

KAREN FARIA DA CRUZ

Vasos de pressão de material compósito: análise estrutural a partir de diferentes orientações de suas fibras.

KAREN FARIA DA CRUZ

Vasos de pressão de material compósito: análise estrutural a partir de diferentes orientações de suas fibras.

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Guaratinguetá - SP
2018

C957v	Cruz, Karen Faria da Vasos de pressão de material compósito: análise estrutural a partir de diferentes orientações de suas fibras/ Karen Faria da Cruz – Guaratinguetá, 2018. 59 f : il. Bibliografia: f. 58-59 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins 1. Vasos de pressão. 2. Resinas compostas. 3. Análise estrutural (Engenharia). I. Título. CDU 621.643.2
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/33595

KAREN FARIA DA CRUZ

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcelo Martins Sampaio
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. José Elias Tomazini
UNESP-FEG

Prof. Me. Antônio dos Reis da Faria Neto
UNESP-FEG

Dezembro de 2018.

DADOS CURRICULARES

KAREN FARIA DA CRUZ

NASCIMENTO 14.07.1992 – São José dos Campos / SP

FILIAÇÃO Márcio Moraes da Cruz
Délia Idalina de Faria Cruz

dedico este trabalho de modo especial, à minha
família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha saúde, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins* que me incentivou a vencer desafios. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

aos meus pais *Délia e Márcio*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos e estiveram ao meu lado,

aos meus irmãos Kelly e Kennedy por estarem sempre orando por mim e me ajudando mesmo à distância

aos meus queridos amigos Marcos, Ricardo, Grazi, Jozi e Denis que durante todos os anos de estudo estiveram do meu lado me apoiando e muitas vezes cuidando de mim.

a todos os amigos da faculdade e do serviço que estiveram junto comigo em todos os momentos.

a todos os professores que contribuíram para a minha formação por todo conhecimento adquirido. Sem vocês eu não teria chegado até ao fim,

ao Engenheiro Mecânico Rafael Serpa Leite Balieiro por toda ajuda e prontidão em me auxiliar neste trabalho.

aos funcionários da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele tudo fará”.

Salmos 37:5

RESUMO

Os vasos de pressão têm grande importância em vários ramos da indústria por possibilitar o armazenamento de fluido à alta pressão. Nas indústrias aeroespacial e aeronáutica, de hoje, os compósitos reforçados com fibras encontram uma ampla gama de aplicações nos tanques de combustível e nos cilindros de ar, graças a sua alta resistência específica e baixo peso. Neste contexto, softwares de análise estrutural por elementos finitos são ferramentas fundamentais para projetos de engenharia. Com isso, o objetivo deste trabalho é apresentar um estudo sobre vasos de pressão de materiais compósitos, junto de uma análise teórica e numérica utilizando o software ANSYS. Para isso, foram realizadas simulações em um cilindro de compósito modelado no módulo ACP do software ANSYS. Neste estudo, variaram-se as orientações das fibras e a sequência de empilhamento de camadas para avaliar o comportamento das tensões e, determinar uma condição ótima de orientação de fibra e de empilhamento de camadas. Os resultados obtidos confirmaram a eficiência do software em simular condições reais de carregamento e a análise de tensões indicou que a orientação de fibras em $\pm 15^\circ$ com uma sequência de empilhamento simétrica resultam na menor tensão normal nominal.

Palavras-chave: vaso de pressão; compósito; ANSYS; análise estrutural; MEF; fibras de carbono.

ABSTRACT

Pressure vessels are of great importance in a number of branches of the industry by enabling the storage of fluid at high pressure. In today's aerospace and aeronautics industries, fiber-reinforced composites find a wide range of applications in fuel tanks and air cylinders thanks to their high specific strength and low weight. In this context, finite element structural analysis software is an essential tool for engineering projects. With this, the objective of this work is to present a study on composite pressure vessels and a theoretical and numerical analysis using ANSYS software. For this, simulations were performed on a composite cylinder modeled on the ANSYS's ACP module. In this study, the fiber orientations and the layer stacking sequence were varied to evaluate the stress behavior and to determine an optimum fiber orientation and layer stacking condition. The obtained results confirmed the efficiency of the software in simulating real loading conditions, and stress analysis indicated that fiber orientation in $\pm 15^\circ$ with a symmetrical stacking sequence resulted in the lowest rated normal stress.

Keywords: pressure vessel; composite; ANSYS; structural analysis; CFRP; carbon fibers.

SUMÁRIO

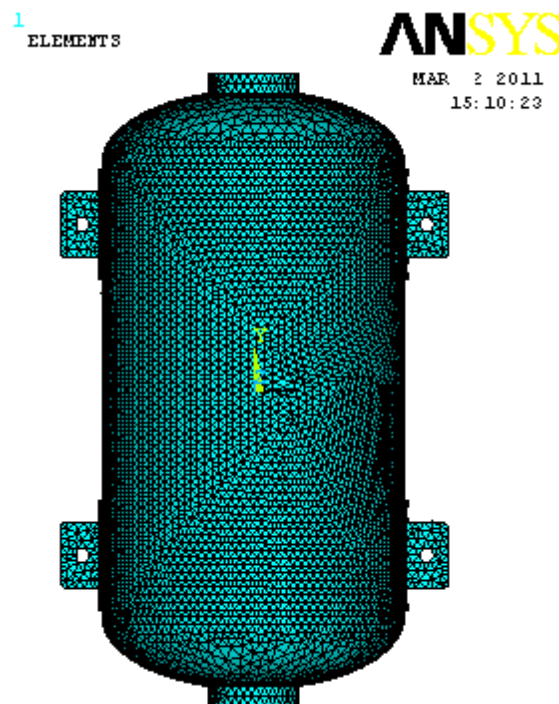
1	INTRODUÇÃO	10
1.1	MOTIVAÇÃO.....	10
1.2	OBJETIVOS.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	12
2.1.1	Fases dos Materiais Compósitos.....	13
2.2	TEORIA DA MECÂNICA DE COMPÓSITOS.....	20
2.2.1	Micromecânica.....	20
2.2.2	Macromecânica.....	26
2.3	APLICAÇÃO DE VASOS DE COMPÓSITOS	34
2.4	MÉTODO ELEMENTOS FINITOS PARA COMPÓSITOS	37
2.5	ANSYS	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS.....	40
3.2	METODOLOGIA.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1	ANÁLISE DE TENSÕES NORMAIS OBTIDAS NO ANSYS.....	52
4.2	CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5	CONCLUSÃO.....	58
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica que reúne estudos e análises de projetos de vasos de pressão de materiais compósitos com diferentes orientações de fibras e sequências de empilhamento.

No desenvolvimento deste trabalho, um vaso de pressão compósito de multicamadas como o modelo apresentado na Figura 1 foi projetado e analisado para máximas tensões com diferentes ângulos de orientação das fibras e diferentes sequências de empilhamento. Os modelos projetados foram analisados pelo software de análise estrutural por elementos finitos ANSYS em diferentes condições de esforços a fim de determinar o ângulo ótimo de orientação de fibras e a melhor sequência de empilhamento para vasos de pressão compósitos.

Figura 1 – Modelo de vaso de pressão compósito multicamadas.



Fonte: Yarrapragada; Mohan; Kiran (2012)

1.1 MOTIVAÇÃO

Os vasos de pressão têm grande importância em vários ramos da indústria por possibilitar o armazenamento de fluido à alta pressão. Uma ênfase especial é colocada sobre a resistência

mecânica do recipiente para evitar explosões como resultado de ruptura. A maioria desses recipientes trabalha com baixas pressões e, portanto, são construídos de tubos e folhas laminadas para formar cilindros. No entanto, alguns recipientes têm de suportar elevadas pressões e a espessura das paredes dos vasos deve aumentar a fim de proporcionar resistência adequada.

Nas indústrias aeroespacial e aeronáutica de hoje, a eficiência estrutural é a principal preocupação. Neste contexto, os compósitos reforçados com fibras encontram uma ampla gama de aplicações nas estruturas portadoras de carga de compressão leve das aeronaves, nos tanques de combustível e nos cilindros de ar graças a sua alta resistência específica e baixo peso. (YARRAPRAGADA, MOHAN, KIRAN, 2012)

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo sobre vasos de pressão de materiais compósitos, junto de uma análise teórica e numérica utilizando o software ANSYS. O trabalho contemplará também alguns objetivos específicos como o estudo de tensões variando-se os ângulos de orientação de fibras de 5° a 90° e considerando ambas as sequências de empilhamento, simétricas e assimétricas, para se determinar ângulo ótimo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

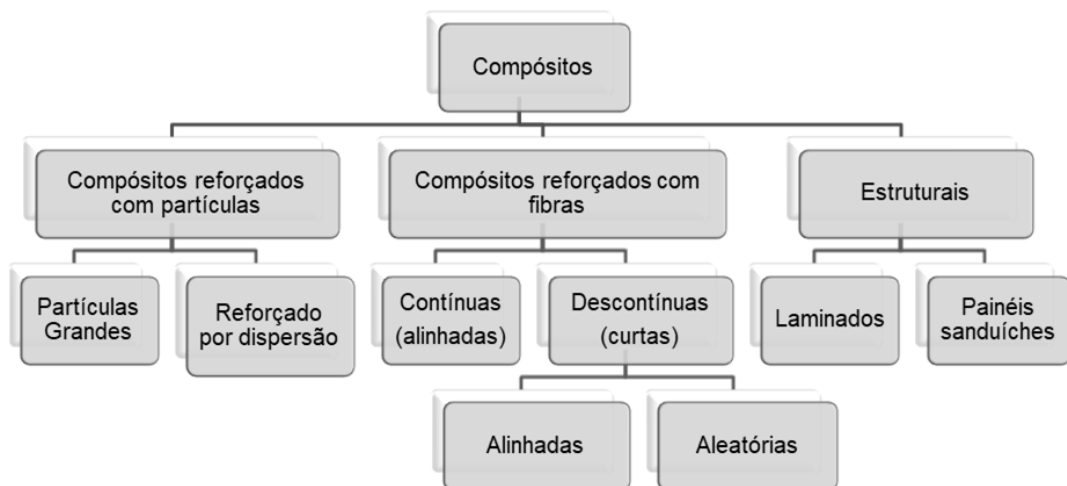
Na perspectiva da Ciência dos Materiais, em seu conceito mais geral, o termo material compósito aplica-se a materiais que resultem de uma composição de duas ou mais fases de modo que cada uma delas mantém suas propriedades físicas e químicas, mas o material resultante apresenta propriedades superiores as de seus constituintes (CALLISTER, 2008).

Esta classe de material abrange um grande leque de diversidade e compreende polímeros reforçados com fibras, os materiais híbridos metal/compósito, os concretos estruturais e outros compósitos que incorporam matriz metálica ou matriz cerâmica.

Na natureza, tem-se como exemplo de compósito natural a madeira que é um composto fibroso formado pelas fases: celulose fibrosa e a matriz de lignina (CALLISTER, 2008).

Os compósitos podem ser divididos em naturais e sintéticos. Entre os sintéticos, considerando as várias opções de matriz, pode-se listar uma série de classificações de acordo com os tipos e arranjos de reforços, conforme mostra a Figura 2 (NETO, PARDINI, 2006).

Figura 2 – Classificação hierárquica de compósitos sintéticos



Fonte: Adaptado de Callister (2008).

A classe de compósitos reforçados com partículas é subdividido em: partículas grandes e reforçado por dispersão. No primeiro caso, o termo “grande” é usado para deixar explícito que a interação partícula-matriz não pode ser tratada no nível atômico ou molecular. As partículas podem apresentar uma variedade de geometrias, mas suas dimensões têm que manter um padrão

em todas as direções. Para que seja efetivo o reforço, as partículas devem ser pequenas e estar distribuídas homogeneamente por toda a matriz. No caso dos reforçados por dispersão, as partículas são, em geral, muito menores com diâmetros entre 10 e 100 nm e as interações partículas-matriz que levam ao aumento de resistência ocorrem no nível atômico ou molecular. A fase dispersa pode ser metálica ou não-metálica; óxidos são usados com frequência.

Os compósitos obtidos com fibras contínuas podem apresentar reforço unidirecional ou bidirecional e o material é moldado de forma que em cada camada do compósito, a fase de reforço é contínua e dotada de uma orientação preferencial. As fibras podem ser contínuas, longas, ou curtas (NETO, PARDINI, 2006).

Os compósitos com camadas isoladas podem ser subdivididos em compósitos com fibras contínuas ou fibras curtas. Já os compósitos de multicamadas podem ser subdivididos em:

- Compósitos laminados: composto por lâminas ou painéis bidimensionais que possuem uma direção preferencial de alta resistência tal como nos reforçados com fibras contínuas. As camadas são empilhadas e subsequentemente unidas umas às outras de modo que a orientação da direção de alta resistência varia a cada camada;
- Compósitos sanduíches: dois ou mais tipos de fibras de reforço são utilizados, ou a intercalação de lâminas metálicas com lâminas de compósitos (CALLISTER, 2008).

2.1.1 Fases dos Materiais Compósitos

Em geral, os materiais compósitos apresentam dois tipos de fases distintas: matriz e reforço. As propriedades do material final são diretamente ligadas às propriedades de suas fases de modo que a escolha e combinação delas devem ser feita mediante uma análise cuidadosa das propriedades de cada fase garantindo que o objetivo do projeto será atingido.

2.1.1.1 Fibras

Os reforços para compósitos podem se apresentar na forma de fibras contínuas, picadas e na forma de partículas e são responsáveis por oferecer resistência ao carregamento mecânico.

As fibras são usadas como reforços contínuos em compósitos unidirecionais pelo alinhamento de uma grande quantidade de filamentos em uma placa fina ou casca denominada como lâmina, camada ou espessura. Uma lâmina unidirecional possui máxima rigidez e

resistência ao longo da direção das fibras e propriedades mínimas na direção perpendicular a elas.

É importante ressaltar que para existir uma compatibilidade entre a matriz e a fibra é preciso uma interfase que fornece uma proteção para danos durante o processamento da fibra no equipamento e também atua como lubrificante e agente anti-estático e principalmente mantém as fibras como uma unidade e garante a adesão com a matriz.

Os tipos de fibras mais comuns em aplicações de compósitos são de vidro, carbono e orgânico (Kevlar), enquanto que para aplicações especiais são utilizados Boron, SIC e Alumina. A seleção das fibras depende principalmente das propriedades mecânicas e ambientais desejadas e o custo delas (BARBERO, 1999).

Um detalhe importante a se observar nas fibras é que o fato de ter um diâmetro pequeno a torna muito mais resistente que um material volumétrico já que a probabilidade da presença de defeitos superficiais capazes de provocar uma fratura diminui com a redução do volume da amostra.

Segundo Callister (2008), com base no seu diâmetro e na sua natureza, as fibras são agrupadas em três classificações:

- Whisker: monocristais muito finos com razões comprimento-diâmetro muito grandes. Por causa de suas pequenas dimensões possuem um alto grau de perfeição cristalina, ou seja, são virtualmente livres de defeitos o que os tornam um dos materiais com a mais elevada resistência conhecida. Seu uso não é muito comum devido ao alto custo e da dificuldade de ser incorporado a matrizes. Exemplos de materiais dos whiskers: grafite, carbetto de silício, nitreto de silício e óxido de alumínio.
- Fibras: podem ser tanto policristalinas quanto amorfas e têm pequenos diâmetros. Em geral os materiais fibrosos são poliméricos ou cerâmicos. Exemplos: aramidas poliméricas, vidro, carbono, boro, óxido de alumínio e carbetto de silício.
- Arames: os arames finos possuem diâmetros relativamente grandes se comparados aos outros dois grupos de materiais fibrosos. Os materiais típicos de arames são: aço, molibdênio e tungstênio. Esse tipo de fibra é muito utilizado reforçando radialmente pneus de automóveis, carcaças de motores a jato enroladas com filamentos e mangueiras de alta pressão.

A Tabela 1 apresenta as características e propriedades de diversos materiais agrupados em cada uma das classificações de materiais fibrosos (CALLISTER, 2008).

Tabela 1 – Características de Diversos Materiais Fibrosos usados como reforço.

