

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PROJETO DE HÉLICE EM COMPÓSITO PARA USO EM REBOCADOR EM ESCALA  
REDUZIDA

por

Joshué Pereira Jacques

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Janeiro de 2024

#### CIP - Catalogação na Publicação

Jacques, Joshue Pereira  
PROJETO DE HÉLICE EM COMPÓSITO PARA USO EM  
REBOCADOR EM ESCALA REDUZIDA / Joshue Pereira Jacques.  
-- 2024.  
21 f.  
Orientador: Jakson Manfredini Vassoler.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Análise estrutural. 2. Reforços. 3. Materiais  
compósitos. 4. Impressão 3D. I. Vassoler, Jakson  
Manfredini, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Joshué Pereira Jacques

PROJETO DE HÉLICE EM COMPÓSITO PARA USO EM REBOCADOR EM ESCALA  
REDUZIDA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Jakson Manfredini Vassoler

Comissão de Avaliação:

Prof. Jakson Manfredini Vassoler (Presidente)

Prof. Felipe Tempel Stumpf

Prof. Ignacio Iturrioz

Prof. Arthur Behenck Aramburu

Porto Alegre, Janeiro de 2024

Jacques, Joshué. **Projeto de Hélice em Compósito para Uso em Rebocador em Escala Reduzida**. 2024. 21 páginas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## RESUMO

Materiais termoplásticos têm sido muito utilizados em aplicações de engenharia devido seus custos de fabricação. O uso de técnicas de impressão 3D tem popularizado ainda mais estes materiais, onde é possível que o seu uso possa ser combinado com reforços para melhorar suas características mecânicas. Porém, em muitas aplicações, como aquelas de projetos em escala reduzida, não há evidências que o uso de diferentes técnicas traga melhorias consideráveis frente a complexidade que os reforços podem trazer em sua incorporação. A maioria destas aplicações são feitas de formas empíricas sem avaliações adequadas.

Assim, este trabalho traz um estudo numérico comparativo entre métodos de fabricação de uma hélice para rebocador em escala reduzida, partindo de uma hélice projetada pela equipe Nautilus, da Escola de Engenharia da UFRGS. São feitas análises numéricas de três modelos de hélice com características de fabricação diferentes, que combinam PLA fabricado por impressão 3D, compósito laminado de fibra de vidro e compósito de fibras curtas dispersas. Os modelos foram desenvolvidos e sujeitos a esforços de operação estimados, e então se analisou a resposta mecânica e o comportamento dos diferentes materiais diante critérios de falha particulares. Os resultados indicam que para a construção com compósitos laminados e de fibras curtas existem ganhos em uma ordem de magnitude de rigidez, porém, o material de impressão por si só já seria capaz de atender aos requisitos estáticos aqui estudados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise estrutural, Reforços; Materiais compósito, Impressão 3D.

Jacques, Joshué, **Design of a Composite Propeller for a Small-Scale Tugboat**. 2024. 21 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

## ABSTRACT

Thermoplastic materials have been widely used in engineering applications due to their manufacturing costs. The use of 3D printing techniques has further popularized these materials, since they can be combined with reinforcements to improve their mechanical characteristics. However, in many applications, such as those involving small-scale projects, there is no evidence that the use of different techniques brings considerable improvements given the complexity that reinforcements can bring when incorporated. Most of these applications are done empirically without proper evaluation.

This paper presents a comparative numerical study of manufacturing methods for a reduced-scale tugboat propeller, based on a propeller designed by the Nautilus team from the UFRGS School of Engineering. Numerical analyses are made of three propeller models with different manufacturing characteristics, combining 3D printed PLA, laminated fiberglass composite and dispersed short fiber composite. The models were developed and subjected to estimated operating stresses, and then the mechanical response and behavior of the different materials were analyzed in the face of particular failure criteria. The results indicate that for laminated and short fiber composites there are gains of one order of magnitude in stiffness, but the printing material alone would already be able to meet the static requirements studied here.

