-10C apresenta uma região peculiar interessante, aproximadamente entre os dias 60 e 100. Nessa faixa, observa-se uma mudança na inclinação da curva, indicando um aumento na taxa de absorção. Essa mudança de inclinação pode ter ocorrido devido à água absorvida ter encontrado uma região com alta concentração de poros no interior da amostra, facilitando e acelerando o acúmulo, pois segundo Summerscales (2019), poros são locais propícios para armazenamento de água.

Esse comportamento também poderia ser explicado pela formação de microtrincas ou do descolamento localizado na interface entre fibra e matriz, gerado pelo processo de inchamento da mesma. Porém, se esse fosse o processo dominante, seria mais provável que essa mudança de inclinação da curva também estivesse presente nas outras amostras, o que não foi observado.

Analisando agora as amostras com tecido a $\pm 45^\circ$, observa-se que elas apresentam a mesma tendência de diminuição da quantidade absorvida e da taxa de absorção com o aumento do número de camadas, o que pode ser explicado pelos motivos apresentados acima.

Uma característica interessante pode ser observada comparando-se as amostras $0/90^\circ$ com as $\pm 45^\circ$. Vemos que para o mesmo número de camadas e valores próximos de espessura, todas as amostras com tecido a $\pm 45^\circ$ apresentaram menor absorção relativa, indicando que esse tipo de entrelaçamento das fibras possa oferecer uma maior resistência à penetração de água.

Entretanto, essa afirmativa não pode ser totalmente comprovada, uma vez que existem na literatura trabalhos que verificaram que a direção da fibra influencia a absorção (Dhakal et al., 2016, Boukhoulida et al., 2006) e outros trabalhos que não (Neumann e Marom, 1987).

Outro fator que pode ter contribuído para este comportamento é a natureza altamente heterogênea do material, gerada por fatores como o desalinhamento entre as fibras e entre camadas e a distribuição de poros no laminado.

Nenhum trabalho que utilizasse fibra de aramida e resina epóxi e avaliasse a influência da espessura ou a orientação das fibras na absorção de água foi encontrado.

5.4 Resultados dos Testes de Tração

Com o objetivo de se avaliar a influência da absorção de água salgada nas propriedades mecânicas do material, testes de tração foram realizados antes e depois do envelhecimento na câmara hiperbárica. Esta seção traz e comenta os resultados encontrados.

5.4.1 Propriedades Mecânicas

Para cada número de camadas (5, 10 e 15), dois exemplares foram testados. Os CPs com tecido a $\pm 45^\circ$ foram utilizados para o cálculo das propriedades de cisalhamento segundo a Norma ASTM-D3518 (2013) enquanto os com camadas a $0/90^\circ$ foram usados para cálculo do módulo de elasticidade e

da resistência segundo a Norma ASTM-D3039 (2014). A Figura 5.13 e a Figura 5.14 trazem as curvas obtidas dos testes mecânicos para as amostras não envelhecidas a $\pm 45^\circ$ e a $0/90^\circ$, respectivamente.

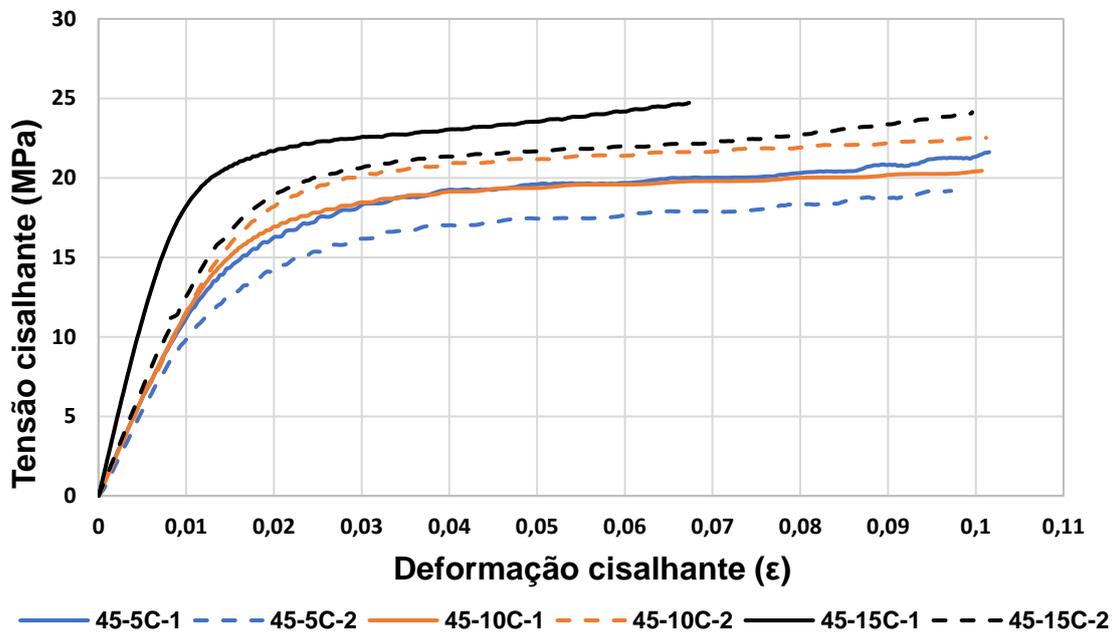


Figura 5.13 – Curvas tensão cisalhante x deformação cisalhante dos CPs não envelhecidos com tecido a $-45/+45^\circ$.