Material	Densidade Relativa	Limite de Resistência à Tração [Gpa (106psi)]	Resistência Específica (Gpa)	Módulo de Elasticidade [Gpa (106psi)]	Módulo Específico (Gpa)
Whiskers					
Grafite	2,2	20	9,1	700	318
Nitreto de Silício	3,2	5,0 – 7,0	1,56 – 2,2	350 - 380	109 – 118
Óxido de Alumínio	4	10,0 – 20,0	2,5 – 5,0	700 - 1500	175 – 375
Carbeto de Silício	3,2	20	6,25	480	159
Fibras					
Óxido de Alumínio	4	1,38	0,35	379	96
Aramida (Klevar 49 TM)	1,4	3,6 – 4,1	2,5 – 2,85	131	91
Carbono	1,78 – 2,15	1,5 – 4,8	0,7 – 2,7	228 - 724	106 – 407
Vidro – E	2,6	3,45	1,34	72,5	28,1
Boro	2,6	3,6	1,4	400	156
Carbeto de Silício	3	3,9	1,3	400	133
Arames Metálicos					
Aço de alta resistência	7,9	2,39	0,3	210	26,6
Molibdênio	10,2	2,2	0,22	324	31,8
Tungstênio	19,3	2,89	0,15	407	21,1

Fonte: Adaptado de Callister (2008).

2.1.1.1.1 Fibras de carbono

O carbono é um material fibroso de alto desempenho que é o reforço mais utilizado em compósitos avançados de matriz polimérica devido as seguintes razões (CALLISTER, 2008):

- Possuem o maior módulo específico e mais resistência específica dentre todas as fibras de reforço.

- Retêm os elevados módulos de tração e resistências sob temperaturas elevadas; a oxidação em altas temperaturas, no entanto, pode ser um problema.
- À temperatura ambiente, não são afetadas pela umidade ou por uma grande variedade de solventes, ácidos e bases.
- Exibem uma diversidade de características físicas e mecânicas permitindo que os compósitos que incorporam essas fibras tenham propriedades projetadas para atender as necessidades do projeto
- Foram desenvolvidos processos de fabricação para as fibras e para os compósitos que são relativamente baratos e de boa relação custo-benefício.

As fibras de carbono são fabricadas por pirólise de fibras orgânicas. Uma grande variedade de fibras precursoras pode ser utilizada para produzir fibras de carbono garantindo diferentes morfologias e características. Os precursores mais comuns são: poliacrilonitrila (PAN), fibras de celulose (viscose *rayon*, algodão) e piche.

O processo de pirólise consiste basicamente no tratamento térmico do precursor que remove oxigênio, nitrogênio e hidrogênio dando origem às fibras de carbono. Os principais objetivos buscados na produção de fibras de carbono são: reduzir o número de defeitos na fibra, aumento da cristalinidade e consequente melhoria nas propriedades mecânicas. O modo mais eficiente para atingir esses objetivos é o controle do precursor no processo de pirólise garantindo que o mesmo seja altamente orientado e mantenha essa orientação durante as etapas de estabilização e de carbonização sob estiramento (NETO e PARDINI, 2006).

2.1.1.2 Matrizes

As matrizes podem ser poliméricas, metálicas e cerâmicas. As poliméricas são as mais utilizadas por facilitarem a fabricação de peças complexas com baixo custo de ferramental e investimento. Apesar do baixo custo, materiais poliméricos não reforçados sofrem com o problema de fluência do material, ao passo que os reforçados com fibras eliminam esse problema e ainda criam outra dimensão para o projeto estrutural de materiais através das ilimitadas variações das propriedades mecânicas sob o controle do projetista.

A seleção de materiais para as matrizes deve levar em conta as propriedades mecânicas, resistência à corrosão, flamabilidade, o desempenho a altas temperaturas e também os métodos de processamento, ou seja, essas escolhas devem ser analisadas no início do projeto conforme o processo de manufatura a ser utilizado (TANIGUCHI, 2008).

As matrizes poliméricas podem ser divididas em termorrígidas e termoplásticas. Uma matriz de resina termorrígida é obtida por meio de uma transformação química irreversível de polímero em uma matriz polimérica amorfa. As resinas termorrígidas possuem baixa viscosidade favorecendo a impregnação da fibra de reforço e velocidades altas de processamento, além de serem as mais comuns devido à facilidade de processamento e seu baixo custo. As resinas mais comuns dessa família são os poliésteres, epóxis e fenólicas.

As resinas de poliéster são uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeia longas e lineares. As resinas de poliéster insaturado têm resistência à tração na faixa de 40 a 90 MPa, módulo de elasticidade em tração na faixa de 2 a 4,5 GPa, e deformação de ruptura de 3-5%. A resistência à compressão situa-se na faixa de 90 a 250 MPa (NETO e PERDINI, 2006).

As resinas epóxi são termorrígidas de alto desempenho que contêm pelo menos dois grupos epóxi terminais, conhecidos também como grupos oxiranos ou etoxilina, por molécula. Estas resinas são matérias primas em vários setores industriais, como a indústria eletroeletrônica, de embalagem, construção civil e transporte. As mais utilizadas têm como base o deglicidil éter do bisfenol A (DGEBA), cuja estrutura básica é sintetizada a partir de uma reação entre a epicloidrina e o bisfenol-A.

Esse tipo de resina também pode ser obtido com características multifuncionais, como por exemplo, as resinas glicidil éter de novolaca, glicidil de aminas trifuncionais ou tetrafuncionais. Estas resinas apresentam alta viscosidade à temperatura ambiente e permitem obter materiais com maior grau de reticulação em relação às do tipo DGEBA, fazendo com que tenham melhor desempenho a altas temperaturas. A alta viscosidade a temperatura ambiente permite que pré-impregnados destes polímeros tenham boa adesão e conformabilidade às superfícies complexas na moldagem. Desse modo, estas resinas são utilizadas para manufatura de pré-impregnados para indústria aeronáutica e espacial.

Uma enorme variedade de agentes de cura é empregada no processamento de resinas epóxi e estes são adequados aos ciclos de processamento. A estequiometria da mistura epóxi/endurecedor é fundamental na definição das propriedades a serem obtidas do sistema curado, pois afeta a transição vítrea, o módulo elástico e a resistência mecânica. A resistência à tração de sistemas epóxi curados variam de 40 a 90 MPa, enquanto o módulo elástico varia de 2,5 a 6,0 GPa, com a deformação de ruptura variando na faixa de 1 a 6%. A resistência à compressão é de 100 a 220 MPa (NETO e PARDINI, 2006).

As resinas fenólicas possuem baixa flamabilidade e baixa emissão de fumaça se comparada com outras resinas de baixo custo, além de apresentarem boa estabilidade

dimensional sob flutuações de temperatura e boa propriedade adesiva. Também bastante aplicado em aeronaves, veículos de transporte coletivo, como material de construção de interiores onde a flamabilidade deve ser baixa, e em componentes de enrolamento filamentar (BARBERO, 1999).

2.1.1.3 Processo de fabricação

Diversas técnicas são empregadas na produção de artefatos compósitos reforçados com fibras e matriz polimérica. A ideia básica do processamento de compósitos estruturais é impregnar o reforço em uma determinada matriz de forma que ao final do processo o componente sólido, com geometria definida, esteja praticamente em condições de ser utilizado, ou seja, com necessidade de pouca ou nenhuma usinagem.

O processamento de compósitos é denominado de moldagem e é determinado segundo a matéria-prima do reforço e da matriz e segundo a geometria do componente a ser obtido. Os métodos de processo podem ser manuais ou automatizados e os moldes podem ser abertos ou fechados.

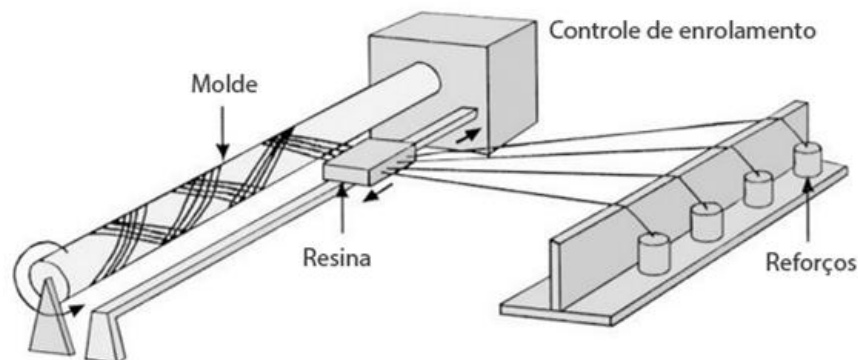
Dentre as principais, pode-se citar a laminação manual, moldagem por transferência de resina, por aspersão, a vácuo, pultrusão, e enrolamento filamentar. Dessas, o processo de enrolamento filamentar destaca-se na produção de tubos compósitos com filamentos contínuos e matriz polimérica.

2.1.1.4 Enrolamento Filamentar

A técnica de enrolamento filamentar consiste em um processo no qual as fibras são posicionadas precisamente de acordo com um padrão predeterminado compondo uma forma oca, geralmente cilíndrica. As fibras, na forma de fios individuais ou de mechas, são primeiramente imersas em um banho de resina (móvel) e em seguida enroladas continuamente ao redor de um mandril, em geral utilizando equipamentos de enrolamento automáticos, conforme mostra a Figura 3. Após o processo de enrolamento filamentar, a matriz polimérica sofre o processo de cura, que pode ser a frio ou a quente. No caso de cura a quente, o mandril é colocado em uma estufa.

Dentre algumas aplicações de enrolamento filamentar, destacam-se eixos de direção automotiva, hélices de helicópteros, tanques de oxigênio, tubos, vasos de pressão, caixas cônicas de motor de foguete e uma larga variedade de tanques de armazenamento de gasolina.

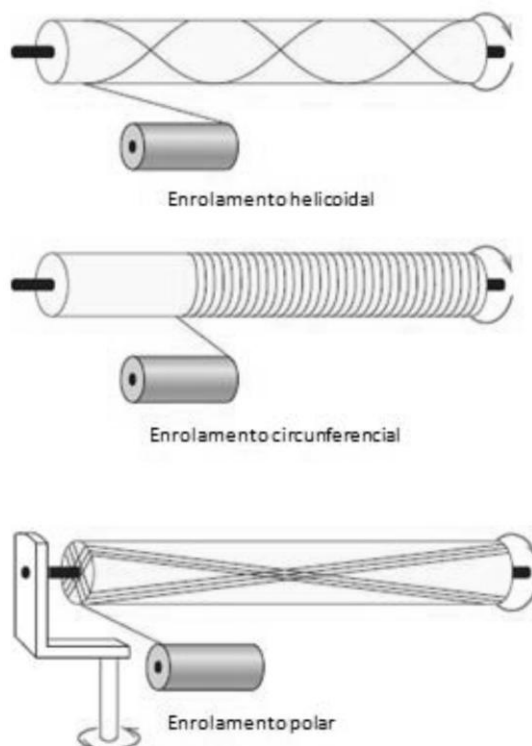
Figura 3 - Esquema do método de enrolamento filamentar.



Fonte: Adaptado de Gonçalves (2012).

Diversas formas de enrolamento são possíveis, destacando-se helicoidal e polar. Na forma helicoidal, as fibras são enroladas formando um determinado ângulo com o eixo do mandril. O método pode ser usado para enrolar desde as mais simples até as mais complicadas formas. Já a forma polar, os filamentos são enrolados em baixo ângulo com o eixo do mandril (próximo a 0°), podendo as fibras passarem próximas ou ao redor dos polos do mandril, tangenciando as extremidades da peça. A Figura 4 mostra os modos de enrolamento descritos.

Figura 4 - Representação das formas de enrolamento filamentar.



Fonte: Callister (2008)

Em relação à geometria, a técnica de enrolamento filamentar apresenta algumas variáveis, como as velocidades do mandril e do “carrinho”, no qual se encontra o banho de resina e a alimentação de fibras. O passo da hélice, ou seja, a distância percorrida pelo “carrinho” no intervalo de tempo em que o mandril realiza uma rotação, o número de passes requerido para a cobertura completa do mandril, a largura da faixa e o ângulo de enrolamento também influenciam no processo de enrolamento. Os ajustes dessas variáveis podem ser feitos na própria máquina e influenciam nas propriedades mecânicas finais do artefato compósito (SILVA, 2008).

2.2 TEORIA DA MECÂNICA DE COMPÓSITOS

Os materiais compósitos podem ser vistos e analisados em diferentes níveis e a diferentes escalas, dependendo das características particulares e comportamento em consideração.

A nível de Micromecânica – lâmina, estudam-se detalhes da interação dos materiais constituintes do compósito (fibra e matriz) em nível microscópico, ou seja, trata do estado de deformação e tensão nos constituintes e falhas locais tais como falha da fibra (tensão de flambagem, divisão), falha da matriz (tração, compressão, cisalhamento), e falha da interface/interfase (descolamento).

A nível de macromecânica, a lâmina é tratada como um material quase homogêneo e anisotrópico em que nas propriedades de rigidez e resistência são considerados por valores médios, assim como os critérios de falhas também podem ser expressos em termos de valores médios de tensões e resistência geral da lâmina sem que haja uma referência a um mecanismo de falha em particular. No laminado, é aplicado na forma da teoria da laminação que trata do comportamento geral como uma função das propriedades da lâmina e sequência de empilhamento de lâminas.

Por fim, a nível estrutural ou do componente em si, análise numéricas tipo MEF em conjunto com a teoria dos laminados podem prever o comportamento geral da estrutura assim como o estado de tensão de cada lâmina.

2.2.1 Micromecânica

Tomando como objeto de estudo uma lâmina, fina camada de compósito, com reforço unidirecional, define-se como direção 1 o eixo coordenado paralelo às fibras e como direção 2

o eixo coordenado perpendicular às fibras. Devido à rigidez da fibra, o módulo de elasticidade na direção 1, E_1 , é maior que na direção 2, E_2 .

Em uma lâmina de compósito, o volume (v) total do material (v_T) divide-se em:

- Volume de fibras (v_F)
- Volume de matriz (v_M)
- Volume de vazios (v_V): corresponde ao volume de bolhas de ar e de gases que emanam da resina durante a cura.

Matematicamente, os 3 termos se relacionam como Equação 1:

$$v_T = v_F + v_M + v_V \quad (1)$$

Pode-se definir as frações volumétricas (V) como segue:

- Fração volumétrica de fibras: $V_F = \frac{v_F}{v_T}$
- Fração volumétrica de matriz: $V_M = \frac{v_M}{v_T}$
- Fração volumétrica de vazios: $V_V = \frac{v_V}{v_T}$

Sendo que,

$$V_F + V_M + V_V = 1 = 100\% \quad (2)$$

Para um compósito estrutural ser considerado de qualidade, a fração volumétrica de vazios deve ser necessariamente baixa, idealmente menor que 1% (NETO e PARDINI, 2006).

Nas equações da micromecânica, as propriedades elásticas são estimadas em função das frações volumétricas dos constituintes. Porém, o que se mede diretamente nos laboratórios são pesos ou as massas dos constituintes, e então se calcula as frações em peso ou as massas dos mesmos. Uma vez sendo conhecidos os pesos ou as massas específicas dos constituintes, pode-se assumir, sem prejudicar a precisão dos cálculos, que a massa (m) Total de um compósito (m_T) é dada pela soma das massas de fibra (m_F) e matriz (m_M), Equação 3:

$$m_T = m_F + m_M \quad (3)$$

Nota-se que a Equação 3 não inclui a massa de vazios, pois o seu valor seria praticamente um infinitésimo de segunda ordem em relação aos demais termos. Tanto o volume quanto a densidade dos vazios são valores baixos em comparação com os valores relativos às fibras e à matriz e são considerados desprezíveis.

As frações em massa das Fibras e da Matriz são obtidas pelas Equações 4 e 5:

$$M_F = \frac{m_F}{m_T} \quad (4)$$

e,

$$M_M = \frac{m_M}{m_T} \quad (5)$$

Na manufatura de compósitos por impregnação manual, massa das fibras a serem usadas m_F deve sempre ser determinada antes de se dar início ao processo de manufatura do componente desejado, e o seu valor registrado (NETO e PARDINI, 2006).

Na análise micromecânica de um compósito, algumas simplificações têm de ser feitas para se reduzir a complexidade das equações.

A matriz é considerada:

- Homogênea;
- De comportamento mecânico linear e elástico;
- Isotrópica;
- As fibras, além de homogêneas, lineares elásticas e isotrópicas, são consideradas;
- Perfeitamente alinhadas (paralelas umas as outras)
- Igualmente espaçadas;

Uma das principais consequências destas simplificações é poder usar a Lei de Hooke na relação tensões-deformação das fibras e da matriz.