**KEYWORDS:** Structure analysis 1, Reinforcements, Composite materials, 3D printing.

## NOMENCLATURA

### Símbolos

$E$	Módulo de elasticidade	[Pa]
$G$	Módulo de cisalhamento	[Pa]
$L$	Comprimento das fibras	
$L_t$	Comprimento crítico das fibras	
$V$	Razão mássica de matriz	
$\nu$	Coefficiente de Poisson entre os sentidos transversal e longitudinal do compósito	
$\sigma$	Tensão máxima	[Pa]
$\sigma_m^*$	Tensão na matriz na deformação máxima suportada pela fibra	[Pa]
$\beta$	Eficiência de reforço da fibra	
$\tau_{12}$	Tensão cisalhante no plano x-y	[Pa]
$\tau_{23}$	Tensão cisalhante no plano y-z	[Pa]
$\tau_{31}$	Tensão cisalhante no plano x-z	[Pa]

### Abreviaturas e acrônimos

PLA	Ácido Polilático
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno

### Subscritos e sobreescritos

1	No sentido longitudinal
2	No sentido Transversal
12	No plano x-y
23	No plano y-z
13	No plano x-z
3D	Propriedade homogênea no volume
$f$	Relativo às fibras
$m$	Relativo à matriz
$T$	Tração
$C$	Compressão

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. HÉLICES PARA EMBARCAÇÕES .....	1
3. MATERIAIS COMPÓSITOS .....	2
4. CRITÉRIOS DE FALHA.....	3
5. MÉTODOS DE FABRICAÇÃO.....	3
5.1 MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA PARA LAMINADO.....	3
5.2 Prensagem de preforma .....	5
5.3 DEPOSIÇÃO DE FILAMENTO PARA FABRICAÇÃO DE HÉLICES .....	5
6. METODOLOGIA.....	5
6.1 CARGAS.....	6
6.1 MODELO EM PLA .....	6
6.2 MODELO EM PLA E LAMINADO .....	7
6.3 MODELO EM COMPÓSITO DE FIBRAS CURTAS.....	7
7. ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	8
7.1 DESLOCAMENTO .....	8
7.2 FALHA DOS MATERIAIS LAMINADOS .....	8
7.3 FALHA NO PLA .....	8
7.4 FALHA NO COMPÓSITO DE FIBRAS CURTAS.....	9
8. CONCLUSÃO.....	10
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	11
10. APÊNDICE .....	13

## 1. INTRODUÇÃO

O projeto de uma hélice é um desafio instigante onde é necessário combinar resistência mecânica, funcionalidade e viabilidade de fabricação. A Escola de Engenharia da UFRGS proporciona a seus alunos a possibilidade de participar do desenvolvimento de um projeto náutico (Equipe Nautilus do programa MOVE), que tem como objetivo projetar, construir e testar rebocadores em escala reduzida, com controle e sensoriamento remotos. Tal projeto está inserido no contexto de uma competição universitária realizada anualmente na qual a Equipe Nautilus representa a Escola de Engenharia da UFRGS. Os alunos participantes são envolvidos no projeto do sistema de propulsão, hidrodinâmica, controle e fabricação das estruturas do barco.

Visando a facilidade de prototipagem e redução de custos, atualmente a impressão 3D tem ganhado impulso para fabricação das hélices, principalmente com filamento de PLA. Esse método de fabricação tem problemas inerentes ao próprio uso de materiais poliméricos, quanto ao processo de fabricação que pode, por exemplo, ter a presença de ranhuras na superfície, que aumentam significativamente a rugosidade, e também a fragilidade da peça, especialmente no sentido vertical de impressão. O projeto da disposição do material e possibilidade de incluir reforços também são fatores que podem levar a melhoria da funcionalidade por meio da maior resistência mecânica, porém, estes devem ser corretamente avaliados uma vez que envolvem um aumento de complexidade no processo de fabricação e elevação de custos.