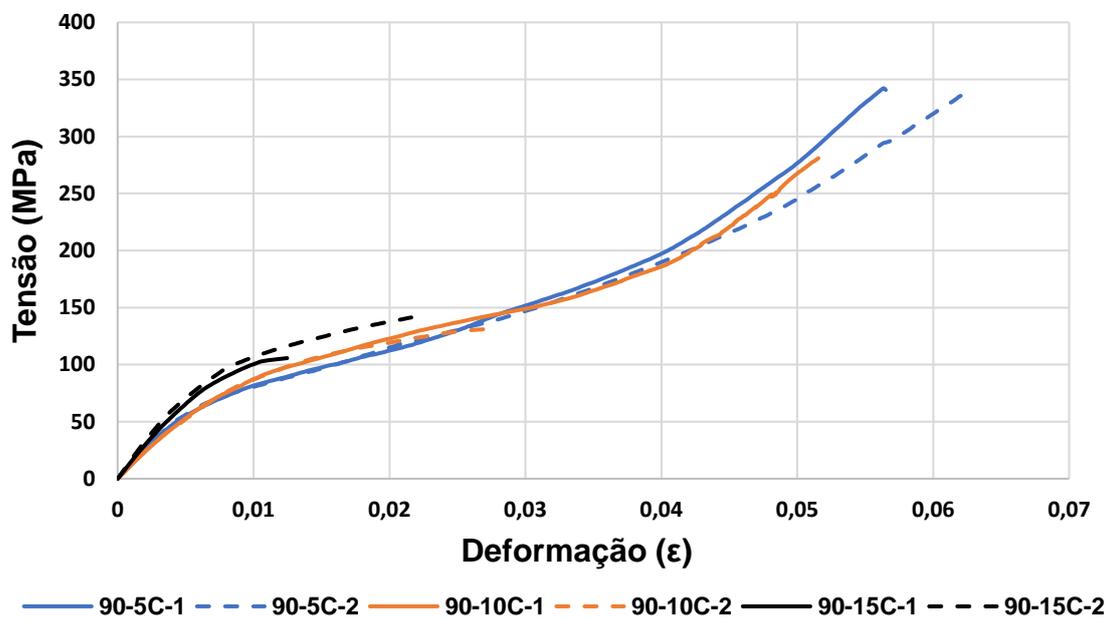


Figura 5.14 – Curvas tensão x deformação dos CPs não envelhecidos com tecido a $0/90^\circ$.

Pode-se observar nas figuras acima que elas apresentaram uma pequena discrepância. Isso pode ter ocorrido devido às regiões de acúmulo de resina mostradas no fim da seção 3.3. Essas regiões deformam o tecido de fibra, mudando de uma configuração linear para uma configuração encurvada. Esta

configuração gera pontos de concentração de tensão e podem reduzir a resistência do material.

A Figura 5.15 e a Figura 5.16 a seguir mostram as curvas dos testes de tração para as amostras que foram envelhecidas no teste sob pressão.

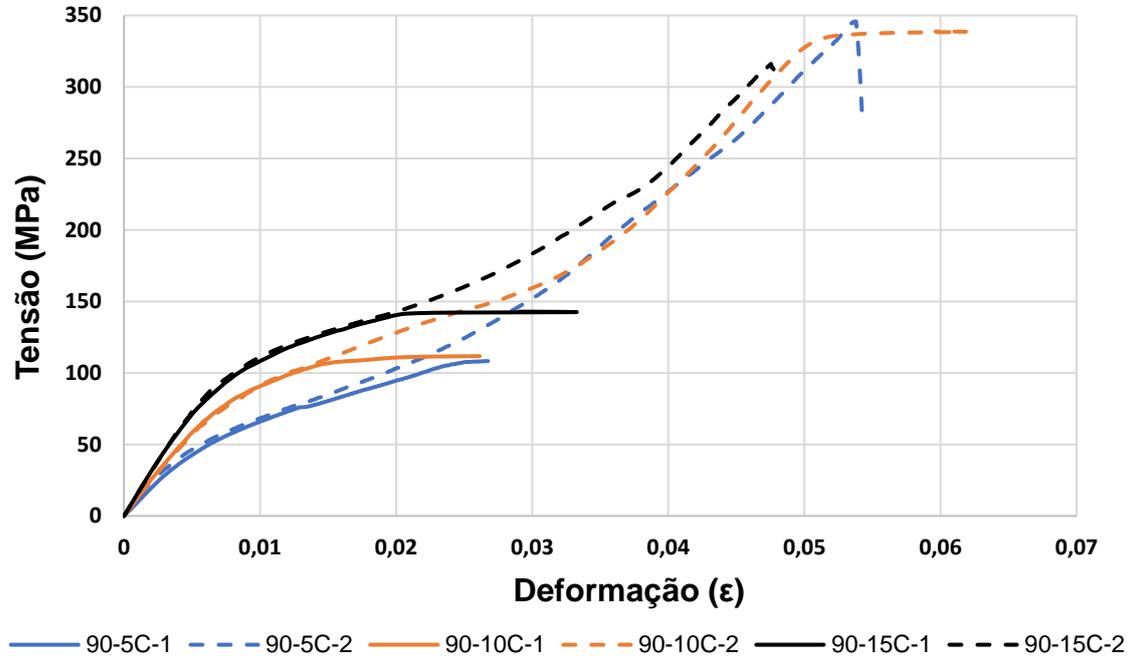


Figura 5.15 - Curvas tensão x deformação dos CPs envelhecidos com tecido a 0/90°.

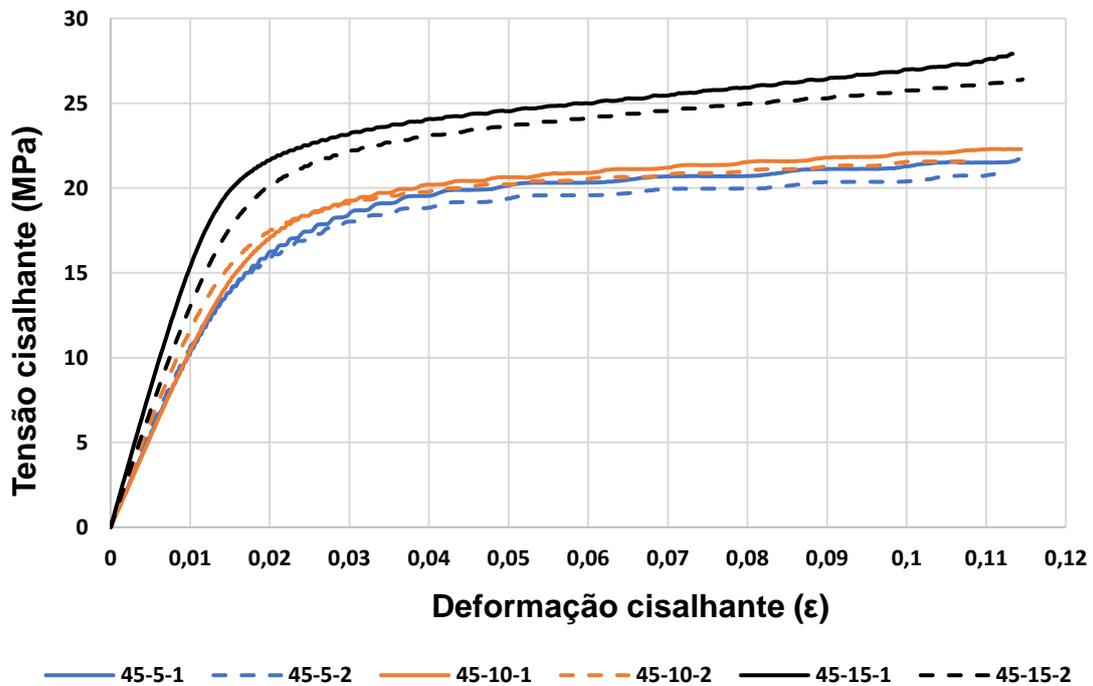


Figura 5.16 - Curvas tensão cisalhante x deformação cisalhante para os CPs envelhecidos com tecido -45/+45°.