Apesar das lâminas do compósito serem heterogêneas ao nível de constituintes, do ponto de vista macroscópico elas são assumidas como sendo homogêneas, para fins de obter-se as relações entre tensões e deformações. As lâminas também são consideradas (NETO e PARDINI, 2006):

- Lineares e elásticas;
- Ortotrópicas (apresentam propriedades distintas ao longo de 2 direções perpendiculares entre si);
- Inicialmente livres de tensões residuais;

É fato conhecido que os compósitos se deformam quando são submetidos a variações de temperatura, e ao absorverem ou liberarem umidade. Desta forma, após um processo de cura quente, sempre aparecerão tensões higrotérmicas (ou seja, tensões induzidas por variações de umidade e temperatura) em um laminado, durante o resfriamento, bem como quando o mesmo for retirado de um forno e trazido para o ambiente comum externo durante o uso. Entretanto, nas equações da micromecânica apresentadas nesta seção, tais efeitos não serão considerados.

Além das deformações higrométricas, um efeito adicional que é importante na tecnologia de compósitos é a contração da matriz durante a polimerização. Tais contrações promovem um ancoramento das fibras dentro da matriz, o qual contribui para a ocorrência de tensões mecânicas de compressão na interface fibra/matriz. Um bom ancoramento mecânico das fibras

no interior da matriz é essencial para que o compósito funcione adequadamente (NETO e PARDINI, 2006).

Para efeito de cálculo, a ancoragem mecânica provocada pela contração da resina durante a cura e as eventuais ligações químicas existentes na interface entre fibra e matriz serão consideradas perfeitas. Com essa consideração quando uma lâmina é tracionada na direção 1 as deformações longitudinais na lamina ε_1 , na fibra ε_F e na matriz ε_M tornam-se idênticas. E, adicionalmente, ao se tracionar uma lâmina na direção 2 as tensões normais da matriz na direção 2 (σ_2), a que atua nas fibras (σ_F) e a que atua na matriz (σ_M) são idênticas (NETO e PARDINI, 2006).

- Regra da mistura

Considerando uma lâmina com reforço unidirecional sendo tracionada, por uma força F , na direção das fibras. A força F , dividida pela área (A) da seção transversal da lâmina corresponde à tensão normal σ_1 no compósito.

Os módulos de elasticidade e as frações volumétricas das fibras e da matriz da lâmina são, respectivamente, E_F , V_F , E_M , V_M . Sendo F a força que provoca a tensão longitudinal, σ_1 , dado que as fibras e a matriz atuarão de forma análoga a molas em paralelo, uma parcela da mesma, F_f , solicitará as fibras, e a outra, F_m , a matriz (NETO e PARDINI, 2006).

Através do corte transversal na lamina e aplicando-se a equação de equilíbrio de forças na direção 1, obtém-se:

$$F = F_F + F_M \quad (6)$$

Como uma força normal em um corpo elástico é produto da tensão normal multiplicada pela área resistente, a Equação 6 pode ser escrita na forma:

$$\sigma_1 \cdot A = \sigma_F \cdot A_F + \sigma_M \cdot A_M \quad (7)$$

Sendo,

A : área total da seção transversal da lamina;

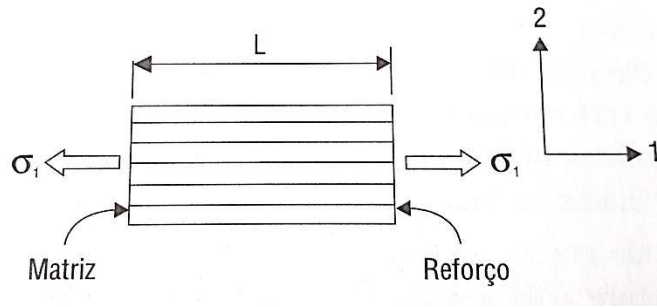
A_F : a parcela da área relativa às fibras;

A_M : a parcela da área relativa à matriz;

σ_F : a tensão normal nas fibras;

σ_M : a tensão normal na matriz;

Figura 5 – Lâmina unidirecional tracionada na direção 1.



Fonte: Neto; Pardini (2006).

A Equação 7 ainda pode ser apresentada da seguinte forma:

$$\sigma_1 = \sigma_F \cdot \left(\frac{A_F}{A} \right) + \sigma_M \cdot \left(\frac{A_M}{A} \right) \quad (8)$$

De acordo com a Figura 5, nota-se que os comprimentos (L) das fibras, da própria lâmina e da matriz, são idênticos, portanto as relações (A_F/A) e (A_M/A) , quando multiplicadas por L no numerador e no denominador, são iguais às frações volumétricas de fibra e de matriz, respectivamente.

Neste caso a Equação 8 se transforma em:

$$\sigma_1 = \sigma_F V_F + \sigma_M V_M \quad (9)$$

De acordo com a Lei de Hooke:

$$\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon_1 \quad (10)$$

$$\sigma_F = E_F \cdot \varepsilon_F \quad (11)$$

$$\sigma_M = E_M \cdot \varepsilon_M \quad (12)$$

Substituindo essas expressões na Equação 9 tem-se:

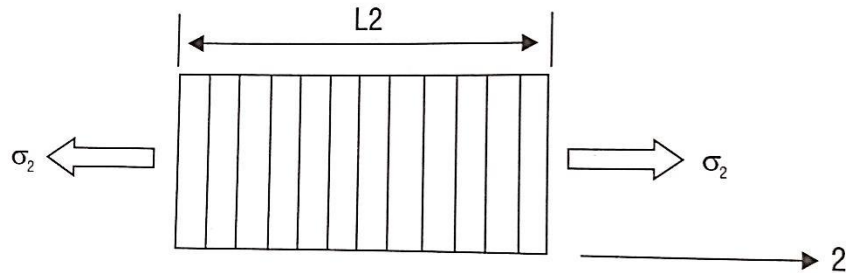
$$E_1 \cdot \varepsilon_1 = E_F \cdot \varepsilon_F \cdot V_F + E_M \cdot \varepsilon_M \cdot V_M \quad (13)$$

Como as deformações da lâmina, das fibras e da matriz são idênticas:

$$E_1 = E_F \cdot V_F + E_M \cdot V_M \quad (14)$$

A Equação 14 é conhecida como a Regra das Misturas e permite que se estime o módulo de elasticidade, na direção das fibras, de uma lâmina com reforço unidirecional, a partir dos módulos de elasticidade e das frações volumétricas das fibras e da matriz.

Figura 6 – Lâmina unidirecional tracionada na direção 2.



Fonte: Neto; Pardini (2006).

Quando se solicita uma lâmina com reforço unidirecional na direção 2, ou seja, perpendicularmente às fibras, conforme ilustrado na Figura 6 as fibras e a matriz trabalham como se fossem molas em série. Neste caso, um alongamento na direção 2 imposto à lâmina, ΔL_2 , será igual à soma dos alongamentos das fibras e da matriz:

$$\Delta L_2 = \Delta L_F + \Delta L_M \quad (15)$$

O alongamento de um material, por definição, é igual ao produto da deformação normal multiplicada pelo seu comprimento inicial, $\Delta L = \varepsilon \cdot L$. No caso da Figura 6, L_2 é o comprimento total da lâmina, e L_{2F} e L_{2M} são respectivamente os comprimentos parciais relativos às fibras e à matriz, e a Equação 15 pode ser rearranjada na forma:

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{L_{2F}}{L_2} \right) \cdot \varepsilon_{2F} + \left(\frac{L_{2M}}{L_2} \right) \cdot \varepsilon_{2M} \quad (16)$$

Como a área da seção transversal da lâmina é constante, os quocientes (L_{2F}/L_2) e (L_{2M}/L_2) são iguais às frações volumétricas de fibra e de matriz, respectivamente. Adicionalmente, de acordo com a Lei de Hooke, a deformação é o quociente da tensão normal aplicada dividida pelo módulo de elasticidade ($\varepsilon = \sigma/E$). Como a tensão normal aplicada na direção 2 é constante, e, portanto, é a mesma nas fibras e na matriz, a mesma se cancela em todos os membros da equação e obtém-se:

$$\frac{1}{E_2} = \left(\frac{V_F}{E_F} \right) + \left(\frac{V_M}{E_M} \right) \quad (17)$$

Ou, equivalentemente:

$$E_2 = \frac{(E_F E_M)}{(V_F E_M + V_M E_F)} \quad (18)$$

Além dos módulos de elasticidade E_1 e E_2 , uma lâmina com reforço unidirecional também apresenta dois coeficientes de Poisson. O maior deles, ν_{12} , refere-se à situação em que a tensão normal é aplicada na direção 1 das fibras, e o menor, ν_{21} , ocorre quando a tensão é perpendicular às fibras. A variação do coeficiente de Poisson maior de uma lâmina, ν_{12} , com a fração volumétrica de fibras, V_F , é linear (NETO e PARDINI, 2006).

$$\nu_{12} = V_F \nu_F + V_M \nu_M = V_F \nu_F + (1 + V_F) V_M \quad (19)$$

Na Equação 19, ν_F e ν_M são os coeficientes de Poisson das fibras e da matriz, respectivamente. O coeficiente de Poisson menor, ν_{21} , é geralmente obtido através do cálculo, utilizando-se a equação 20:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{\nu_{21}} \quad (20)$$

Outra propriedade elástica de uma lâmina é o módulo de cisalhamento G_{12} , o qual relaciona as tensões de cisalhamento, τ_{12} , no plano da lâmina (1,2) com as deformações angulares, γ_{12} , neste mesmo plano. A variação de G_{12} em função de V_F é não-linear e dada pela equação:

$$\frac{1}{G_{12}} = \left(\frac{V_F}{G_F} \right) + \left(\frac{V_M}{G_M} \right) \quad (21)$$

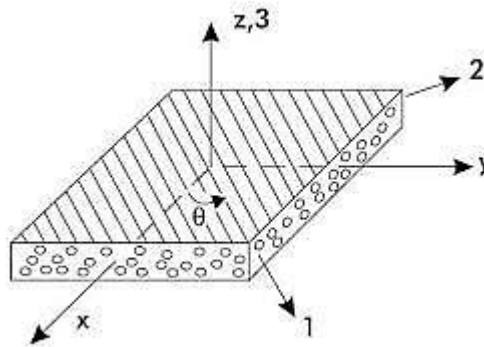
Por fim, a equação 21 também pode ser escrita na seguinte forma:

$$G_{12} = \frac{(G_F G_M)}{(V_F G_M + V_M G_F)} \quad (22)$$

2.2.2 Macromecânica

As relações entre tensões e deformações para materiais isotrópicos, submetidos a estados bidimensionais e tridimensionais de tensões, no regime elástico, são válidas em qualquer direção e independem do sistema de coordenadas ortogonal que se utilize. Entre exemplos de materiais isotrópicos pode-se citar os metais policristalinos, os quais são constituídos por um elevado número de grãos orientados aleatoriamente, os cerâmicos vítreos inorgânicos bem como os cerâmicos cristalinos, e o polímeros termofixos, que possuem arranjos tridimensionais de ligações covalentes cruzadas em suas estruturas moleculares.

Figura 7 – Lâmina no sistema de coordenadas global com fibras no plano 1 e 2.



Fonte: Galli (2016).

Um material ortotrópico é aquele cujas propriedades são distintas em duas direções ortogonais, como é o caso das lâminas de compósitos que apresentam diferentes propriedades na direção 1, direção da fibra, e na direção 2, perpendicular à fibra.

As propriedades elásticas de uma lâmina ortotrópica, determinada pelas propriedades elásticas E_1 , E_2 , E_{12} , ν_{12} , ν_{21} seguindo as orientações do plano mostrado na Figura 6. Adicionalmente, os módulos de elasticidade nas direções 1 e 2 são, via de regra, diferentes.

Nesta seção, utiliza-se as propriedades elásticas ortotrópicas em pauta para, a partir das mesmas, obter-se as relações entre tensões e deformações nas direções 1 e 2, em uma lâmina com reforço unidirecional contínuo submetida a tensões normais σ_1 e σ_2 e de cisalhamento τ_{12} .

Estas lâminas representam os blocos básicos de modelos utilizados na análise de estruturas compósitas mais complexas, tais como os laminados, formados pelo empilhamento de lâminas, nas quais as fibras de cada camada são orientadas em múltiplas direções.

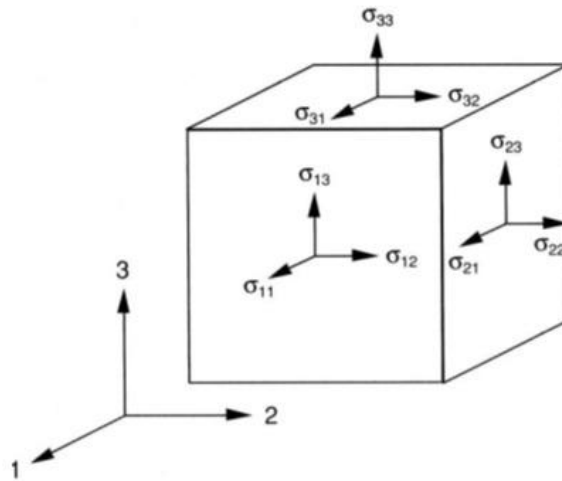
Ao se fabricar um componente estrutural, tal como, uma barra, viga ou uma placa compósita, mesmo que este possua uma única camada, é possível que suas fibras sejam orientadas de forma a ficarem inclinadas em relação ao eixo longitudinal da peça. Neste caso é importante determinar as relações entre as tensões de deformações nas direções longitudinal e transversal (X,Y) da peça ou componente mecânico, as quais serão diferentes das relações no sistema de coordenadas global (1, 2).

Tais relações são úteis para a análise bidimensional de estruturas compósitas de parede fina, tais como vigas, placas e cascas laminadas. No caso específico do componente ser uma casca fina, as coordenadas (X, Y) passam a referir-se às direções meridional e circunferencial da mesma de forma que as equações deduzidas para placas planas podem ser adaptadas e utilizadas (NETO, PARDINI, 2006).

No estudo e na solução de problemas que envolvem o comportamento mecânico de estruturas compósitas são sempre necessários dois sistemas de coordenadas, para determinar com clareza os carregamentos mecânicos e a geometria do componente analisado e para localizar corretamente as fibras em relação ao componente.

A análise bidimensional, apesar de ser a mais utilizada na prática por ser menos complexa, é um caso particular da tridimensional. Para o desenvolvimento das relações e propriedades macromecânicas, um sistema de coordenadas ortogonais 1-2-3, na Figura 8, é definido para cada lâmina. De acordo com esse sistema, o eixo 1 está alinhado à direção das fibras e o eixo 3 está perpendicular ao plano da lâmina e das fibras (GUAMÁ, 2012).

Figura 8 – Estado de tensão de um elemento de volume.



Fonte: Guamá (2012).