Assim, o principal objetivo deste trabalho é realizar um estudo numérico da rigidez e resistência mecânica promovido por diferentes métodos de fabricação viável de uma hélice da embarcação da equipe Nautilus, testando o uso de materiais compósitos como reforços. Notáveis pela sua baixa densidade e alta resistência mecânica, eles são alternativas promissoras para a construção de estruturas de alto desempenho. Ainda assim, há métodos que apresentam custo relativamente baixo, exigência de poucas ferramentas e oferecendo boa confiabilidade.

## 2. HÉLICES PARA EMBARCAÇÕES

Inúmeros estudos fundamentam a importância da geometria de uma hélice no seu desempenho e integridade: HANSON (1994) relaciona variações do ângulo de ataque de hélices com instabilidade no carregamento das pás, o que pode gerar perda de eficiência e vibrações severas. KUIPER (1998) indica que vibrações da hélice e a geometria do bordo de ataque e de saída são grandes responsáveis por vários tipos de cavitação, que comprometem a estrutura da hélice e também afetam a eficiência. Assim, a estrutura, além de resistir aos esforços, precisa ter alta rigidez. O modelo de hélice utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 1.

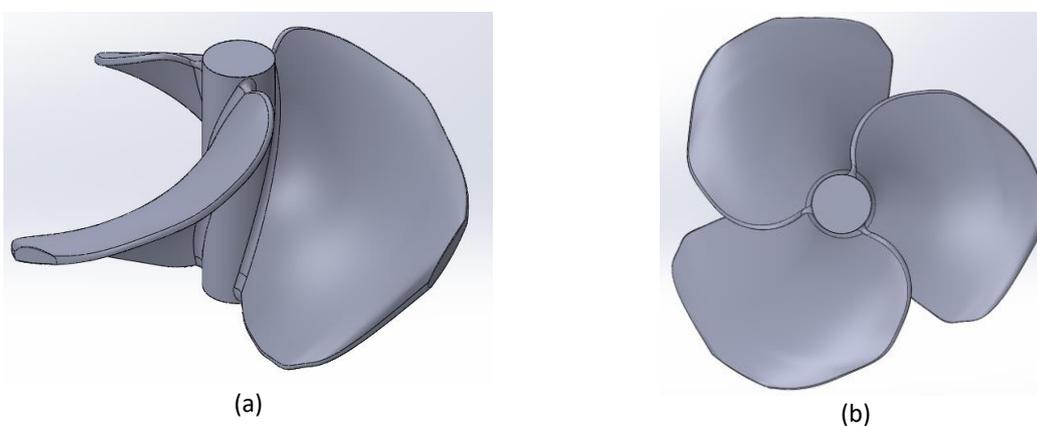


Figura 1: Modelo de hélice desenvolvido pela equipe Nautilus, em vista isométrica (a) e superior (b).

Conforme observado na Figura 1, as hélices são estruturas delgadas que podem apresentar baixa rigidez frente a alguns esforços. Para motivos de comparação, a pá de uma hélice tipicamente usada na competição possui comprimento de 34mm, e espessura entre 0,7mm e 3mm. Tal geometria leva a consideração do uso de materiais compósitos para melhorar suas características mecânicas

### 3. MATERIAIS COMPÓSITOS

Segundo Kaw (1997), o uso de materiais compósitos remete às origens da civilização, como a construção de paredes de barro com palha por diversas civilizações, a fabricação de estruturas de lâminas de madeira coladas, e até mesmo a construção de armas com metais laminados há milhares de anos. Todavia, o uso de compósitos modernos na indústria só se tornou expressivo no século XX, onde compósitos de resina reforçados com fibra de vidro foram adotados pela indústria naval e aérea. Na década de 1970, materiais mais refinados como carbono, boro aramidas, matrizes metálicas e cerâmicas, trouxeram aplicações mais complexas em diversos campos da engenharia.

Materiais compósitos são resultado da combinação, em escala macroscópica, entre dois ou mais constituintes insolúveis entre si. Em muitas vezes seu uso é mais vantajoso do que os metais devido à boa relação entre peso e resistência obtida e à possibilidade de melhor definir a anisotropia das peças projetadas, eles se tornaram uma ferramenta ímpar para projetos de alto desempenho (KAW, 1997).