Já a Figura 5.17 e a Figura 5.18 trazem uma comparação das curvas dos testes mecânicos antes e depois do envelhecimento.

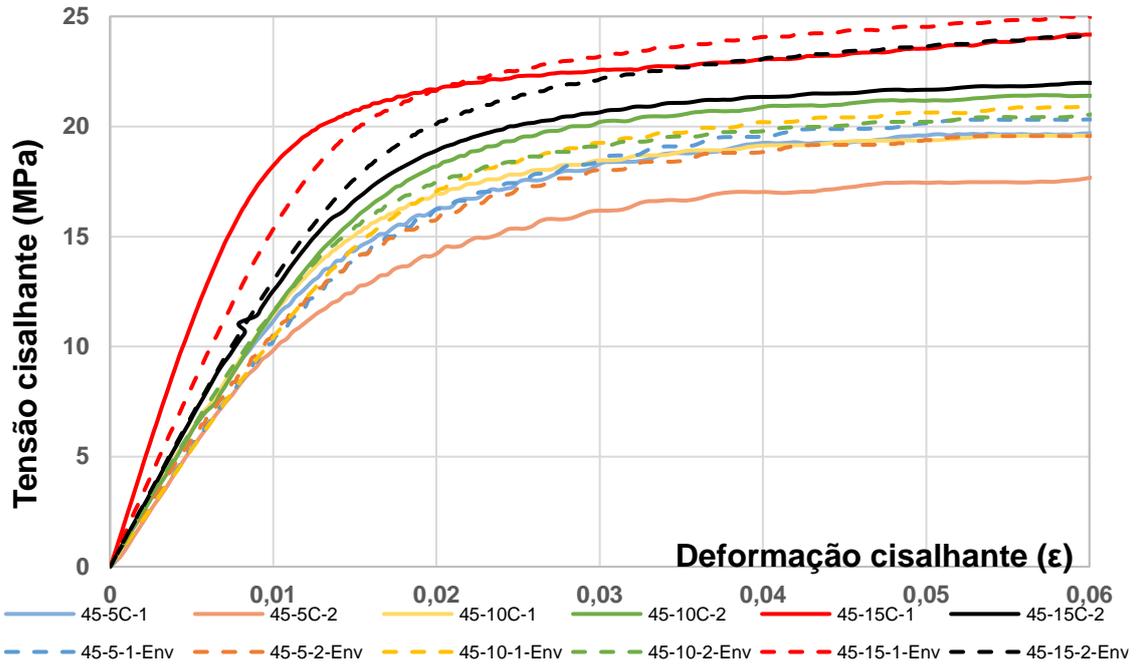


Figura 5.17 - Comparação dos testes de cisalhamento antes (linha sólida) e depois (linha tracejada) do envelhecimento.

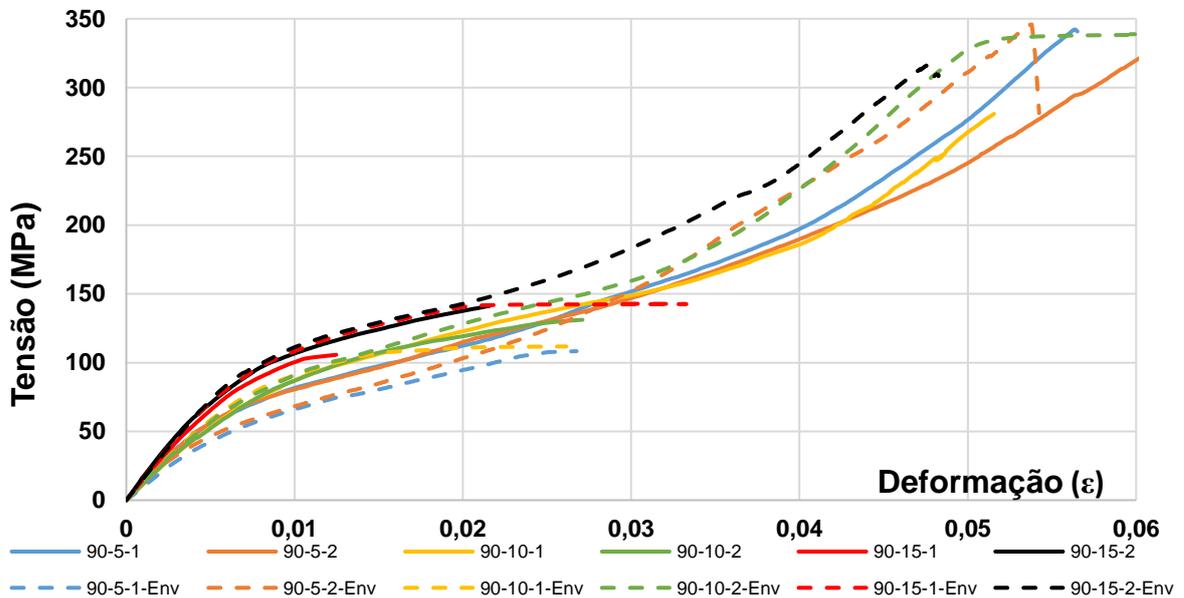


Figura 5.18 - Comparação dos testes de tração antes (linha sólida) e depois (linha tracejada) do envelhecimento.

A seguir, a Tabela 5.9 mostra os valores calculados para o módulo de elasticidade antes e depois do envelhecimento.

Tabela 5.9 - Módulo de elasticidade calculados antes e depois do teste sob pressão.