- O estado de tensões e deformações nas seis faces do elemento é representado como:
- $\sigma_i = \sigma_{ii}$ (para $i = 1, 2$ e 3): tensão normal a uma face e cuja direção é paralela com um dos eixos de coordenada principal.
- $\sigma_{ij} = \tau_{ij}$ (para $i = 1, 2$ e 3): tensão de cisalhamento transversal a uma face i e direção j .
- $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji} = \epsilon_i$ (para $i = 1, 2$ e 3): deformação longitudinal na direção i .
- Lei de Hooke, Equação 10:

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_i}{E_i} \quad (10)$$

- Coeficiente de Poisson:

$$\nu_{ij} = \frac{\epsilon_j}{\epsilon_i} \quad (24)$$

- Tensão de Cisalhamento:

$$\gamma_{ij} = \frac{\tau_{ij}}{G_{ij}} \quad (25)$$

Para um material ortotrópico com nove constantes elásticas, pode-se expressar as reações de tensão-deformação na forma de matrizes:

- Matriz de Conformidade

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{11} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{11} & S_{11} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (26)$$

$$\{\epsilon_i\} = [S_{ij}]\{\sigma_j\} \text{ para } (i=1, 2, 3, \dots, 6)$$

Substituindo os componentes S's da matriz de flexibilidade pelas propriedades mecânicas dos materiais, a matriz de conformidade pode se expressar como:

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & -\frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{21}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (27)$$

- Matriz de Rigidez

A inversa da Matriz Conformidade [S], a Matriz de Rigidez [C] pode ser escrita como:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{11} & C_{11} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_4 \\ \gamma_5 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (28)$$

$$\{\sigma_i\} = [C_{ij}]\{\varepsilon_j\} \text{ (para } i, j = 1, 2 \text{ e } 3, \dots, 6)$$

Onde,

$$C_{11} = \frac{S_{22}S_{33} - S_{23}^2}{S} \quad (29)$$

$$C_{22} = \frac{S_{33}S_{11} - S_{13}^2}{S} \quad (30)$$

$$C_{33} = \frac{S_{11}S_{22} - S_{12}^2}{S} \quad (31)$$

$$C_{12} = \frac{S_{13}S_{23} - S_{12}S_{33}}{S} \quad (32)$$

$$C_{13} = \frac{S_{12}S_{23} - S_{13}S_{22}}{S} \quad (33)$$

$$C_{23} = \frac{S_{12}S_{13} - S_{23}S_{11}}{S} \quad (34)$$

$$C_{44} = \frac{1}{S_{44}} \quad (35)$$

$$C_{55} = \frac{1}{S_{55}} \quad (36)$$

$$C_{66} = \frac{1}{S_{66}} \quad (37)$$

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \quad (38)$$

Ou ainda, usando as constantes do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson, os elementos C's da matriz de rigidez podem ser expressos como:

$$C_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} \quad (39)$$

$$C_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \quad (40)$$

$$C_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (41)$$

$$C_{12} = \frac{\nu_{21} - \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} - \nu_{13}\nu_{32}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (42)$$

$$C_{13} = \frac{\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} - \nu_{13}\nu_{32}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (43)$$

$$C_{23} = \frac{\nu_{21} - \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} - \nu_{13}\nu_{32}}{E_1 E_2 \Delta} \quad (44)$$

$$C_{44} = C_{23} \quad (45)$$

$$C_{55} = C_{13} \quad (46)$$

$$C_{66} = C_{12} \quad (47)$$

$$\Delta = \frac{1}{E_1 E_2 E_3} \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{21} & -\nu_{31} \\ -\nu_{12} & 1 & -\nu_{32} \\ -\nu_{13} & -\nu_{23} & 1 \end{bmatrix} \quad (48)$$

Em aplicações estruturais, os materiais compósitos são submetidos a carregamento no plano do laminado, ou seja, estado plano de tensões. Assim, todas as componentes de tensão da direção 3 são nulas (GUAMÁ, 2012):

$$\sigma_3 = 0 \quad (49)$$

$$\tau_{23} = \tau_4 = 0 \quad (50)$$

$$\tau_{13} = \tau_5 = 0 \quad (51)$$

O que leva a matriz de rigidez reduzida:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (52)$$

$\{\sigma\}_{1,2} = [Q]_{1,2} \{\varepsilon\}_{1,2}$ onde:

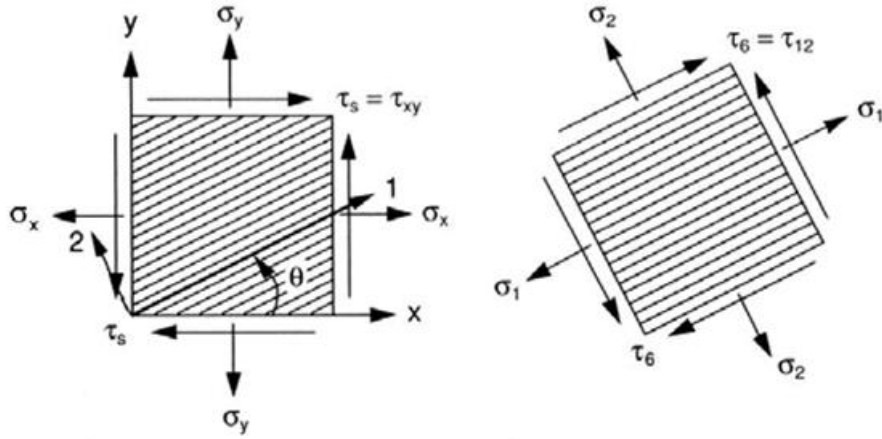
$$Q_{IJ} = C_{IJ} - \frac{C_{I3}C_{J3}}{C_{33}} \quad (53)$$

(para i= 1, 2 e 6) e, cuja matriz conformidade, é escrita como:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (54)$$

Quando os eixos principais 1-2 da lâmina em um estado plano de tensões não coincidem com um outro sistema global de coordenadas XY, Figura 9, torna-se necessário referenciar as tensões e deformações dos eixos principais 1 e 2 em relação aos eixos de carregamento XY por relações de transformação linear de coordenadas como segue:

Figura 9 – Componentes de tensão nas direções principais e globais de coordenadas.



Fonte: Daniel; Ishai (2006).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} \quad (55)$$

$$\{\sigma\}_{1,2} = [T] \{\sigma\}_{x,y} \quad (56)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} = [T] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2} \gamma_s \end{Bmatrix} \quad (57)$$

$$\{\varepsilon\}_{1,2} = [T] \{\varepsilon\}_{x,y} \quad (58)$$

Onde $[T]$ é a matriz de transformação,

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (59)$$

para, $m = \cos \theta$ e $n = \sin \theta$

Onde o ângulo θ está mostrado na Figura 8. A matriz $[T]$ é uma matriz reversível, cuja inversa é determinada como segue:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_6 \end{Bmatrix} \quad (60)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2} \gamma_s \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_6 \end{Bmatrix} \quad (61)$$

Sendo $[T]^{-1}$ a matriz inversa da matriz transformação, é:

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (62)$$

Assim, se a lâmina é carregada ao longo do eixo XY, então as relações de tensão-deformação após as substituições tornam-se:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 0 \\ Q_{yx} & Q_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{pmatrix} \quad (63)$$

Onde se obtém os valores da rigidez transformada como função da rigidez principal da lâmina:

$$Q_{xx} = m^4 Q_{11} + n^4 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (64)$$

$$Q_{yy} = n^4 Q_{11} + m^4 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (65)$$

$$Q_{xy} = m^2 n^2 Q_{11} + m^2 n^2 Q_{22} + (m^4 + n^4) Q_{12} - 4m^2 n^2 Q_{66} \quad (66)$$

$$Q_{xs} = m^3 n^4 Q_{11} + m^3 n Q_{22} - mn(m^2 + n^2) Q_{12} - 2mn(m^2 n^2) Q_{66} \quad (67)$$

$$Q_{yx} = mn^3 Q_{11} + m^3 n Q_{22} + mn(m^2 - n^2) Q_{12} + 2mn(m^2 - n^2) Q_{66} \quad (68)$$

$$Q_{ss} = m^2 n^2 Q_{11} - m^2 n^2 Q_{22} + 2m^2 n^2 Q_{12} + (m^2 - n^2) Q_{66} \quad (69)$$

E também podem ser determinadas através da inversão direta, como segue:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{1}{2}\gamma_s \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ \frac{1}{2}S_{sx} & \frac{1}{2}S_{sy} & \frac{1}{2}S_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{pmatrix} \quad (70)$$

O que depois das substituições obtém:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_s \end{pmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_s \end{pmatrix} \quad (71)$$

$$\begin{bmatrix} S_{xx} & S_{xy} & S_{xs} \\ S_{yx} & S_{yy} & S_{ys} \\ S_{sx} & S_{sy} & S_{ss} \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{21} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} [T] \quad (72)$$

Assim, determina-se a rigidez transformada como função da rigidez principal da lâmina:

$$S_{xx} = m^4 S_{11} + n^4 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + 4m^2 n^2 S_{66} \quad (73)$$

$$S_{yy} = n^4 S_{11} + m^4 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + 4m^2 n^2 S_{66} \quad (74)$$

$$S_{xy} = m^2 n^2 S_{11} + m^2 n^2 S_{22} + (m^4 + n^4) S_{12} - 4m^2 n^2 S_{66} \quad (75)$$

$$S_{xs} = m^3 n^4 S_{11} + m^3 n S_{22} - mn(m^2 + n^2) S_{12} - 2mn(m^2 n^2) S_{66} \quad (76)$$

$$S_{yx} = mn^3 S_{11} + m^3 n S_{22} + mn(m^2 - n^2) S_{12} + 2mn(m^2 - n^2) S_{66} \quad (78)$$

$$S_{ss} = m^2 n^2 S_{11} - m^2 n^2 S_{22} + 2m^2 n^2 S_{12} + (m^2 - n^2) S_{66} \quad (79)$$

2.3 APLICAÇÃO DE VASOS DE COMPÓSITOS

Um vaso de pressão deve ser projetado para observar e suportar diversas condições de falha de operação. Devido a uma série de graves acidentes ocorridos com equipamentos desse tipo no comércio do século XX, foram criados critérios de segurança de projeto, fabricação e inspeção de vasos de pressão.

As normas e códigos para equipamentos de pressão visam estabelecer regras seguras para o projeto dos mesmos, apresentando metodologia e critérios para dimensionamento, fabricação, realização de exames não destrutivos, e especificação de materiais aplicáveis segundo as tensões admissíveis.

No Brasil ABNT NBR ISO 9890-1: 2015 é a norma que classifica os cilindros sem costura para armazenamento e transporte de gases a alta pressão. Do sistema internacional, a ISO 11439:2013 abrange cilindros de qualquer aço sem costura, ligas de alumínio sem costura e materiais não metálicos usando qualquer projeto e método de fabricação adequado às condições de serviço especificadas. Segundo a norma internacional, há 4 tipos de cilindros para armazenamento de gases:

- Tipo 1 – cilindros do metal (alumínio e aço);
- Tipo 2 – cilindros de metal recobertos com fibra na região anular;
- Tipo 3 – cilindros de metal recobertos com fibra em toda extensão;
- Tipo 4 – cilindros de compósitos recobertos com fibra em toda extensão.

Os cilindros tipo 2 e 3 apresentam algumas vantagens em relação ao cilindro totalmente metálico tipo 1:

- Segurança;
- Resistência a corrosão e longa vida de fadiga;
- 70% mais leves que os cilindros tipo 1;
- Tipo 3 chega a ser 50% mais leves que o tipo 2;

Todavia, a principal desvantagem do uso dos cilindros tipo 2, 3 e 4 em relação ao tipo 1 é o preço. Como a tecnologia do uso de materiais compósitos é mais cara que a do trabalho com metal, o preço de fabricação é sensivelmente maior (GUAMÁ, 2012).

O cilindro tipo 2 possui espessura inferior, aproximadamente a metade da do cilindro tipo 1, unicamente metálico. Este, por receber uma camada de material compósito oferece reforço e compartilha o carregamento devido à pressão interna com o selante metálico. Isto permite a obtenção de um cilindro leve que resiste à pressão interna especificada. No tipo 2, a camada de

compósito é bobinada somente sobre a parte cilíndrica do vaso de pressão e no tipo 3 todo o corpo do vaso recebe o revestimento de compósito (GUAMÁ, 2012).

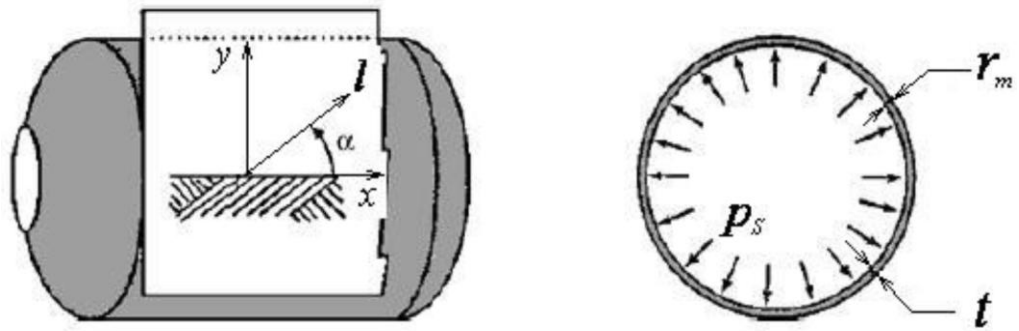
Para a obtenção da espessura total do laminado por cálculo analítico será apresentado nessa seção o método de análise de rede (do inglês: *netting analysis*) proposto por Gay, Hoa e Tsai (2003). Esse método assume a hipótese de que as tensões estruturais induzidas no corpo do selante metálico são todas transferidas para as fibras do reforço, as quais são tensionadas por tração. Outra hipótese considera que a parcela de tensão na matriz é desprezada e sua única função é manter geometricamente a posição das fibras (GUAMÁ, 2012).

Esse método apresenta limitações e não pode ser usado para se obter flexão, cisalhamento, tensão de descontinuidade ou resistência à flambagem para o compósito. É um método conservador que somente considera a resistência da fibra de reforço, entretanto quando utilizado experimentalmente com a capacidade de tração determinada, torna-se uma excelente ferramenta preliminar de projeto que ainda é muito utilizada pela indústria de enrolamento filamental (TANIGUSHI, 2003).

Para análise de rede um típico vaso ou cilindro de alta pressão de parede fina, manufaturado pelo processo de enrolamento filamental helicoidal, os seguintes itens devem ser considerados:

- Raio médio entre o raio externo e o interno do cilindro, r_m ;
- Espessura t de parede na parte cilíndrica é muito menor que o raio médio r_m do cilindro;
- Espessura de uma fibra unitária, t_f ;
- Pressão interna de serviço, p_s ;
- Tensões nas paredes σ_x e σ_y nas direções longitudinal e transversal (direções globais), respectivamente;
- O enrolamento helicoidal na parte cilíndrica é constituído de camadas alternadas a $\pm\alpha$ graus em relação ao eixo longitudinal;
- Tensão na direção da fibra: σ_1 .

Figura 10 – Cilindro de alta pressão em enrolamento filamental.

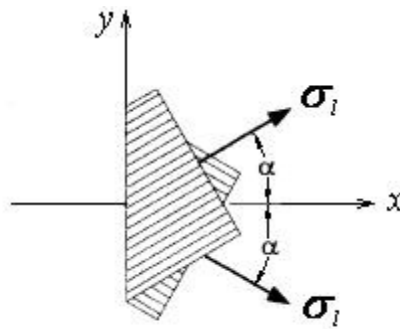


Fonte: Gay; Hoa; Tsai (2003).

Segundo Gay, Hoa e Tsai (2003), pela teoria de membranas, o estado de tensão em uma porção infinitesimal de parede se resume nas tensões longitudinais e circunferencial, nas direções globais x e y respectivamente sendo que a tensão radial é desprezível para efeito de dimensionamento. Entretanto, considera-se essa pequena porção como sendo ortotrópica.

As tensões circunferencial e longitudinal das fibras podem ser representadas pela tensão normal pura, σ_l , através de uma transformação pelo círculo de Mohr conforme Figura 11.

Figura 11 - Elemento de camada helicoidal - direção axial



Fonte: Taniguchi (2008).

Portanto, segundo Gay, Hoa e Tsai, a partir do a tensão normal na direção x será:

$$\sigma_x = \sigma + l \cdot \cos^2 \alpha \quad (80)$$

E,

$$\sigma_y = \sigma_l \cdot \cos^2 \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \sigma_l \cdot \sin^2 \alpha \quad (81)$$

Igualando com as tensões circunferenciais e longitudinais presentes na parede têm-se,

$$\sigma_l \cdot \cos^2 \alpha = \frac{p_b r_m}{2 t_f} \quad (82)$$

$$\sigma_l \cdot \sin^2 \alpha = \frac{p_b r_m}{t_f} \quad (83)$$

E dividindo uma equação pela outra obtém-se o ângulo em que o estado de tensões uniaxial de é uniaxial, de pura tensão de tração nas fibras.

$$\tan^2 \alpha = 2 \quad (84)$$

Logo,

$$\alpha = 54,7^\circ \quad (85)$$

Portanto, a tensão longitudinal na direção das fibras é:

$$\sigma_l = \frac{3}{2} \cdot \frac{p_b r_m}{t_f} \quad (86)$$

Assim, pode-se determinar a espessura mínima de fibras,

$$t_{fmin} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p_b r_m}{\sigma_l} \quad (87)$$

A espessura mínima do laminado pode ser obtida dividindo a espessura mínima de fibra pelo volume da fibra:

$$t_{lam} = \frac{t_{fmin}}{V_f} \quad (88)$$

Através da espessura mínima pode-se determinar a tensão de ruptura como segue:

$$t_{fmin} = \frac{p_b r_m}{2\sigma_{l\text{ ruptura}}} \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha_1} + 2 - \tan^2 \alpha_1 \right) \quad (89)$$

$$t_{fmin} = \frac{3}{2} \frac{p_b r_m}{\sigma_{l\text{ ruptura}}} \quad (90)$$

$$\sigma_{l\text{ ruptura}} = \frac{3}{2} \frac{p_b r_m}{t_{fmin}} \quad (91)$$

2.4 MÉTODO ELEMENTOS FINITOS PARA COMPOSTOS

Inspirados pelo desenvolvimento tecnológico no setor militar, os vasos de pressão compostos são adaptados para uma ampla aplicação no setor civil. Exibindo excelentes propriedades, tais como alta resistência, relação rigidez-peso, notável resistência à fadiga e excelente durabilidade contra a corrosão, também expandiram seu mercado comercial das indústrias aeroespacial e de aviação para os segmentos automotivo, médico e esportivo. Além disso, o recurso de personalização de design de estruturas compostas realizado através da modificação da orientação e da sequência de camadas permitiu que os engenheiros projetassem e fabricassem recipientes compostos adequados para várias missões.