A matriz de um compósito é a fase contínua que une as fibras ou partículas dispersas. Normalmente ela possui propriedades mecânicas inferiores às do reforço, mas ela tem grande influência nas propriedades do compósito. Suas funções principais são distribuir de forma mais homogênea os esforços na fase dispersa, protegê-la de intempéries e danos de manuseio, reduzir danos como delaminação e propagação de trincas, e contribuir para propriedades que normalmente são de importância secundária: Para compósitos com o reforços como fibra de vidro ou de carbono, a ductilidade da matriz pode proporcionar um compósito mais tenaz; Para compósitos laminados a matriz é mais influente nas características transversais às direções da fibra e no comportamento sob compressão e cisalhamento (KAW, 1997).

Alguns dos principais materiais usados como matriz em compósitos para finalidade naval, onde a resistência a água aumenta a durabilidade da hélice, são as resinas termorrígidas Epóxi e Éster-vinílica. Segundo estudo conduzido por Colclough (1983), hélices fabricadas com resina Epóxi não apresentaram redução nas propriedades mecânicas após longos períodos de exposição a água. Um estudo de Fontoura (2009) conclui que o uso de resina éster-vinílica no projeto de uma hélice naval apresenta pouca redução de propriedades mecânicas após exposição a água.

O componente de reforço pode ser constituído de material particulado, fibras curtas ou longas. Para aplicações com resinas termofixas é mais comum o uso de fibras, que são encontradas com diversos comprimentos de fio e arranjos. Em aplicações que buscam um componente isotrópico é comum o uso de fibras curtas (picadas), pois a dispersão delas na matriz de forma aleatória tende a distribuir de forma homogênea a resistência mecânica, dependendo do processo de fabricação.

O tecido de fibras permitem obter características mais vantajosas do que com o uso de fibras unidirecionais. Ao comparar, por exemplo, um laminado de camadas unidirecionais e uma lâmina de tecido com tramas a 0° e 90°, o laminado sofre esforços interlaminares, que podem acarretar delaminação, enquanto na lâmina de tecido esse risco é mitigado devido às fibras estarem entrelaçadas. O manuseio dos tecidos também é facilitado devido ao

entrelaçamento pois reduz o risco de separação das fibras, enquanto as fibras unidirecionais são comercializadas com um fio auxiliar.

A vantagem principal em trabalhar com materiais compósitos está em poder aproveitar as melhores qualidades de um (ou mais) materiais, combinando-os no componente final. Todavia, o projetista precisa ter boa estimativa das propriedades ao desenvolver um compósito para não desperdiçar tempo nem recurso em excessivos testes. Os conhecimentos de micromecânica são utilizados, nesse escopo, para prever de forma o comportamento elástico, higroscópico e a resistência do compósito desejado, considerando as características dos materiais individualmente e a proporção de cada um no compósito.

A interface entre fibra e matriz possui propriedades muito heterogêneas, que tornariam o modelamento matemático inviável. A análise micromecânica permite que uma lâmina seja assumida como um material homogêneo, todavia abarca algumas hipóteses simplificadoras, como a adesão perfeita entre as fases, distribuição uniforme de fibras (e, portanto, de propriedades), paralelismo entre as fibras, ausência de vazios e comportamento elástico totalmente linear. Tais hipóteses fazem parte das bases para o desenvolvimento das equações de teorias estruturais para materiais compósitos, como a Teoria Clássica dos Laminados, que podem ser resolvidas de forma analítica (OVEN, 1997) ou numérica (YU, 2020).

#### **4. CRITÉRIOS DE FALHA**

Falhas em compósitos não necessariamente indicam o rompimento do material, ou algum indício aparente. Uma redução no desempenho já pode indicar falhas microscópicas que podem ocorrer de diversas formas: fratura de fibras, trincas na matriz, descolamento de fibras da matriz, separação de lâminas de um laminado.

Há vários mecanismos pelos quais pode ocorrer falha, considerando a geometria de cada lâmina e o carregamento sustentado por ela. De forma simples, a falha em lâminas segue os mesmos critérios que se usa para materiais isotrópicos, onde se limitam os esforços normais e cisalhantes, e se define um envelope permissível de carregamento.