CP	Módulo de Elasticidade (E) (GPa)			
	Não Envelhecidos	Média	Envelhecidos	Média
90-5-1	11,78	11,99	9,48	9,73
90-5-2	12,20		9,99	
90-10-1	11,10	11,11	11,09	11,45
90-10-2	11,11		11,80	
90-15-1	13,67	14,37	12,02	13,49
90-15-2	15,06		14,95	

Observando os resultados, é possível visualizar que a absorção de água gera uma tendência de diminuição do módulo de elasticidade, embora essa redução seja muito pequena e mais amostras seriam necessárias para confirmar tal comportamento.

As amostras com 5 e 15 camadas apresentaram uma pequena diminuição no valor do módulo enquanto as amostras com 10 camadas sofreram um pequeno aumento. Entretanto, como a variação encontrada foi bem pequena, não se pode afirmar que tal variação foi causada pela absorção de água, uma vez que pode ter ocorrido por outros fatores, como a presença de defeitos internos ou de regiões onde houve concentração de resina.

A Tabela 5.10 traz os valores da resistência à tração antes e depois do envelhecimento.

Tabela 5.10 - Resistência à tração antes e depois do envelhecimento.

CP	Resistência à Tração (MPa)			
	Não Envelhecidos	Média	Envelhecidos	Média
90-5-1	342,19	339,63	336,72	341,28
90-5-2	337,06		345,83	
90-10-1	282,34	302,95	304,37	327,16
90-10-2	323,55		349,95	
90-15-1	333,32	336,44	361,95	338,95
90-15-2	339,55		315,95	

Analisando a Tabela 5.10, pode-se perceber que as amostras com 5 e 15 camadas apresentaram um ligeiro aumento na resistência à tração na ordem de 0,5%. Já a amostra com 10 camadas sofreu um aumento de aproximadamente 8%. Essa tendência de aumento também não pode ser totalmente creditada à água absorvida, uma vez que está dentro da dispersão do material.

Roylance (1983) reportou em seu estudo que absorção de água em laminados de aramida/epóxi causou uma pequena redução no módulo de elasticidade e na resistência à flexão, mas aumentou a resistência à tração.

Essa pequena variação encontrada para o módulo pode ser explicada, segundo Siriruk e Penumadu (2014), pelo fato de a absorção geralmente se concentrar nas camadas mais externas do laminado, não afetando a maior parte das camadas interiores, as quais seriam responsáveis por manter a resistência e o módulo das amostras envelhecidas com valor próximo aos valores originais.

Entretanto, a literatura mostra que também há uma variação de resultados para cada tipo de compósito. Assarar et al. (2011) concluíram que a absorção de água reduziu consideravelmente o módulo de elasticidade e a deformação máxima de compósitos de fibra de linho e resina epóxi, mas teve pouco efeito sobre essas mesmas propriedades em compósitos de fibra de vidro/epóxi. Já no trabalho de Shen et al. (2018), os autores perceberam que a absorção de água destilada em laminados de fibra de carbono e resina bismaleimida pouco influenciou o módulo de elasticidade e a resistência à compressão dos laminados.

A Tabela 5.11 traz a variação do módulo de cisalhamento antes e depois do envelhecimento.

Tabela 5.11 - Módulo de cisalhamento calculados antes e depois do teste de absorção.

CP	Módulo de Cisalhamento (G) (GPa)			
	Não Envelhecidos	Média	Envelhecidas	Média
45-5-1	1,19	1,15	1,09	1,10
45-5-2	1,11		1,12	
45-10-1	1,24	1,18	1,07	1,15
45-10-2	1,12		1,23	
45-15-1	1,31	1,33	1,62	1,49
45-15-2	1,35		1,37	

A partir da Tabela 5.11, pode-se observar que as amostras com 5 e 10 camadas praticamente não sofreram alteração no módulo de cisalhamento. Por sua vez, a amostra com 15 camadas mostrou um aumento muito pequeno. Percebe-se que a absorção de água praticamente não alterou o módulo de cisalhamento do material, sendo ainda menos afetado do que o módulo de elasticidade. Tal comportamento pode ser explicado pelos motivos reportados acima no trabalho de Siriruk e Penumadu (2014).

5.4.2 Modos de Falha

Os compósitos falharam de forma progressiva, ou seja, as camadas individuais falharam sucessivamente até que houve a falha total da amostra. Após a primeira camada falhar, há uma queda na carga suportada, seguida por um pequeno aumento dessa carga, pois as demais camadas íntegras ainda conseguem resistir ao tracionamento. Esse comportamento está ilustrado na região final das curvas a seguir, destacada pelos círculos pontilhados.

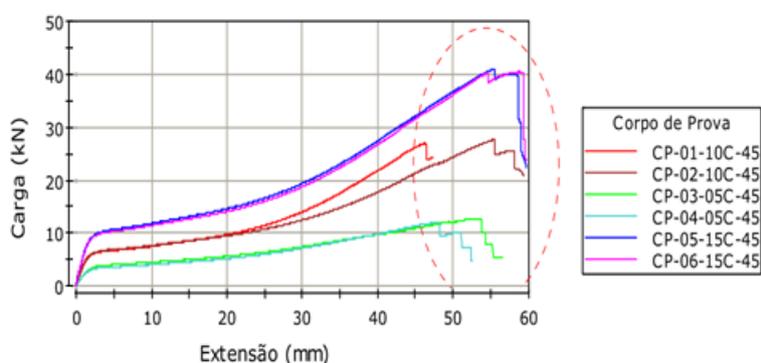


Figura 5.19 - Curvas de carga vs extensão para os CPs a $\pm 45^\circ$ destacando a falha progressiva das camadas.

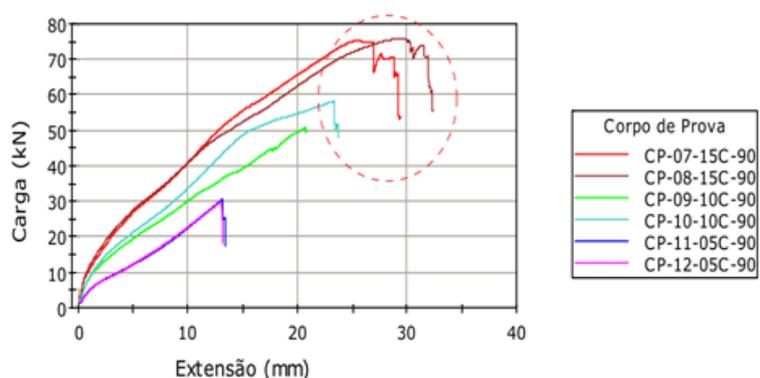


Figura 5.20 - Curvas de carga vs extensão para os CPs a $0/90^\circ$ destacando a falha progressiva das camadas.