A evolução tecnológica dos vasos de pressão para armazenamento de líquidos e gases sob altas pressões avançou nas últimas décadas. Um vaso de pressão metálico sofre com o alto peso e baixa resistência contra fadiga em comparação com outros tipos. Os recipientes compósitos pressurizados fornecem rigidez e resistência exigidas como componentes estruturais com considerável diminuição de peso. Mais recentemente, um vaso de pressão sem revestimento foi introduzido como tipo V para aplicações em espaçonaves, em que nano partículas são incorporadas ao sistema matricial (LIAOA e JIA, 2018).

O crescente interesse e demanda mundial por redução emissões de gases poluentes e a preocupação com o aquecimento global promoveu o aumento das pesquisas e utilização do gás natural comprimido e de hidrogênio como combustível nas indústrias automotivas. Consequentemente, emergiu um enorme potencial para armazenamento de gás natural e hidrogênio sob alta pressão em vasos compósitos produzidos por enrolamento filamentar como principal requisito deste sistema de combustível.

As indústrias automotiva e aeroespacial demandam de cada vez mais vasos compósitos para aumentar a carga útil e a distância percorrida pelos veículos sem reabastecer. Além disso, os níveis mais altos de redução de peso são alcançados contando com o processo de otimização de design e utilização de compósitos. Por esses motivos a pesquisa e o desenvolvimento de processos de fabricação mais baratos pode ser uma solução viável e benéfica principalmente no ponto de vista econômico (RAFIEE e TORABI, 2018).

2.5 ANSYS

A empresa é responsável pelo desenvolvimento do software de simulação de engenharia ANSYS e das plataformas de simulações além de comercializar e oferecer suporte técnico do software de simulação de engenharia. A plataforma de simulação ANSYS oferece o conjunto mais amplo de tecnologia de simulação, é uma estrutura aberta e flexível que conecta equipes de engenharia, ferramentas e dados. O suíte ANSYS abrange:

- Design 3D
- Eletromagnetismo
- Mecânica dos fluidos
- Ótica
- Semicondutores
- Estruturas
- Sistemas

O *software* também impulsiona a inovação na engenharia, pois, reduzindo ou eliminando as restrições físicas e econômicas, permite testes simulados que, de outra forma, não seriam possíveis, ou seja, favorece o pensamento de hipóteses, de modo que os engenheiros possam explorar prontamente alternativas de projeto chegando a uma solução ideal baseada em testes de hipóteses simulados sem gerar custos de produção.

Neste trabalho foi utilizada a versão ANSYS 18.2 *Student* disponibilizada gratuitamente para uso acadêmico que inclui os recursos de análise de compósito no módulo ANSYS *Composite PrepPost* (ACP). Com as ferramentas de simulação disponíveis nesse módulo pode-se produzir protótipos virtuais com as devidas configurações do material, das camadas e da angulação das fibras de forma que se torna possível analisar tensões, deformações e possíveis falhas antes de um protótipo físico ser produzido.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será apresentado o material utilizado e suas propriedades bem como a metodologia de construção do modelo de um cilindro de compósito no software ANSYS.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

O material utilizado para o estudo proposto por esse trabalho é o compósito T300/LY5052. Trata-se de um compósito polimérico reforçado por fibras de carbono cuja matriz é composta por uma resina epóxi Araldite LY5052 e cuja fibra de carbono é da classe T300.

A fibra de carbono T300 é considerada base de linha de fibras e sua principal aplicação é na indústria aeroespacial. Tem o diâmetro de aproximadamente $7\mu\text{m}$, é produzida a partir de poliacrilonitrila e tem alta resistência e alto módulo de elasticidade. (*Torayca T300 Technical Data Sheet*)

A Araldite LY5052 trata-se de uma resina epóxi de baixa viscosidade e fácil impregnação no reforço. Possui propriedades mecânicas favoráveis aos projetos estruturais com compósitos. (*Araldite LY 5052 / Aradur 5052 - Data Sheet*)

O Tabela 2 apresenta as propriedades básicas de ambos os materiais que compõem o compósito em estudo.

Tabela 2 – Propriedades da Fibra de carbono T300 e da Resina epóxi Araldite LY5052.

Propriedades	Fibra de carbono T300	Epóxi Araldite LY5052
Módulo de elasticidade	230 GPa	3 GPa
Resistência à tração	3,5 GPa	71 MPa
Densidade	1760 kg/m ³	1140 kg/m ³
Fração volumétrica	0,59111	0,40888

Fonte: *Torayca T300 Technical Data Sheet* e *Huntsman Araldite LY5052/Aradur 5052 Data Sheet*.

3.2 METODOLOGIA

Para a realização do estudo de tensões em um cilindro de compósito foi utilizado o software de elementos finitos ANSYS na versão acadêmica 18.2. Com base na revisão da bibliográfica apresentada no Capítulo 2 deste trabalho, pode-se entender que um cilindro ou vaso de pressão compósito é fabricado mais comumente pelo processo de enrolamento

filamentar de forma que a orientação das fibras é uma variável previamente estabelecida pelo engenheiro para atender os requisitos de projeto.

Foi desenhado um modelo de cilindro cujas dimensões são apresentadas na Tabela 3. A configuração do material no *software* foi definida em 4 camadas sobrepostas em dois tipos de sequência: simétrica e assimétrica. Para cada tipo de sequência de empilhamento de camadas foi realizado o estudo de tensão com variação de orientação das fibras de 5 a 90 graus, variando de 5 em 5 graus. A Tabela 4 apresenta as configurações das camadas para cada ângulo e tipo de sequência de empilhamento.

Tabela 3 – Dimensões do cilindro.

Dimensões	Valores
Diâmetro externo	52 mm
Diâmetro interno	50 mm
Comprimento	400 mm
Número de camadas	4
Espessura de cada camada	0,5 mm

Fonte: Do autor.

Tabela 4 – Sequências de empilhamento para cada orientação de fibra.

(continua)

Ângulo (°)	Sequência simétrica	Sequência assimétrica
5	[+5/-5/-5/+5]	[+5/-5/+5/-5]
10	[+10/-10/-10/+10]	[+10/-10/+10/-10]
15	[+15/-15/-15/+15]	[+15/-15/+15/-15]
20	[+20/-20/-20/+20]	[+20/-20/+20/-20]
25	[+25/-25/-25/+25]	[+25/-25/+25/-25]
30	[+30/-30/-30/+30]	[+30/-30/+30/-30]
35	[+35/-35/-35/+35]	[+35/-35/+35/-35]
40	[+40/-40/-40/+40]	[+40/-40/+40/-40]
45	[+45/-45/-45/+45]	[+45/-45/+45/-45]
50	[+50/-50/-50/+50]	[+50/-50/+50/-50]
55	[+55/-55/-55/+55]	[+55/-55/+55/-55]
60	[+60/-60/-60/+60]	[+60/-60/+60/-60]
65	[+65/-65/-65/+65]	[+65/-65/+65/-65]
70	[+70/-70/-70/+70]	[+70/-70/+70/-70]

(conclusão)

Ângulo (°)	Sequência simétrica	Sequência assimétrica
75	[+75/-75/-75/+75]	[+75/-75/+75/-75]
80	[+80/-80/-80/+80]	[+80/-80/+80/-80]
85	[+85/-85/-85/+85]	[+85/-85/+85/-85]
90	[+90/-90/-90/+90]	[+90/-90/+90/-90]

Fonte: Do autor.

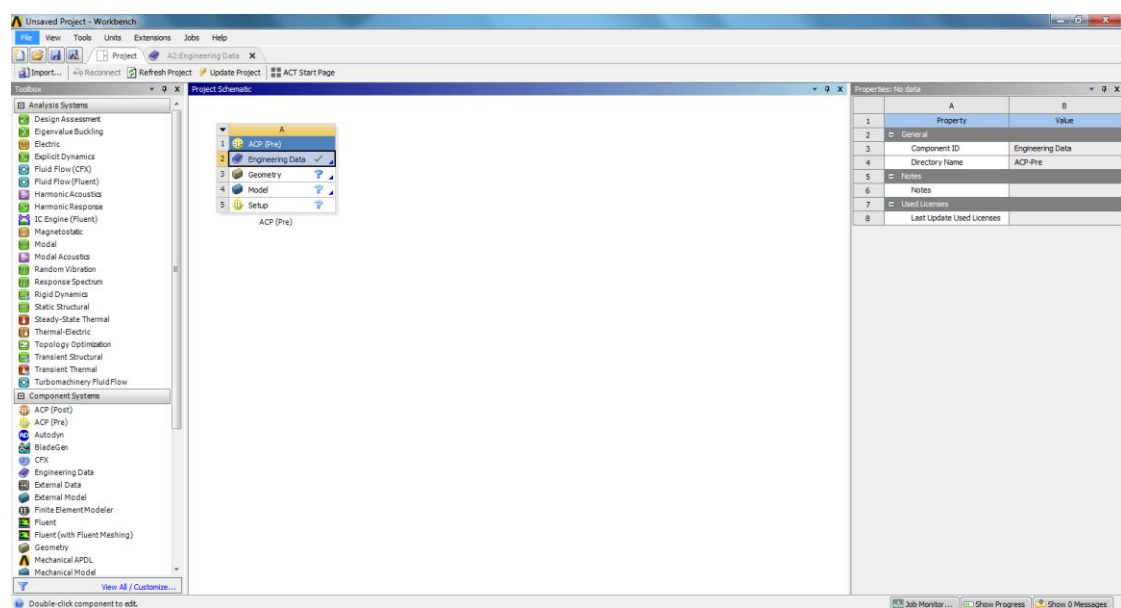
Após a concepção do vaso de pressão de material compósito para uma orientação específica, foi aplicada uma pressão de serviço de 35 MPa na face interna do tubo e realizado o estudo das tensões normais.

- Criação do compósito no ANSYS

Nesta seção serão apresentadas, passo a passo, as etapas para a confecção de um cilindro de material compósito utilizando o módulo ACP do ANSYS *Academic* 18.2.

O processo inicia-se com a abertura da área de trabalho do *software*. Há uma coluna à direita com os diversos tipos de projetos que se pode criar. Para um projeto de componente em compósito deve-se clicar na opção ACP (Pre) arrastando-a para a área de trabalho, conforme Figura 12:

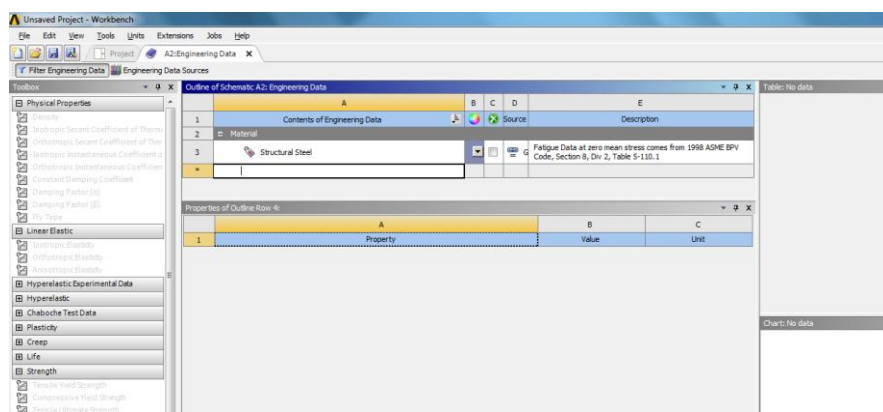
Figura 12 - Criação do projeto – área de trabalho.



Fonte: Do autor (2018).

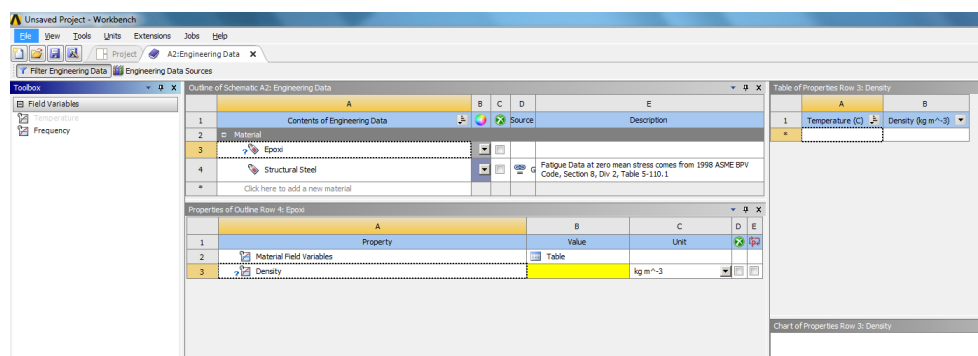
O segundo passo é a escolha ou inserção de dados do material. Esta etapa depende do projeto, pois o usuário pode escolher um material já disponível na biblioteca do programa ou inserir um novo material. No segundo caso, o usuário deve inserir o novo material e suas propriedades na biblioteca como foi feito neste trabalho. Para isso, abre-se a opção *Engineering Data* e apresenta-se a tela da Figura 13 onde foi possível inserir o nome do novo material. Uma vez criado o material, foram inseridas as propriedades do mesmo a partir da coluna à direita que apresenta opções de propriedades para que o usuário escolha, como mostra a Figura 14.

Figura 13 - *Engineering Data* – criação de novo material compósito.



Fonte: Do autor (2018).

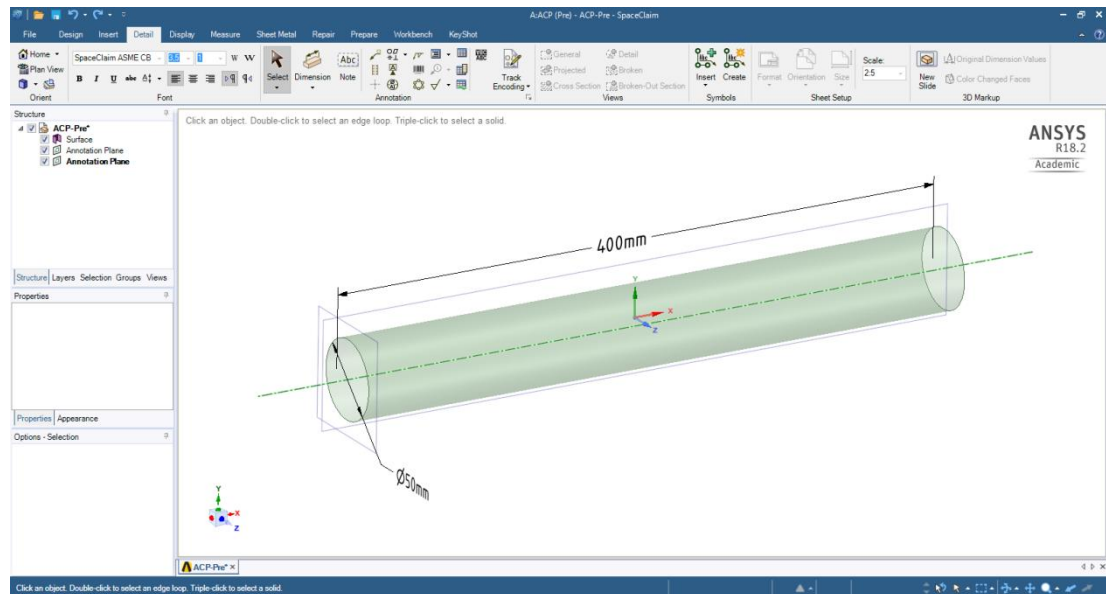
Figura 14 – Inserção das propriedades do material



Fonte: Do autor (2018).

Uma vez configurado o material, o próximo passo foi a criação da geometria do componente de estudo. Para isso foi aberto o segundo campo do módulo ACP: *Geometry*. Para o desenho de geometrias é aberto o *SpaceClaim* que é o programa de desenho da plataforma ANSYS. Na Figura 15 pode-se ver a geometria pronta.