Existem diferentes critérios de falha para aplicações em diferentes materiais. Por exemplo, Oliveira (2023) propõe utilizar o critério de falha de von Mises na análise de PLA impresso, assumindo-o como isotrópico. Tsai (1980) considera que um compósito de fibras curtas com distribuição aleatória espacial possui comportamento isotrópico. O Critério de Hoffman, que é uma modificação do critério de Tsai-Hill, que por sua vez adota o critério de energia distorcional, como em von Mises, pode ser utilizado para lâminas unidirecionais, ou seja, materiais transversalmente isotrópicos, como uma lâmina de compósito unidirecional. Todavia, o critério de Tsai-Hill não distingue tensões trativas e compressivas, o que o torna inadequado para analisar esforços e estruturas mais complexas (KAW, 1997).

O critério de Hoffman distingue as tensões trativas e compressivas, o que o torna mais adequado para modelos complexos, cujos carregamentos envolvem tração e compressão (MIRA, 2013).

#### **5. MÉTODOS DE FABRICAÇÃO**

##### **5.1 MOLDAGEM POR TRANSFERÊNCIA DE RESINA PARA LAMINADO**

A moldagem por transferência de resina é mais adequada que a laminação manual pois permite um melhor controle do excesso de matriz e reduz a existência de vazios, além de possibilitar a criação de um molde que abarca todos os lados da peça. Ainda assim, apresenta baixo custo quando comparado aos métodos de filament winding, que requer o uso de máquinas especiais, ou a laminação com tecido pré-impregnado, que necessita

acondicionamento especial dos rolos de material. Essas características tornam a infusão a vácuo mais adequada para a aplicação no grupo Nautilus, trazendo mais liberdade para o Design e mantendo um relativo baixo custo em matéria prima e equipamentos.

Esse método se baseia em posicionar as fibras secas em um molde que serve como um caminho fechado para a passagem da resina. Cria-se uma diferença de pressão ao longo desse caminho, que conecta o reservatório de resina com um ponto de saída, fazendo a resina ser transportada permeando todas as fibras, e fazendo com que o produto final mantenha a geometria definida pelo molde.

O design do molde nesse método pode utilizar uma bolsa plástica para confinar o material contra o molde rígido, mantendo-o pressionado durante a cura, conforme representado na Figura 2. Desde 2002 esse método é utilizado pela Nakashima Propeller Company para a fabricação de hélices de grandes embarcações (Figura 3). Segundo relatório do órgão regulatório Nippon Kaiji Kyokai (2023), o produto reduz as vibrações, é mais leve e tem reparo mais fácil em comparação com hélices fabricadas em metal, e vem tendo grande aceitação e diversificação das classes de embarcação atendidas.