O local de falha variou entre perto da garra e na região central do corpo de prova e todos os corpos de prova apresentaram algum grau de delaminação, sendo mais distribuído nos compósitos com tecido a $0/90^\circ$ e mais localizado nas amostras a $\pm 45^\circ$. A Figura 5.21 mostra como a delaminação foi mais severa em uns corpos de prova, (b) e (c), do que em outros, (a). Como foi visto que as amostras a $\pm 45^\circ$ sofreram menos absorção, o efeito do ingresso de água na interface fibra/matriz nessas amostras foi menor, o que pode explicar a delaminação mais localizada na região de falha. Já a delaminação mais distribuída dos CPs a $0/90^\circ$ pode ser explicada pelo maior grau de absorção.

Segundo Raju e O'Brien (2008), a delaminação é um modo de falha onde a fratura acontece entre duas camadas adjacentes e é considerada um dos modos mais comum de falha nos compósitos. Geralmente, essa fratura ocorre devido à existência de descontinuidades localizadas na interface. Esses defeitos, como poros e microtrincas, contribuem para uma menor ligação entre fibra e matriz, geram tensões interlaminares e facilitam este modo de falha.

Para Riccio (2008), a delaminação é um processo perigoso que pode ter início em diversos momentos da vida útil da estrutura e pode levar à sua falha prematura. Para o autor, a delaminação pode ser causada, por exemplo, pelo processo de manufatura, por efeitos higrotérmicos, pelo pós processamento da peça e por impactos sofridos, entre outros.

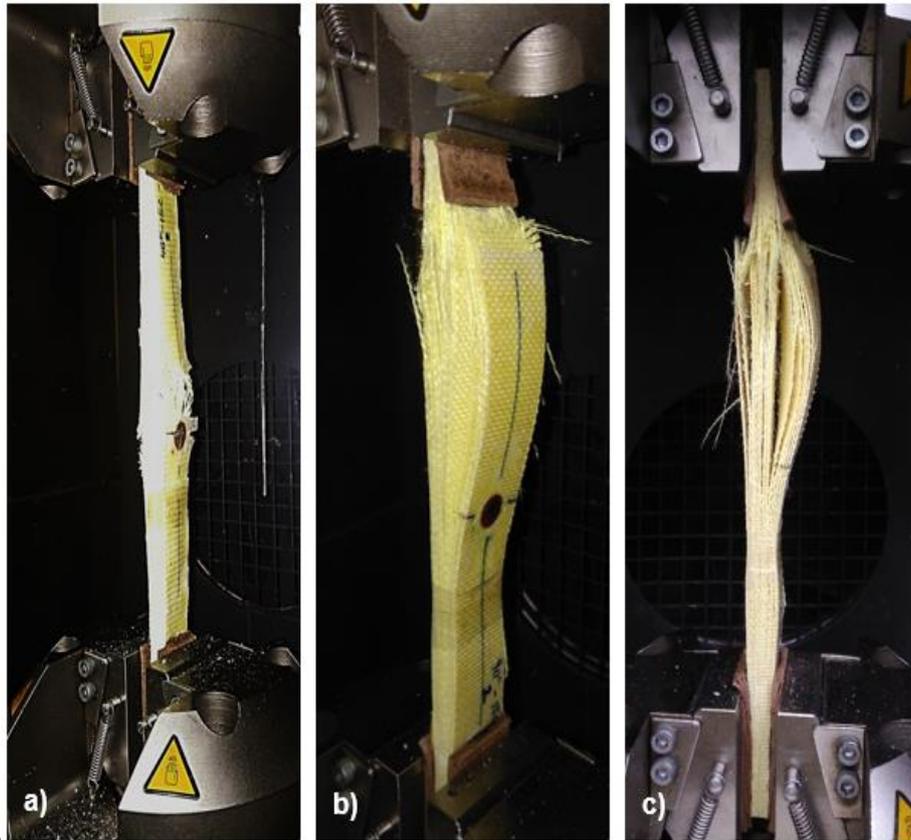


Figura 5.21 - Diferentes graus de delaminação nos CPs $\pm 45^{\circ}$ -15 em (a) e $0/90^{\circ}$ -15 em (b). Vista lateral de (b) em (c).

Capítulo 6 – Conclusões e Recomendações

6.1 Conclusão

Este trabalho avaliou a absorção de água salgada em compósitos de Kevlar (fibra de aramida) e resina epóxi em condições de alta pressão e baixa temperatura. Seis placas de 5, 10 e 15 camadas foram laminadas sendo três com tecido orientado a $0/90^\circ$ e três a $\pm 45^\circ$. Elas tiveram as bordas seladas e foram colocadas em uma câmara hiperbárica contendo água salgada na temperatura de 4°C . Tal câmara foi pressurizada a 3000 psi e durante um período de 189 dias, as amostras foram periodicamente pesadas para se avaliar a absorção de água em função do ganho de massa das mesmas. Para se aferir a influência do ingresso de água nas propriedades do material, testes mecânicos de tração e cisalhamento foram realizados nas amostras originais e envelhecidas. Análises tomográficas foram realizadas nas amostras originais e envelhecidas para quantificação da porcentagem de vazios das amostras.

Um modelo numérico do casco cilíndrico de separador submarino foi desenvolvido e foi incorporado com propriedades obtidas dos testes mecânicos e da literatura. Neste modelo foi possível observar o comportamento do casco sob diferentes pressões externas. Também foi realizada uma comparação entre um casco sanduíche e um casco metálico mostrando as diferenças de espessura de parede, peso e modo de falha para as diferentes profundidades.

A interpretação dos dados experimentais de absorção se mostrou uma tarefa bastante árdua, uma vez que diversos fatores podem influenciar o comportamento do material.

Os testes de absorção mostraram que as amostras com tecido a $0/90^\circ$ absorveram mais água do que as com tecido a $\pm 45^\circ$, apesar de apresentarem espessura bem próxima. Tal fato sugere que a angulação do tecido possa influenciar mais ou menos a absorção, entretanto tal hipótese não pode ser confirmada sem a realização de testes experimentais adicionais. Este comportamento também poderia ser explicado devido à alta heterogeneidade do material estudado. Além disso, todos os materiais apresentaram uma absorção pseudo-fickiana, com uma região linear inicial seguida de uma redução na taxa de absorção que tende ao equilíbrio. Entretanto, nenhuma das amostras atingiu

a saturação nos 189 dias de teste, impossibilitando o cálculo do coeficiente de difusão do material.