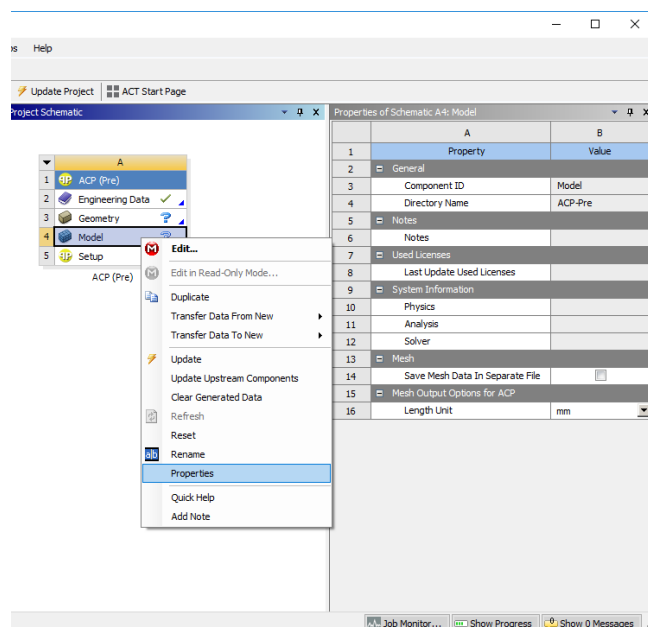
Figura 15 – *SpaceClaim* - Geometria desenhada.



Fonte: Do autor (2018).

A etapa seguinte consiste na modelagem do componente no campo *Model* do ACP, porém, antes de abrir esse campo, foi feita a configuração da unidade de medida a ser utilizada na confecção da malha. Para isso, ao abrir o menu suspenso do campo *Model*, a opção *Propriedade* fez aparecer uma coluna à direita cuja última linha permitiu a escolha da unidade milímetro para caracterizar a malha; conforme Figura 16.

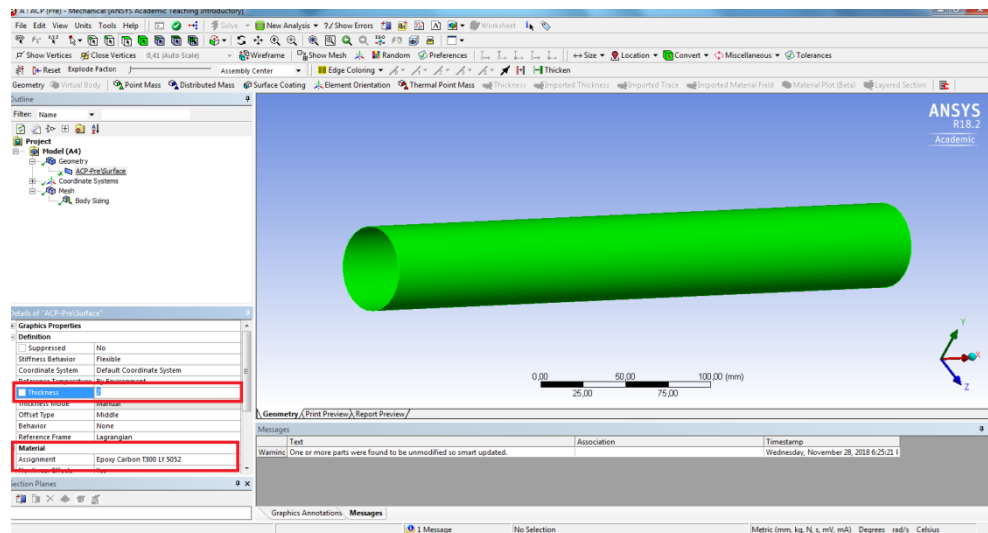
Figura 16 – Configuração de unidade de medida de malha.



Fonte: Do autor (2018).

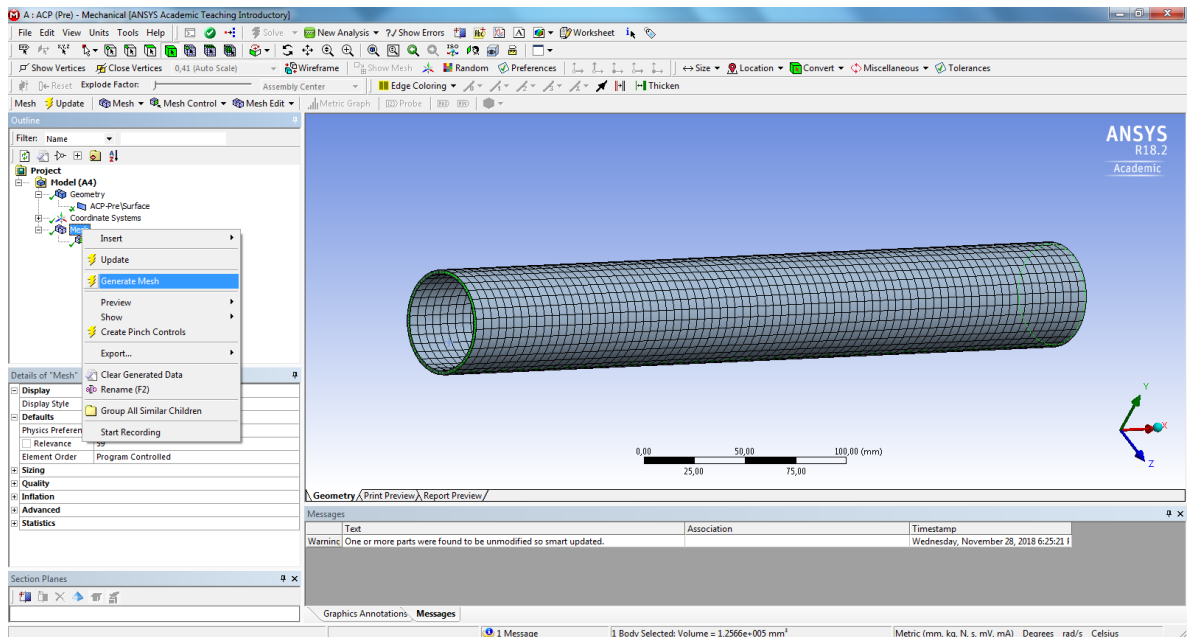
A opção *Model* direciona o usuário ao programa *Mechanical* cuja tela é apresentada na Figura 16. Nesta área de trabalho deve-se aplicar à geometria o material escolhido, determinar a espessura da peça (Figura 17) e a geração da malha (Figura 18).

Figura 17 - *Mechanical* - configuração da espessura da peça e aplicação do material à geometria.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 18 – *Mechanical* – Geração de malha.

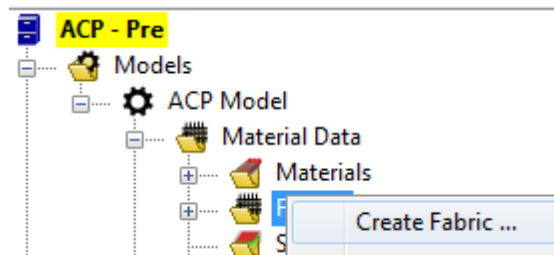


Fonte: Do autor (2018).

Terminada as ações de configuração no campo *Model*, foi aberto o campo *Setup* do ACP. Nesse campo foram configuradas as camadas e a orientação das fibras como segue:

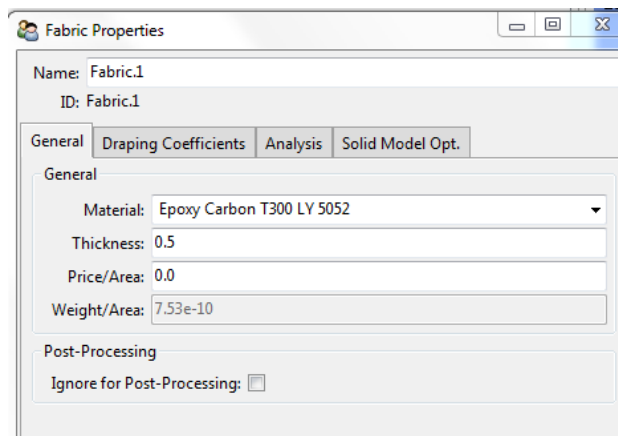
Clicando com o botão direito na opção *Fabric* (Figura 19) foi criada uma camada e na janela de configuração foi escolhido o material e determinada a espessura de cada camada (Figura 20).

Figura 19 – Criação de camada.



Fonte: Do autor (2018).

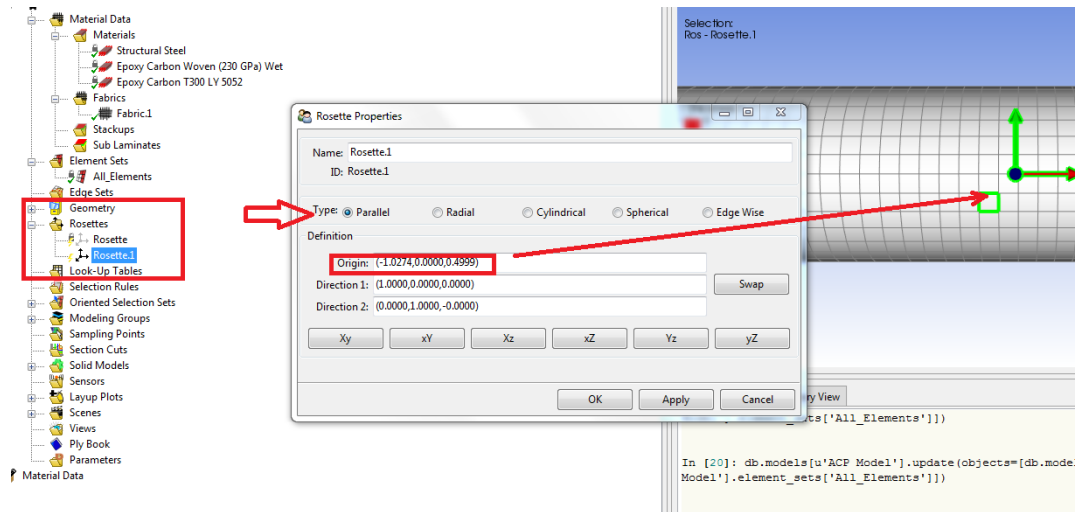
Figura 20 – Escolha de material e espessura da camada.



Fonte: Do autor (2018).

Clicando com o botão direito sobre *Rosette* foi criada a *Rosette.1* (Figura 21) onde foi configurado o sistema de coordenadas das fibras, sua origem e orientação. Para este trabalho as fibras são consideradas perfeitamente alinhadas e paralelas entre si.

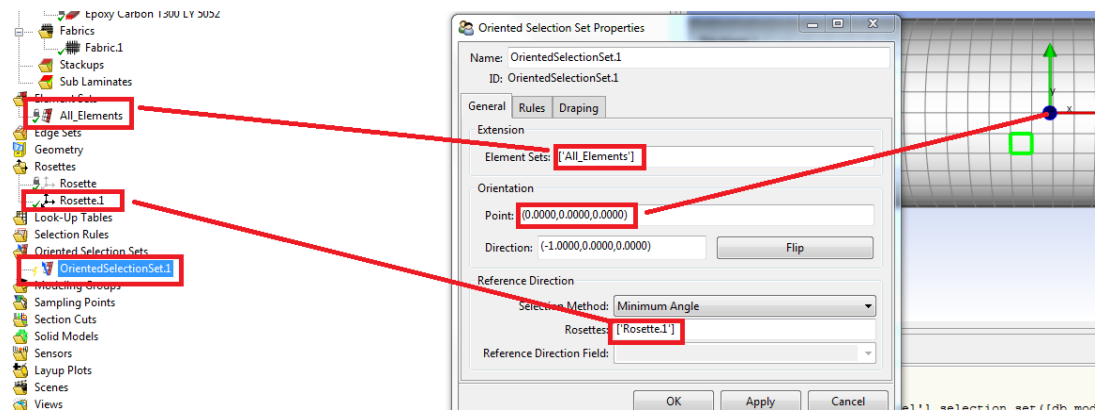
Figura 21 – Definição de propriedades da *Rosette*.



Fonte: Do autor (2018).

O passo seguinte foi criar uma *Oriented Selection Sets*. Esta opção permitiu determinar a direção de orientação das fibras que também determina a direção de empilhamento de camadas (Figura 22)

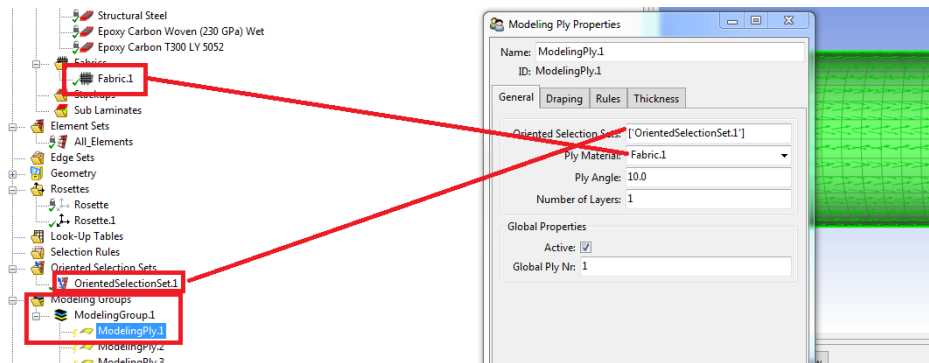
Figura 22 – *Oriented Selection Set* – Orientação dos elementos



Fonte: Do autor (2018).

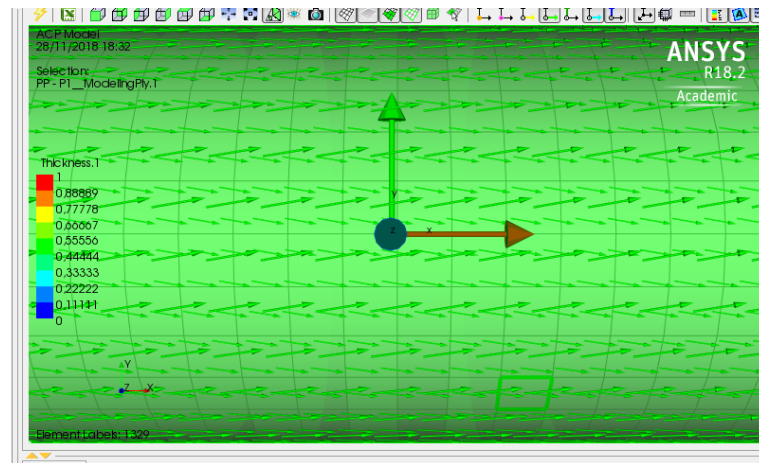
A última etapa de configuração das camadas foi clicar com o botão direito na opção *Modeling Groups* e em *Create Ply*. Na janela *Modeling Ply Properties* foi feita a referência ao material e à orientação dos elementos já criados. E foi determinado o ângulo das fibras na camada criada. O processo de criação de camada foi repetido quatro vezes criando quatro camadas com angulação de fibras de $\pm\theta$. Na Figura 23, como exemplo, o ângulo da primeira camada foi de 10° . A Figura 24 mostra a orientação das fibras após finalizada as configurações.

Figura 23 - Definição das propriedades de cada camada do compósito.



Fonte: Do autor (2018).

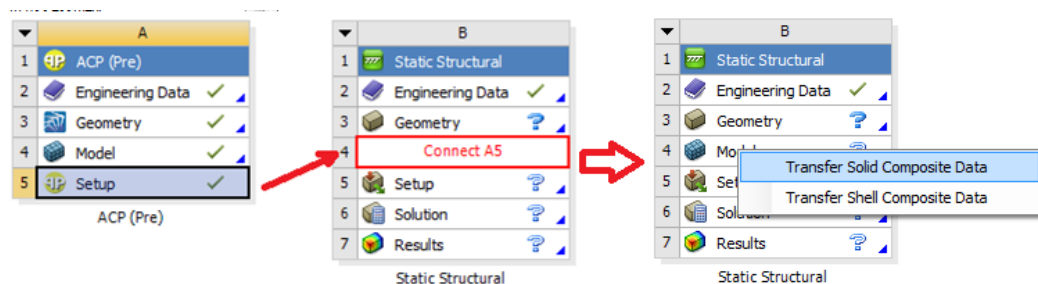
Figura 24 - Orientação das fibras na camada.



Fonte: Do autor (2018).