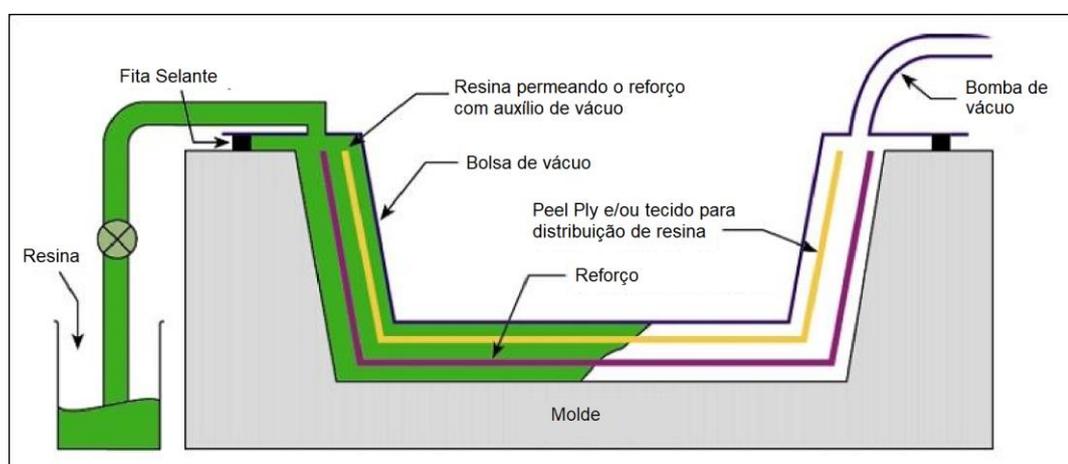


Figura 2: Esquema representativo do método de moldagem por transferência de resina. Adaptado de [https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/assets/pdf/katsudou201511\\_D.pdf](https://www.classnk.or.jp/classnk-rd/assets/pdf/katsudou201511_D.pdf)



Figura 3: Hélice construído pelo método de moldagem por transferência de resina. Adaptado de <https://www.nakashima.co.jp/eng/product/cfrp.html>

Todavia, como a película não é um limite rígido para a peça, a geometria pode ser afetada pela diferença de espessura na borda de cada camada de fibras. A espessura de cada camada

varia entre 0,1mm a 1mm, o que não é um problema para uma hélice de dimensões reais como a mostrada anteriormente, mas para um projeto de nautimodelismo o fator de escala torna essa diferença significativa para o escoamento e, portanto, o desempenho da hélice.

Considera-se mais apropriado para esse caso, usar um molde rígido que delimita toda a superfície da hélice. Isso permite melhor definir o acabamento da superfície no processo de moldagem por transferência de resina. Fontoura (2009) utilizou esse método, fabricando um molde bipartido usinado em poliuretano, e obtendo resultados satisfatórios de acabamento superficial (Figura 4).

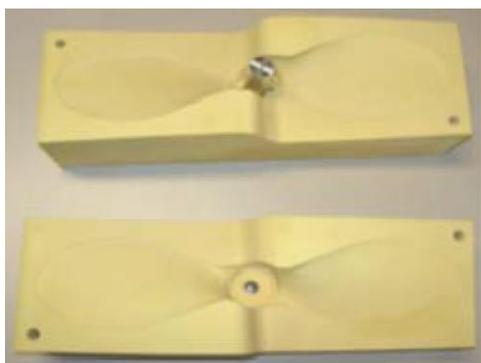


Figura 4: Molde bipartido para fabricação de hélice. Adaptado de Fontoura (2009)

## 5.2 PRENSAGEM DE PREFORMA

Esse método utiliza um molde que permitam a compressão do material contido nele. Coloca-se a preforma (fibras e matriz já misturadas) manualmente dentro do molde e se comprime a preforma durante o tempo de cura da matriz (DANTAS, 1992). Compósitos de fibras curtas dispersas fabricados por compressão podem adquirir características de isometria planar (em sentido normal à direção de compressão) ou isometria espacial, dependendo da razão de compactação do volume da preforma (CASARIL, 2007).

## 5.3 DEPOSIÇÃO DE FILAMENTO PARA FABRICAÇÃO DE HÉLICES

Esse método de fabricação, conhecido normalmente por impressão 3D é muito popular devido ao baixo custo, agilidade e a exigência de pouco espaço e ferramentas. Podem ser produzidas peças de vários polímeros termoplásticos como PLA, ABS, Poliamida. Há possibilidade de fabricação com filamentos que contém fibras dispersas, ou até a deposição de um feixe de fibras contínuo impregnado em matriz, mas esses equipamentos e materiais são significativamente mais caros.

A impressão 3D consiste em extrudar um filamento por um bico aquecido e depositá-lo, em camadas, em perfis pré-determinados que formarão a peça final. Há problemas inerentes a esse processo que devem ser considerados: a resistência mecânica do filamento depositado é maior no sentido longitudinal do que no transversal, que é a adesão entre diferentes camadas ou linhas do filamento, gerando um componente anisotrópico, conforme Gusberti (2019). Esta técnica permite obter uma hélice a partir de um volume pré-definido, que pode ser posteriormente reforçado com fibra, laminando uma camada de tecido unidirecional ou bidirecional.