Foi observado que o aumento de espessura das amostras gerou uma redução na taxa de difusão e conseqüente diminuição de quantidade absorvida. Acredita-se que tal comportamento seja devido ao possível maior inchamento sofrido pelas amostras mais finas, o que gera mais microtrincas e facilita o ingresso de água. Além disso, as amostras mais finas são mais suscetíveis ao aparecimento de trincas durante o manuseamento e processo de corte dos corpos de prova. A maior difusão nas amostras mais finas também pode ser explicada pela interação das microtrincas nas duas faces do material. Conforme as amostras ficam mais espessas, maior é a separação entre as faces e menor seria essa interação.

Os testes mecânicos mostraram que a absorção de água pouco influenciou o módulo de elasticidade, de cisalhamento, a resistência à tração e ao cisalhamento.

A análise numérica mostrou que o casco sanduíche, apesar de apresentar uma espessura maior de parede, possui uma massa consideravelmente menor que um casco metálico em função da baixa densidade das faces compósitas e da espuma do núcleo

Por fim, pode-se concluir que o material compósito avaliado apresentou bom comportamento de absorção nas condições estudadas. Desse modo, possui certa aplicação na área submarina e poderia ser utilizado na construção do vaso de um separador submarino. A construção deverá ser em formato sanduíche, onde o material seria utilizado na face externa, uma vez que não foi avaliado o comportamento do material em contato com os fluidos produzidos do reservatório.

6.2 Sugestão de Trabalhos Futuros

Trabalhos futuros poderiam analisar a absorção e sua influência nas propriedades de amostras com configuração sanduíche, já que esta estrutura é a mais indicada para altas profundidades. Um modelo numérico pode ser utilizado em conjunto com o objetivo de se comparar o comportamento do casco com diferentes materiais do núcleo e das faces, como a fibra de carbono ou uma

mistura de fibras por exemplo. Assim seria possível otimizar a configuração de construção das seções do casco com as melhores propriedades mecânicas.

Testes experimentais de compressão podem ser realizados para melhor caracterizar o material, uma vez que o principal modo de falha observado na análise numérica foi a compressão das fibras.

Uma vez que a face interna do vaso separador vai estar em contato com o fluido produzido do poço, uma análise da interação/absorção do material compósito com esse tipo de fluido também poderia ser realizada para se obter mais informações sobre o comportamento do material. Em conjunto, uma análise de absorção de água salgada poderia ser realizada em apenas uma face do material para comparar o comportamento de absorção com o observado nesse estudo.

Referências

ABAQUS USER'S MANUAL, 2014. Versão 6.14, Dassault Systèmes

ALMUDAIHESH, F., HOLFORD, K., PULLIN, R., EATON, M., 2020, "*The influence of water absorption on unidirectional and 2D woven CFRP composite and their mechanical performance*". **Compos B 182**. Elsevier

API SPECIFICATION 12J, 2008, **Specification for Oil and Gas Separators**. Washington, American Petroleum Institute.

ARGAVAL, B.D., BROUTMAN, L. J., Chandrashekhara, K., 2006, **Analysis and Performance of Fiber Composites**. 3 ed, New Jersey, USA, John Wiley & Sons.

ARNOLD, J. C., ALSTON, S. M., KORKEES, F., 2013, "*An assessment of methods to determine the directional moisture diffusion coefficients of composite materials.*" **Compos A**; 55. pp. 120–128

ARNOLD, K., STEWART, M., 2008, **Surface Production Operations Volume One: Design of Oil Handling Systems and Facilities**, 3 ed., Oxford, Inglaterra, Gulf Professional Publishing.

ASSARAR, N., SCIDA, D., EL MAHI, A., POILÂNE, C., AYAD, R., 2011, "*Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composite materials: Flax-fibres and glass-fibres*". **Materials and Design 32**, pp 788-795. Elsevier.

AVENA, A., BUNSELL, A. R., 1988, "Effect of Hydrostatic Pressure on the Water Absorption of Glass Fiber-Reinforced Epoxy Resin". **Composites - Volume 19**. pp. 355-357. Paris, França.

BAI, Y., BAI, Q., 2012, **Subsea Engineering Handbook**. Oxford, Inglaterra, Gulf Professional Publishing.

BELLINI, J., 2012, **Fibra de Aramida e sua Aplicação na Confecção de Cabos Ópticos**. Monografia, Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, São Paulo, Brasil.

BIGOURDAN, B., CHAUCHOT, P. *et al.*, 2006, "Composite Materials for Subsea Oil Separation". **Society of Underwater Technology**. pp. 43-56. França.

- BOUKHOULDA, B., F., ADDA-BEDIA, E., MADANI, K., 2006, “*The effect of fiber orientation angle in composite materials on moisture absorption and material degradation after hygrothermal ageing.*” **Compos Struct**;74. pp. 406–418.
- BUNSELL, A. R., RENARD, J., 2005, **Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials**. Bristol, Inglaterra, IoP Publishing.
- CAMPBELL, F.C., 2010, **Structural Composite Materials**. ASM International, Novelty, Ohio.
- CANEVAROLO Jr., S. V., 2006, **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2 ed. São Paulo. Artliber Editora Ltda.
- CARLSSON, L. A., DU, E., 2018, “Water Uptake in Polymer Composites with Voids”. In: DAVIES P., RAJAPAKSE Y. (Eds), **Durability of Composites in a Marine Environment 2**. Solid Mechanics and Its Applications, vol 244. Springer, Cham.
- CARNEIRO, L. A. V., 2004, Reforço de Vigas e Pilares de Concreto com Materiais Compósitos de Resina e Fibras. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- CARNEIRO, L. A. V., TEIXEIRA, A. M. A. J., 2008, **Propriedades e Características dos Materiais Compósitos Poliméricos aplicados na Engenharia de Construção**. Rio de Janeiro, Brasil, Instituto Militar de Engenharia.
- CHANG, K. K., 2001, “Aramid Fibers”. In: **ASM Handbook: Composites**, vol. 21, ASM International, Ohio, EUA, pp. 41-45.
- CHAWLA, K. K., 2012, **Composite Materials**. 3 ed. New York, USA, Springer.
- CHILALI, A., ASSARAR, M., ZOUARI, W. et al., 2017. “*Effect of geometric dimensions and fibre orientation on 3D moisture diffusion in flax fibre reinforced thermoplastic and thermosetting composites.*” **Compos. A: Appl. Sci. Manuf.** 95, pp. 75 – 86.
- CHIN, R. W., 2007, “Oil and Gas Separators”. In: Arnold, K.E. (ed), **Petroleum engineering Handbook Volume III – Facilities and Construction Engineering**, 2 ed., chapter 2, Texas, USA, Society of Petroleum Engineers.
- CHOQUEUSE, D., DAVIES, P., MAZÉAS, F., BAIZEAU, R., 1997. Aging of Composites in Water. ASTM STP 1302, ASTM International, USA, pp. 73–96.
- CHUNG, D. D. L., 2010, **Composite Materials – Science and Applications**. 2 ed. New York, USA, Springer.