Finalizada a configuração das fibras no módulo ACP, foi criado outro módulo de trabalho no ANSYS, o *Static Structural*. Esse novo módulo deve ter conexão com o ACP para que as informações do material configurado sejam consideradas na nova modelagem. Para isso o campo *Setup* foi arrastado até o campo *Model* do *Static Structural* escolhendo a opção *Transfer Solid Composite Data* (Figura 25).

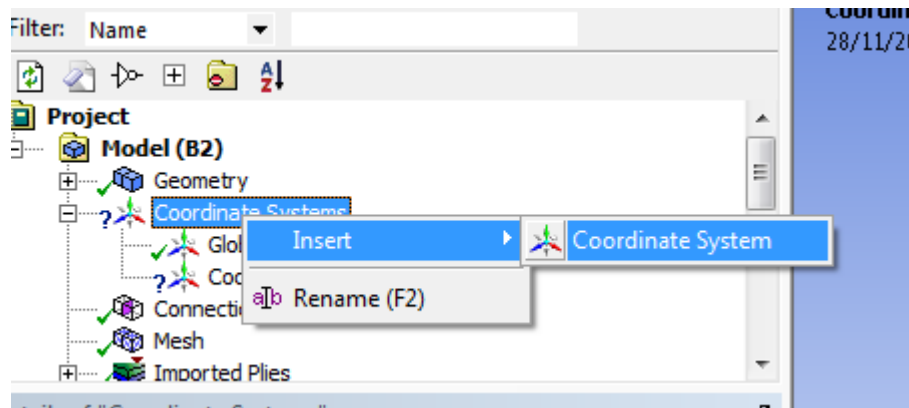
Figura 25 – Conexão ACP – Static Structural.



Fonte: Do autor (2018).

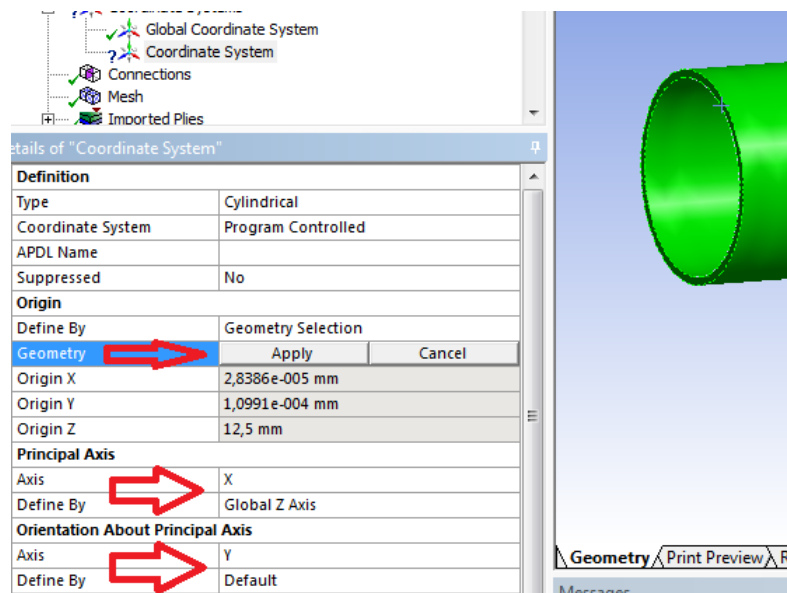
Para iniciar a modelagem da estrutura foi aberto o programa *Mechanical* através do campo *Model* do *Static Structural*. Por se tratar de um cilindro, a primeira modificação feita foi a criação de um sistema de coordenadas cilíndrico (Figura 26). Nesse novo sistema, determinou-se que o eixo X estaria na direção do eixo Z global e o eixo Y seria a coordenada cilíndrica conforme Figura 27.

Figura 26 – Criação de novo sistema de coordenadas.



Fonte: Do autor (2018).

Figura 27 – Configuração dos eixos do novo sistema de coordenadas.



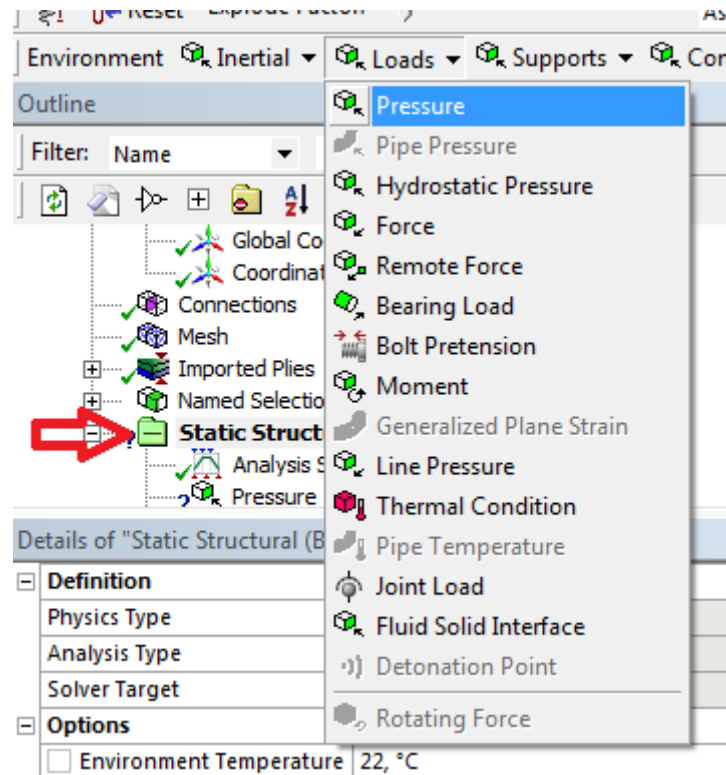
Fonte: Do autor (2018).

Passando para as configurações de vínculo e carregamento da estrutura, na opção *Static Structural* (Figura 28) foram adicionados os seguintes itens:

- Pressão de 35 MPa aplicada na face interna do cilindro (Figura 29).

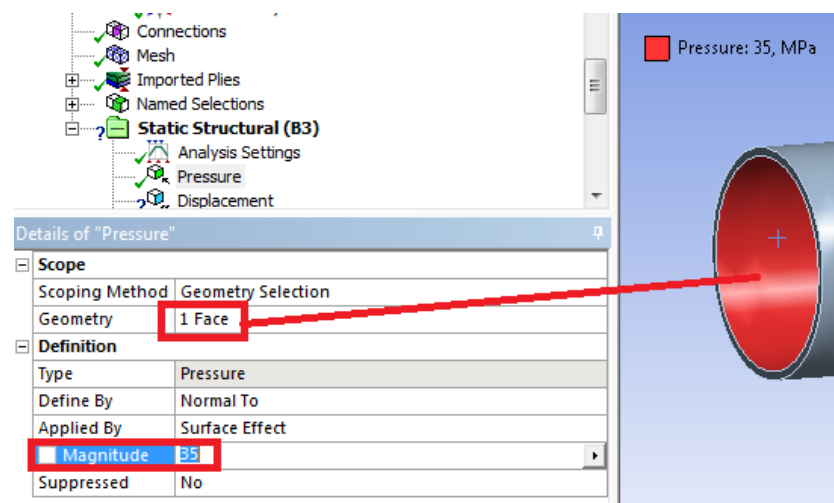
- Vinculo (*Displacement*) travando o movimento do corpo nas direções X e Z, aplicado na borda esquerda do cilindro. (Figura 30)
- Vinculo (*Displacement 2*) travando o movimento do corpo na direção Z aplicado na borda direita do cilindro. (Figura 31)

Figura 28 – Inclusão da pressão interna de serviço.



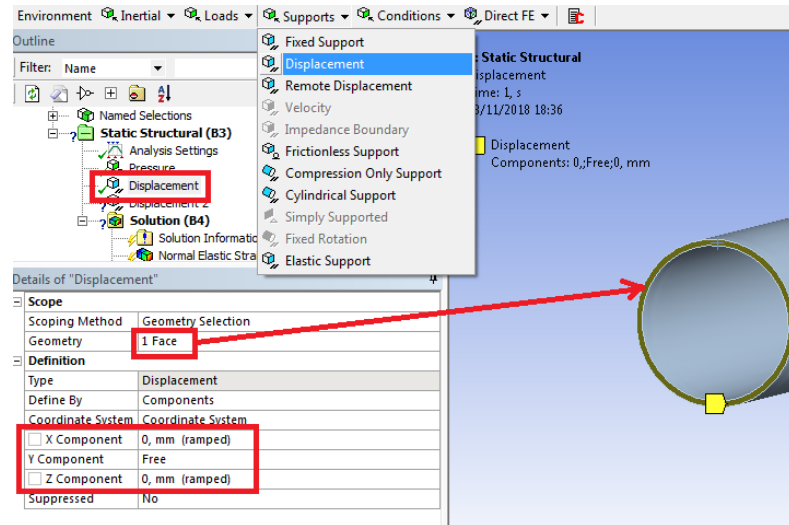
Fonte: Do autor (2018).

Figura 29 – Configuração da pressão de serviço.



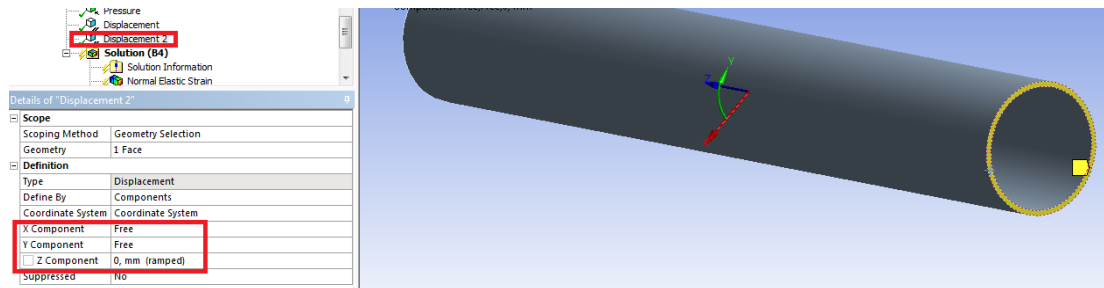
Fonte: Do autor (2018).

Figura 30 – Adição do primeiro vínculo e configuração.



Fonte: Do autor (2018).

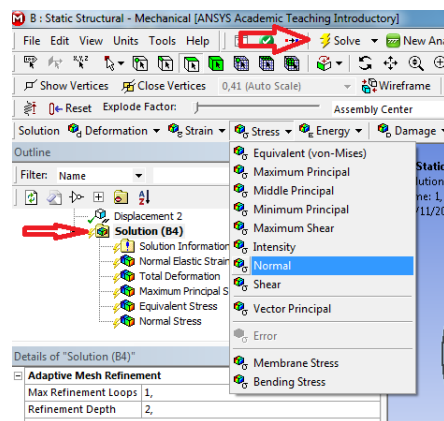
Figura 31– Adição do segundo vínculo e configuração.



Fonte: Do autor (2018).

Para finalizar a simulação, na opção *Solution* e no menu *Stress* foi selecionada a opção *Normal* e depois o *Solve*, solicitando dessa forma que o programa apresente as soluções de tensões normais no cilindro modelado, conforme Figura 32.

Figura 32 – Solicitação da solução para tensões normais.



Fonte: Do autor (2018).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados das simulações realizadas na plataforma ANSYS para cada tipo de sequência de empilhamento de camada, gráficos de análise dos valores de tensão normal obtidos nas simulações e discussão sobre o estudo realizado.

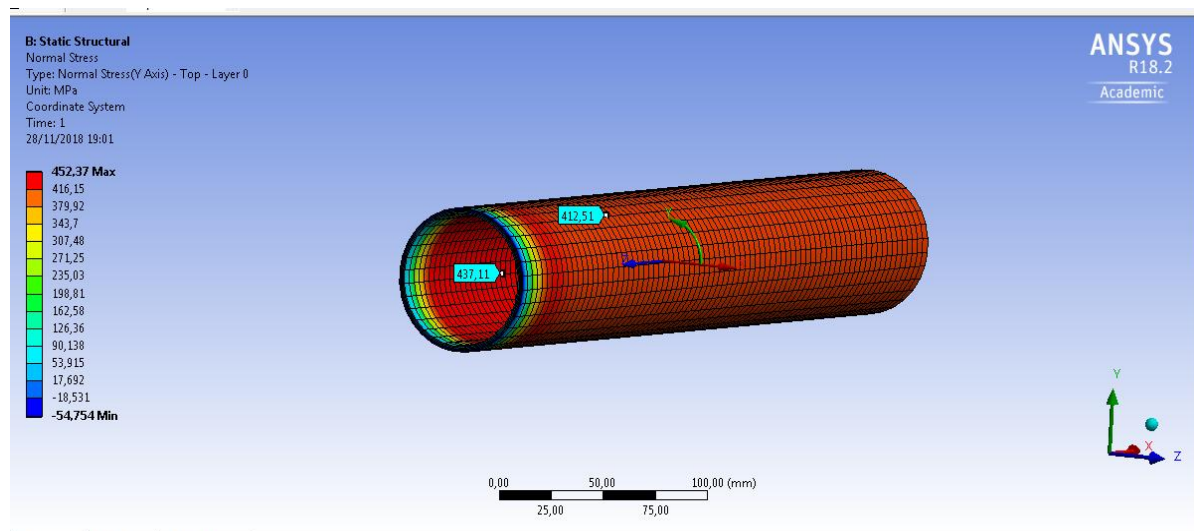
4.1 ANÁLISE DE TENSÕES NORMAIS OBTIDAS NO ANSYS

Conforme descrito no capítulo 3 deste trabalho, foram realizadas análises de tensão normal em um cilindro de compósito na plataforma ANSYS. Os resultados obtidos foram apresentados como segue:

- Sequência de empilhamento Simétrica.

A Figura 34 apresenta a simulação obtida para a sequência de empilhamento de camadas simétricas conforme previsto na Tabela 3 da Seção 3.1 deste trabalho, para uma sequência simétrica e $\pm 5^\circ$ de orientação das fibras. As demais simulações, por apresentarem-se de mesma metodologia, estão com seus resultados apresentados nas Tabelas 4 e 5.

Figura 34 – Distribuição de tensão para sequência simétrica e $\pm 5^\circ$ de orientação das fibras.



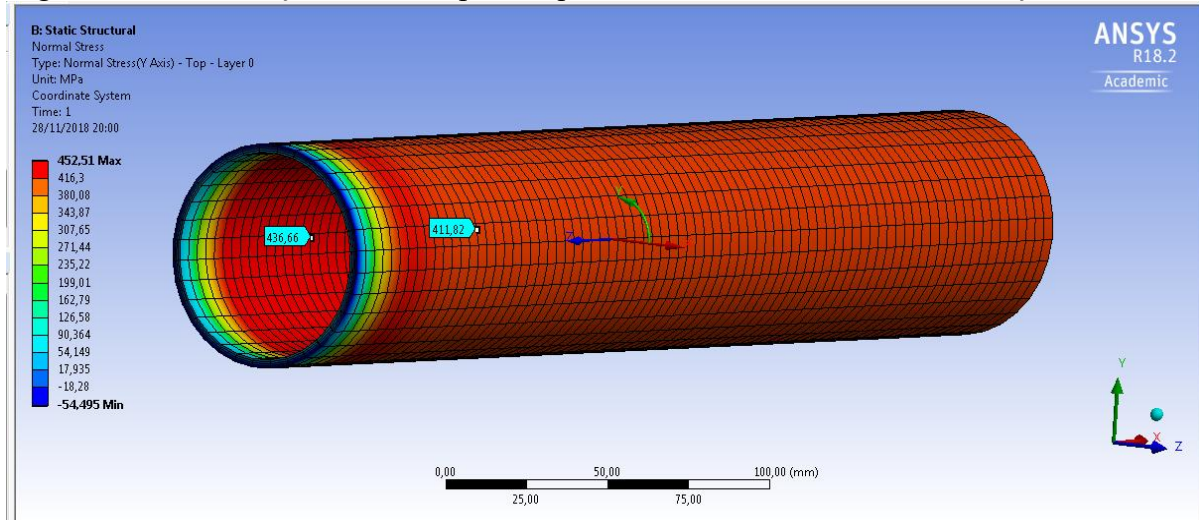
Fonte: Do autor (2018).

- Sequência de empilhamento Assimétrica.

A Figura 34 apresenta a simulação obtida para a sequência de empilhamento de camadas assimétrica conforme previsto na Tabela 4 da Seção 3.1 deste trabalho. As demais simulações,

por apresentarem-se de mesma metodologia, estão com seus resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Figura 34 – Distribuição de tensão para sequência assimétrica e $\pm 5^\circ$ de orientação das fibras.