## 6. METODOLOGIA

Os modelos tridimensionais do volume da hélice foram criados em Solidworks, baseados em uma hélice desenvolvida pela equipe do Nautilus. Foram comparados um modelo fabricado por impressão 3D, outro com núcleo impresso em PLA e reforço de compósito, e um

totalmente fabricado de compósito de fibras curtas. A comparação do comportamento da hélice fabricada por estas três diferentes formas foi realizada com o método de elementos finitos, usando o módulo ACP do software ANSYS para modelamento do laminado. As propriedades dos compósitos foram obtidas com uso do software Mech-G Comp.

### 6.1 CARGAS

Os esforços considerados no projeto de uma hélice de escala real envolvem gravidade, força centrífuga e cargas hidrodinâmicas. Os esforços são complexos e em uma análise mecânica mais avançada poderiam considerar até mesmo fenômenos de cavitação, erosão, fadiga e outros problemas, de acordo com Yu (2020). O projeto de hélices poderia iniciar por simulações de dinâmica de fluidos, mas para este trabalho foi considerada uma simplificação desses esforços baseado em Yu (2020), onde é analisada a distribuição de pressões em uma hélice de geometria típica e a região onde a pressão é significativamente maior, que é a região do bordo de ataque da hélice. Assim, para este trabalho os esforços foram simplificados em uma força axial em uma região circular próxima ao bordo de ataque, conforme a Figura 5. A carga assumida é de 10N.

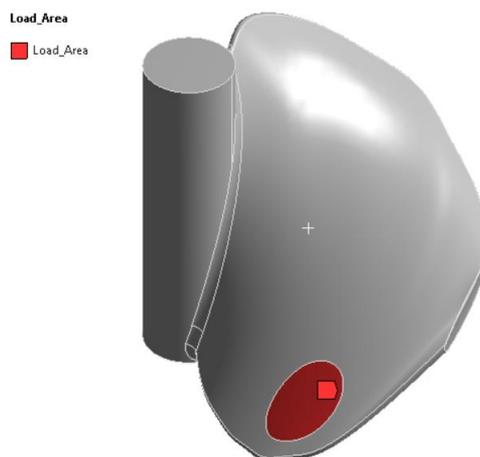


Figura 5: Representação da região de carregamento dos modelos de hélice.

### 6.1 MODELO EM PLA

A hélice usada atualmente pela equipe do Nautilus é feita por impressão 3D em PLA, sem reforço. O modelo simulado neste trabalho teve suas propriedades de material baseadas em Gusberti (2019), onde os corpos de prova foram impressos com velocidade de 20mm/s e sem ventilação, o que condiz com a impressão das hélices fabricadas pela equipe Nautilus. Ele também conclui que a impressão nessas condições permite dar ao material uma característica isotrópica. Os dados de resistência mecânica obtidos estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de resistência mecânica do PLA impresso, conforme Gusberti( 2019)

	E [MPa]	Tensão de Escoamento [MPa]	Deformação Máxima [%]
Sentido Longitudinal	3250	49	1,51
Sentido Transversal	3350	48	1,43

Apesar da proximidade dos dados obtidos nessa análise, o PLA foi descrito no Ansys como um material com isotropia planar, tendo as propriedades longitudinais no plano da mesa de impressão e as propriedades transversais no plano vertical à mesa.

## 6.2 MODELO EM PLA E LAMINADO

Optou-se por estudar um modelo com reforço com laminação em fibra de vidro ao redor de um núcleo de PLA impresso. A Laminação em torno de um núcleo menos resistente é prática comum, vide McCarthy et al (1994), trazendo alívio de peso em regiões menos requisitadas e auxiliando a fabricar geometrias complexas com mais precisão. O formato do núcleo permite acomodar duas lâminas na face de maior pressão e uma na face de menor pressão, mantendo a geometria externa da hélice. As características mecânicas do material do núcleo (PLA) são iguais às descritas na seção anterior. A laminação foi modelada com base nos dados de fibra de vidro unidirecional Gevetex 21x43 e resina éster-vinílica do software Mech-G Comp, desenvolvido pelo Laboratório de Materiais Poliméricos da UFRGS.