- DANIEL, I. M., ISHAI, O., 2006, **Engineering Mechanics of Composite Materials**. 2 ed, New York, USA, Oxford University Press.
- DANIEL, I.M., GDOUTOS, E.E., 2009, "Failure Modes of Composite Sandwich Beams". In: DANIEL, I.M., GDOUTOS, E.E., RAJAPAKSE, Y.D.S. (Eds.) **Major Accomplishments in Composite Materials and Sandwich Structures**. Springer, New York, pp. 197-227.
- DAVIES, P., 2016, "Behaviour of composite materials under deep submergence". In: JONES, J. G., SUMMERSCALES, J. (eds). **Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites**. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 63. Elsevier, Universidade de Cambridge, Inglaterra, pp. 125-145.
- DHAKAL, H. N., MACMULLEN, J., Zhang, Z. Y., 2016, "Moisture measurement and effects on properties of marine composites". In: JONES, J. G., SUMMERSCALES, J. (Eds), **Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites**. Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering: Number 63. Elsevier, Universidade de Cambridge, Inglaterra, pp. 103-125.
- DIAB GROUP, 2018, "Divinycell HCP Technical Data". Disponível em <http://www.diabgroup.com/en-GB/Products-and-services/Core-Material/Divinycell-HCP>. Acesso em 27 de Março de 2018.
- DRUMOND, G. P., 2013, **Estudo de Material Alternativo para Fabricação de Mangueiras Hidráulicas de Umbilical Submarino**. Monografia, Curso de Engenharia do Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- FENG, C., CHU, Z., 2018. Fiber Reinforcement. In: Yi, X., Du, S., Zhang, L. (Ed.). **Composite Materials Engineering**, Volume 1. *Fundamentals of Composite Materials*. China. Chemical Industry Press. Springer
- FENNER, R. T., 1996, **Finite Element Methods for Engineers**. 1 ed., Londres, Inglaterra, Imperial College Press.
- GIBSON, R. F., 2016, **Principles of Composite Materials Mechanics**. 4 ed., Florida, USA, CRC Press.
- GUPTA, V. B., VARMA, I. K., 2000, "Thermosetting Resin – Properties". In: KELLY, A., ZWEBEN, C. (eds.), **Comprehensive Composite Materials Vol. 2: Polymer Matrix Composites**. Elsevier Science. pp 1-56.
- HASHIN, Z., 1980, "Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites," **Journal of Applied Mechanics**, vol. 47, pp. 329–334. Israel.

HASHIN, Z., A. ROTEM, 1973, "A Fatigue Failure Criterion for Fiber-Reinforced Materials," **Journal of Composite Materials**, vol. 7, pp. 448–464. Israel.

HOPPEL, C. P. R, BOGETTI, T. A., GILLESPIE JR, J. W., 1995, **Effects of Hydrostatic Pressure on the Mechanical Behavior of Composite Materials**. U.S. Army Research Laboratory and University of Delaware. Delaware, USA.

HULL, D., CLYNE, T. W., 1996, **An Introduction to Composite Materials**. 2 ed, Cambridge, USA. Cambridge University Press.

HUMEAU, C., DAVIES, P., JACQUEMIN, F., 2016, "Moisture diffusion under hydrostatic pressure in composites". **Materials and Design 96**. Elsevier. pp. 90-98.

HUTTON, D. V., 2004, **Fundamentals of Finite Element Analysis**. 1 ed., Nova Iorque, USA, McGraw-Hill Companies.

JONES, R. M., 1999, **Mechanics of Composite Materials**, 2 ed., Filadélfia, EUA. Taylor & Francis.

KASAVAJHALA, A. R. M., GU, L., 2011, "Fracture analysis of Kevlar-49/epoxy and e-glass/epoxy doublers for reinforcement of cracked aluminum plates". **Mechanical & Materials Engineering Faculty Publications**, Universidade de Nebraska.

KAW, A. K., 2006, **Mechanics of Composite Materials**. 2 ed., Florida, EUA, CRC Press LLC.

KOOTSOOKOS, A., MOURITZ, A. P., 2004, "*Seawater durability of glass- and carbon-polymer composites.*" **Composites Science and Technology**, 64(10 – 11), pp. 1503 – 1511.

LIU, Q., XUE, Z., LIU, Z., et al., 2018, "Industrial Polymer Matrix Composites and Fiber-Glass-Reinforced Plastics". In: YI, Z., DU, S., ZHANG, L. (Eds.), **Composite Materials Engineering, Vol 2 – Different Types of Composite Materials**. Chemical Industry Press – Springer, Beijing, China.

MALLICK, P. K., 2007, **Fiber-Reinforced Composites – Materials, Manufacturing and Design**. 3 ed., Flórida, EUA, CRC Press.

MANES, A., BRESCINI, L.M., GIGLIO, M., 2014, "*Ballistic Performance of multi-layered fabric composite plates impacted by different 7.62 mm caliber projectiles.*" **International Symposium on Dynamic Response and Failure of Composite Materials**. Elsevier, pp. 208-215.

MANNING, F. S., THOMPSON, R.E., 1995, **Oilfield Processing Volume Two: Crude Oil**. 1 ed. Oklahoma, PennWell Publishing Company.

NEUMANN, S., MAROM, G., 1987, “*Prediction of moisture diffusion parameters in composite materials under stress.*” **J. Compos. Mater.**; 21. pp. 68-80.