Fonte: Do autor (2018).

- Análise dos resultados

Os resultados da análise de tensão em cilindro de compósito sob pressão de serviço foram apresentados nas Tabelas 5 e 6. Também foram feitos gráficos para comparação dos resultados. No Gráfico 1, pode-se perceber o comportamento da tensão para a sequência simétrica de empilhamento de camadas e no Gráfico 2 para a sequência assimétrica. O Gráfico 3, mostra a comparação das tensão para ambas as sequências de empilhamento.

Tabela 5– Distribuição de tensão normal longitudinal para sequência simétrica.

(continua)

Ângulo (°)	Tensão Normal longitudinal Máxima nominal (MPa)	Tensão Normal longitudinal Face Externa (MPa)	Tensão Normal longitudinal Face interna (MPa)
5	452,37	412,51	437,11
10	450,95	412,50	437,16
15	448,66	412,48	437,19
20	450,96	412,40	437,28
25	457,26	412,16	437,38
30	463,05	412,04	437,55
35	461,75	411,77	437,70
40	465,95	411,47	437,89
45	467,93	411,02	438,08
50	467,25	410,56	438,31
55	464,51	410,05	438,56
60	462,09	409,46	438,85

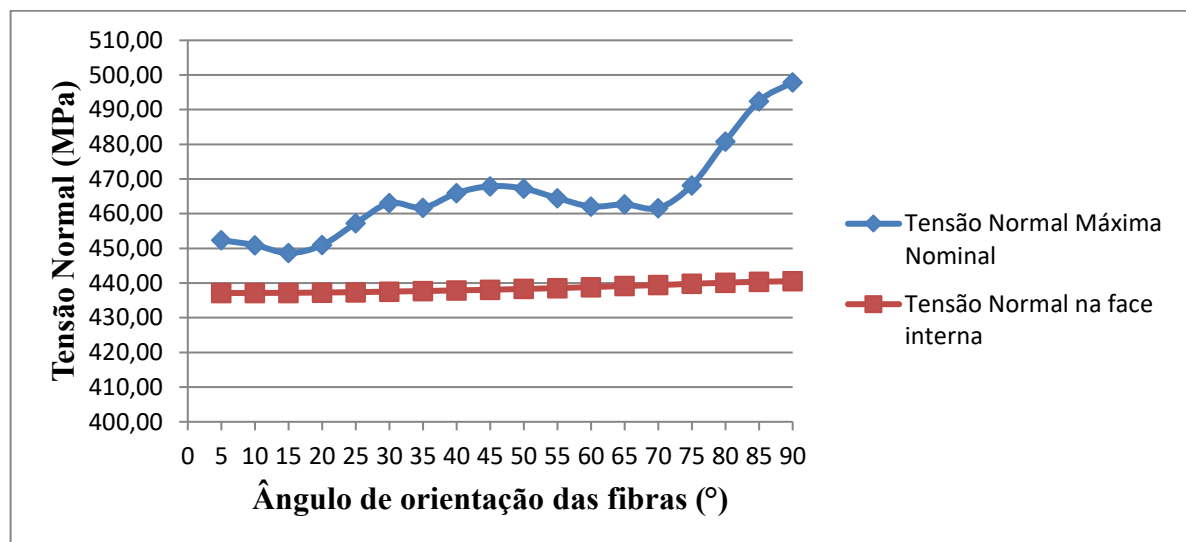
Tabela 5– Distribuição de tensão normal longitudinal para sequência simétrica.

(conclusão)

Ângulo (°)	Tensão Normal longitudinal Máxima nominal (MPa)	Tensão Normal longitudinal Face Externa (MPa)	Tensão Normal longitudinal Face interna (MPa)
65	462,68	408,89	439,16
70	461,65	408,44	439,43
75	468,20	407,97	439,79
80	480,83	407,77	440,11
85	492,49	407,03	440,39
90	497,93	407,92	440,54

Fonte: Do autor.

Gráfico 1– Distribuição de tensão para sequência simétrica.



Fonte: Do autor.

Tabela 6 – Distribuição de tensão para sequência assimétrica.

(continua)

Ângulo (°)	Tensão Normal longitudinal Máxima nominal (MPa)	Tensão Normal longitudinal Face Externa (MPa)	Tensão Normal longitudinal Face interna (MPa)
5	452,51	411,68	436,66
10	451,54	411,26	436,87
15	449,90	412,26	437,15
20	449,54	411,56	437,50
25	452,57	411,42	437,71
30	457,68	411,33	438,04
35	456,68	410,94	438,68
40	457,07	410,61	439,01

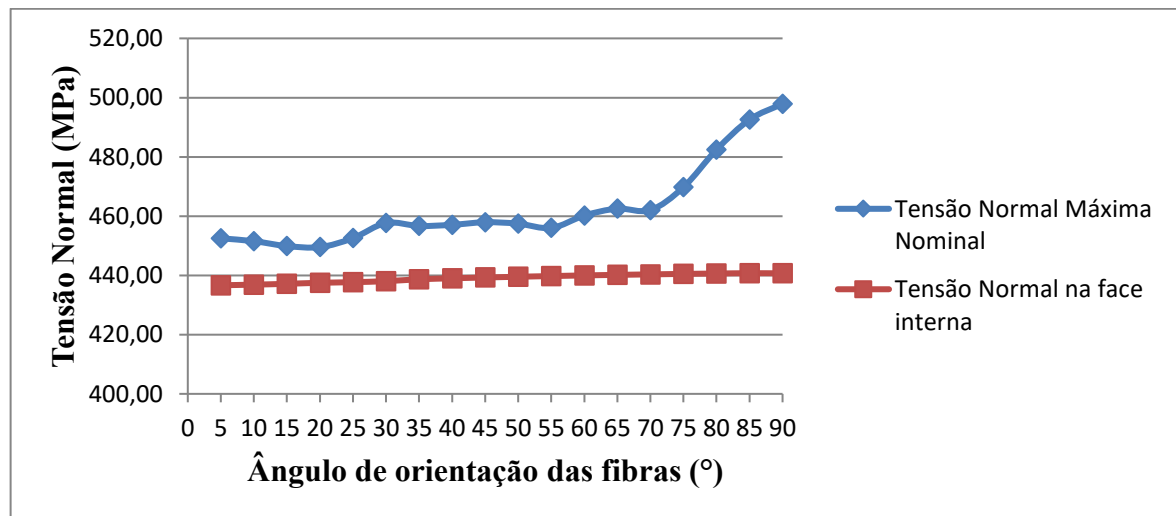
Tabela 6 – Distribuição de tensão para sequência assimétrica.

(conclusão)

Ângulo (°)	Tensão Normal longitudinal Máxima nominal (MPa)	Tensão Normal longitudinal Face Externa (MPa)	Tensão Normal longitudinal Face interna (MPa)
45	457,93	410,21	439,28
50	457,46	409,97	439,54
55	456,02	409,53	439,76
60	460,19	409,22	439,99
65	462,52	408,90	440,17
70	462,05	408,61	440,34
75	469,75	408,31	440,49
80	482,41	408,24	440,63
85	492,56	408,01	440,73
90	497,94	407,88	440,69

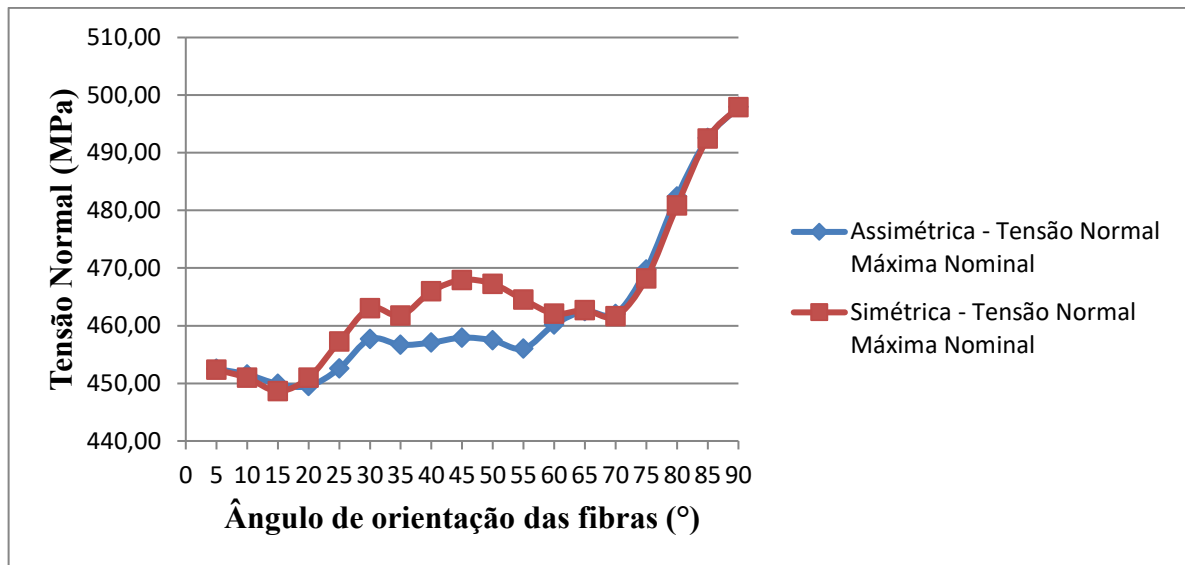
Fonte: Do autor.

Gráfico 2– Distribuição de tensão para sequência assimétrica.



Fonte: Do autor.

Gráfico 3 – Distribuição de tensão para ambas as sequências



Fonte: Do autor.

Analisando os gráficos, tabelas e simulações apresentadas pode-se fazer as seguintes observações:

- A tensão máxima nominal, para ambas as sequências, ocorreu apenas na região próxima do primeiro vínculo (*Displacement*) que foi configurado de forma a impedir o movimento em duas direções.
- Houve uma diferença de aproximadamente 20 MPa entre as tensões observadas na face externa do tubo e as observadas na face interna.
- Em ambos os casos de sequência, as tensões normais observadas no corpo do cilindro não tiveram uma variação acima de 4MPa com a alteração do ângulo das fibras.
- A distribuição de tensão normal na face interna do cilindro mostrou uma ascendência constante. E o maior valor foi obtido no ângulo de 90°, caso em que as fibras estão alinhadas de modo circunferencial.
- O menor valor de tensão máxima foi observado para a orientação de 20° na sequência assimétrica e para a orientação de 15° para a sequência simétrica.

Feitas essas observações, foi calculado o valor da tensão na direção da fibra pela teoria apresentada na Seção 2.2.2 do Capítulo 2 deste trabalho.

O valor obtido para a tensão normal na direção da fibra foi de 424,61 MPa e na direção perpendicular às fibras foi de 225,35 MPa.

Verificou-se que os valores de tensão obtidos através do modelo desenvolvido no ANSYS apresentaram uma margem de erro 3,31% para a sequência assimétrica e de 3,35% para a

sequência simétrica em relação aos valores obtidos utilizando-se das equações da macromecânica de compósitos.

Este trabalho iniciou-se com uma breve revisão bibliográfica para exposição das características, propriedades e aplicações dos materiais compósitos. O objetivo geral esteve fundamentado na apresentação de um estudo sobre vasos de pressão de materiais compósitos bem como uma análise numérica de tensões utilizando o módulo ACP software ANSYS na versão acadêmica.

4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A primeira etapa deste trabalho definiu-se na construção do modelo de cilindro utilizando-se da ferramenta ACP do ANSYS. Foi possível adicionar à biblioteca do programa um material compósito comercial com características e propriedades definidas em catálogos assim como a criação de uma geometria que representasse um vaso de pressão para fins de estudo. O software utilizado também permitiu a configuração das camadas do material de forma que as condições simuladas ficaram satisfatoriamente próximas da situação real.

Foram realizadas 36 simulações, permitindo um estudo detalhado do comportamento do compósito ante o carregamento do cilindro por uma pressão de serviço de 35 MPa. Pode-se comprovar que o material compósito alta resistência quando solicitado na direção das fibras, e quando solicitado na direção perpendicular às fibras possui menor resistência. Validou-se, portanto as proposições teóricas apresentadas no Capítulo 2 deste trabalho, as quais foram referenciadas de grandes autores que realizam importantes estudos neste assunto.

5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para as tensões no vaso de pressão, apresentaram valores analíticos com uma média de margens de erro de 3%, o que foi considerado muito satisfatório indicando que houve sucesso na construção do modelo virtual. A análise de tensões indicou que a orientação de fibras em $\pm 15^\circ$ com uma sequência de empilhamento simétrica resultam na menor tensão normal nominal e que não houve grande variação significativa entre os modelos de sequência simétrica e assimétrica.

Com todo o processo de construção desse trabalho ficou clara a importância e na necessidade de contínuo estudo do material compósito e sua mecânica já que a aplicação do mesmo é crescente em vários segmentos da indústria e promete ser a grande solução para muitos problemas estruturais da atualidade.

Conclui-se, portanto que compósitos possuem amplo leque de aplicação por possuir propriedades superiores as de materiais metálicos ou poliméricos usados convencionalmente. Conclui-se também que a plataforma acadêmica do *software* ANSYS e o módulo ACP cumpriram o objetivo de incentivar o estudo e trazer soluções para problemas mecânicos sem a necessidade de ensaios físicos e destrutivos.

REFERÊNCIAS

- ARALDITE LY 5052: Aradur 5052: data sheet. Disponível em: https://samaro.fr/pdf/FT/Araldite_FT_LY_5052_Aradur_5052_EN.pdf. Acesso em: 29 nov. 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9890-1**: 2015: Cilindro de aço especificado, sem costura, para armazenagem e transporte de gases a alta pressão – especificação. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=3753>. Acesso em: 28 nov. 2018.
- BARBERO, E. J. **Introduction to composite materials design**. New York: Taylor & Francis, 1999.
- CALLISTER JUNIOR, W. D. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- CHANDRUPATLA, T. R. **Elementos finitos**. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.
- FLEISCHER, J. *et al.* Composite materials parts manufacturing. **CIRP Annals 2018 Manufacturing Technology**, Paris, v. 67, n. 2, p. 603-626, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850618301537#preview-section-abstract>. Acesso em: 29 nov. 2018.
- GAY, D.; HOA, S. V.; TSAI, S. W. **Composite materials**: design and applications. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- GONÇALVES, V. P. **Avaliação do comportamento mecânico de tubos compósitos fabricados por enrolamento filamentar submetidos à pressão interna**. 2012. Projeto de Graduação em Engenharia de Materiais – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- GONZÁLEZ C. *et al.* Structural composites for multifunctional applications: current challenges and future trends. **Progress in Materials Science**, Paris, v. 89, p. 194-251, ago. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0079642517300415> Acesso em: 26 nov. 2018.
- GUAMÁ, F. F. M. C. **Análise estrutural de cilindros revestidos de compósitos para armazenamento de GNV**. 2102. Projeto de Graduação em Engenharia Mecânica – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11439:2013**: gas cylinders - high pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/33298.html>. Acesso em: 28 nov. 2018.

LIAO, B.B.; JIA L.Y. Finite element analysis of dynamic responses of composite pressure vessels under low velocity impact by using a three-dimensional laminated media model. **Thin-Walled Structures**, Paris, v. 129, p. 488-501, ago. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026382311731368X> Acesso em: 26 nov. 2018.

MEDHAVI, S.; GARG, R. **Composite pressure vessel: a design & analysis study**. Germany: Greater Noida, Guatam Buddh Technical University, 2012.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos e estruturas-sanduíches: projeto e análise**. Barueri, SP: Manole, 2005.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Bülcher, 2006.

RAFIEE, R.; TORABI, M. A. Stochastic prediction of burst pressure in composite pressure vessels. **Composite Structures**, Paris, v. 185, n.1, p. 573-583, fev. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263822317332415> Acesso em: 28 nov. 2018.

SILVA, R. A. F. **Estudo numérico e experimental visando o desenvolvimento de dutos compósitos submarinos pela técnica de enrolamento filamental**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

TANIGUCHI, H. **Contribuição ao projeto estrutural de cilindros em compósitos para armazenamento de oxigênio sob alta pressão**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2008.

TORAYCA T300. Data sheet. Disponível em: https://www.toraycma.com/file_viewer.php?id=4462. Acesso em: 29 nov. 2018.

YARRAPRAGADA, K. S. S. R.; MOHAN, K. R.; KIRAN, B. V. **Composite pressure vessels**. Andhra Pradesh, India: Mechanical Department, B.V.C College of Engineering, 2012.