NORMA ASTM D3039, 2014, “*Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*”, West Conshohocken, PA, EUA, ASTM International.

NORMA ASTM D3171, 2015, “*Standard Test Methods for Constituent Content of Composite Materials*”, West Conshohocken, PA, EUA, ASTM International.

NORMA ASTM D3518, 2013, “*Standard Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composite Materials by Tensile Test of a $\pm 45^\circ$ Laminate*”, West Conshohocken, PA, EUA, ASTM International.

PADILHA, A. F., 2000, **Materiais de Engenharia – Microestrutura e Propriedades**. 1 ed., Curitiba, Brasil, Hemus AS.

PAL, R., MURTHY, H. N. M., SREEJITH, M., et al., 2012, “*Effect of laminate thickness on moisture diffusion of polymer matrix composites in artificial seawater ageing.*” **Frontiers of Material Science** **6(3)**. pp 225-235. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

PARKS, O., HARPER, P., 2019, “Durability testing and evaluation of marine composites”. In: PEMBERTON, R., SUMMERSCALES, J., GRAHAM-JONES, J. (Eds.), **Marine Composites: Design and Performance**. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 85-114.

PASQUALINO, I. P., 2014, **Instalações de Superfície para Produção de Petróleo**. Notas de Aula. Graduação em Engenharia de Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

PILLI, S. P., SIMMONS, K. L., HOLBERY, J. D., et al., 2009, “*A novel accelerated moisture absorption test and characterization.*” **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 40(9), pp. 1501 – 1505.

PORTO, A. C. C. H., 2009, **Análise Experimental de Colapso de Dutos Metal-Compósito sob Pressão Externa**. Monografia, Curso de Engenharia de Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

RAJU, I. S., O'BRIEN, T. K., 2008, “Fracture mechanics concepts, stress fields, strain energy release rates, delamination initiation and growth criteria.” In: SRIDHARA, S. (Ed.), **Delamination Behaviour of Composites**. Woodhead Publishing. pp. 3 – 27.

RIBEIRO, R. D., 2015, **Avaliação de Casco em Material Compósito para Separador Submarino**. Monografia, Curso de Engenharia do Petróleo, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

RHEE, K. Y., LEE, S. M., PARK, S. J., 2004, "Effect of hydrostatic pressure on the mechanical behavior of sea-water-absorbed carbon/epoxy composite." **Materials Science and Engineering A 384**. pp. 308-313. Coreia.

RICCIO, A., 2008, "Delamination in the Context of Composite Structural Design". In: SRIDHARA, S. (Ed.), **Delamination Behaviour of Composites**. Woodhead Publishing. pp. 28 – 64.

ROYLANCE, M. E., 1983, **The effect of moisture on the properties of an aramid/epoxy composite**. Composites Development Division - U.S. Army Materials and Mechanics Research Center. Watertown, Massachusetts. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a131132.pdf>

SANDCORE, **Best Practice Guide for Sandwich Structures in Marine Applications**. NewRail, University of Newcastle. Disponível em: https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/20130201_105501_16344_RevisedBPGv1-00---Report-Format.pdf. Acesso em 10 de Novembro de 2019.

SEGERLIND, L. J., 1984, **Applied Finite Element Analysis**. 2 ed., EUA, John Wiley & Sons. ISBN-10: 0471806625.

SHEN, Z. TONG, X., YANG, N., et al., 2018, "Composite Structures Design and Analysis." In: YI, X.-SU., DU, S., ZHANG, L. (Eds.), **Composite Materials Engineering Vol 1**. Springer, Beijing, China.

SILVA, A. L. F., FILHO, L. E. S., RAMALHO, J. B. V. S., *et al.* 2007, **Processamento Primário de Petróleo**. 1 ed. Rio de Janeiro, Petrobras.

SILVA, R. A. F., 2008, **Estudo Numérico e Experimental Visando o Desenvolvimento de Dutos Compósitos Submarinos pela Técnica de Enrolamento Filamentar**. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

SIMULIA, 2007, **Projectile Impact on a Carbon Fiber Reinforced Plate**. Abaqus Technology Brief. Dassault Systèmes.

SIRIRUK, A., PENUMADU, D., 2014, "*Effect of Sea Water on Polymeric Marine Composites*". In: DAVIES P., RAJAPAKSE Y. D. S. (Eds), **Durability of Composites in a Marine Environment**. Solid Mechanics and Its Applications, vol 208. Springer.

SUMMERSCALES, J., 2019, "Materials selection for marine composites". In: PEMBERTON, R., SUMMERSCALES, J., GRAHAM-JONES, J. (Eds.), **Marine Composites: Design and Performance**. Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 4-30.

SUN, C. T., QUINN, B. G., TAO, J., et al., 1996, Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates. Relatório Técnico AR-95/109, U.S. Department of Transportation, Springfield, Virginia, USA.

TEIXEIRA, A. M. A. J., 2007, **Ponte Desmontável Em Material Compósito de Fibra de Vidro**. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

THOMAS, J. E., 2004, **Fundamentos da Engenharia do Petróleo**. 2 ed. Rio de Janeiro, Interciência.

THRO, M., 2007, "Oil and Gas Processing". In: LAKE, L. W. (Ed.), **Petroleum Engineering Handbook**, Vol III – Facilities and Construction Engineering. Society of Petroleum Engineers, Texas, pp. 1-11

TUCKER, W. C., LEE, S. B., ROCKETT, T., 1993. "The effects of pressure on water transport in polymers". **J. Compos. Mater.** **27 (8)**, pp. 756–763.

TUCKER, W. C., BROWN, R., 1989. "Moisture absorption of graphite/polymer composites under 2000 feet of seawater". *J. Compos. Mater.* **23**, pp. 787–797.

WEITSMAN, Y., J., 2000, "Effects of Fluids on Polymeric Composites - A Review". In: KELLY, A., ZWEBEN, C. (Eds.), **Comprehensive Composite Materials**. Vol II, Elsevier, pp. 369-401.

YOUNES, R., HALLAL, A., FARDOUN, F., *et al.*, 2012. "Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials". In: HU, N. (Ed). **Composite and Their Properties**. IntechOpen, DOI: 10.5772/50362. Disponível em: <https://www.intechopen.com/books/composites-and-their-properties/comparative-review-study-on-elastic-properties-modeling-for-unidirectional-composite-materials>. Acesso em 28 de janeiro de 2018.