Neste trabalho as lâminas foram alinhadas na direção o centro de apoio da hélice e o local de aplicação de carga, como é representado na Figura 6: Representação da direção de laminação. Nesta análise assume-se que essa é a direção que melhor aproveita a resistência do laminado.

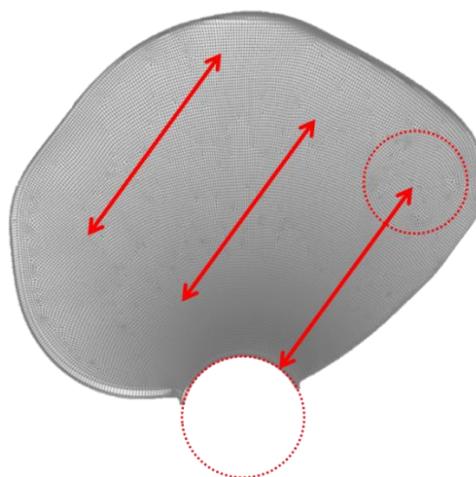


Figura 6: Representação da direção de laminação

A obtenção das propriedades das lâminas de compósito segue a Lei das Misturas, pela abordagem de resistência dos materiais para fibras isotrópicas em de arranjo unidimensional. Considerou-se a proporção de volumétrica de 70% de fibra e 30% de resina.

## 6.3 MODELO EM COMPÓSITO DE FIBRAS CURTAS

Uma segunda variação constitutiva com a mesma proporção de fibras foi estudada, porém consistindo de reforço por fibras curtas (picadas), que seria condizente com uma prensagem com baixa compactação pois o fechamento do molde visa somente a preservação da geometria externa da hélice. No cálculo das propriedades foram consideradas fibras com comprimento de 1mm e diâmetro de 10 $\mu$ m.

Segundo Casaril (2007 apud AL-QURESHI, 1988) e Wolff (2004), as propriedades de um compósito de fibras curtas podem ser obtidas através de adaptações da lei das misturas. Tsai (1980) considera que, para um compósito de fibras distribuídas aleatoriamente no volume, se pode usar as equações de Halpin Tsai para obtenção das propriedades elásticas.

A estimativa de falha desse tipo de compósito ainda carece de métodos mais acessíveis. Dong et al (1997), por exemplo, propõe um método que permite prever com boa aproximação a falha de compósitos de fibras curtas. esse método usa modelos estatísticos baseados em testes experimentais, e não será abordado neste trabalho. Todavia é possível estimar o valor de tensão máxima suportada, como feito por Casaril (2007), utilizando a equação de Matthews e Rawlings (1999). O valor de tensão máxima suportada por meio dessa equação é 251MPa.

## 7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 7.1 DESLOCAMENTO

Na Tabela 2 estão organizados os valores de deslocamento máximo das hélices. Nas três hélices esses deslocamentos ocorreram na ponta do bordo de ataque. Estes resultados têm relação direta com a rigidez das hélices.

Tabela 2: Valores de deslocamento máximo das hélices.

	PLA	PLA com reforço	Fibras Dispersas
Deslocamento [mm]	0,22	0,06	0,02

A análise de deslocamentos dos três modelos aponta o uso de reforços por fibras aumentou a rigidez global em uma ordem de grandeza, porém, não atingiram valores que possam ser considerados críticos. O próprio processo de impressão 3D possui uma tolerância em torno de 0,4mm em impressoras comuns, que supera os deslocamentos encontrados. Essa tolerância é inerente à hélice de PLA, e estaria presente na construção de um molde para as outras duas hélices. Assim, a análise dos deslocamentos indica que não haverá uma mudança geométrica significativa a ponto de levar a variações do ângulo de ataque de hélices e perda de eficiência.

### 7.2 FALHA DOS MATERIAIS LAMINADOS

Considerando o critério de falha de Hoffman, as lâminas superiores e a inferior não apresentam risco de falha. A Figura 7 mostra a análise de falha nas duas partes do reforço.

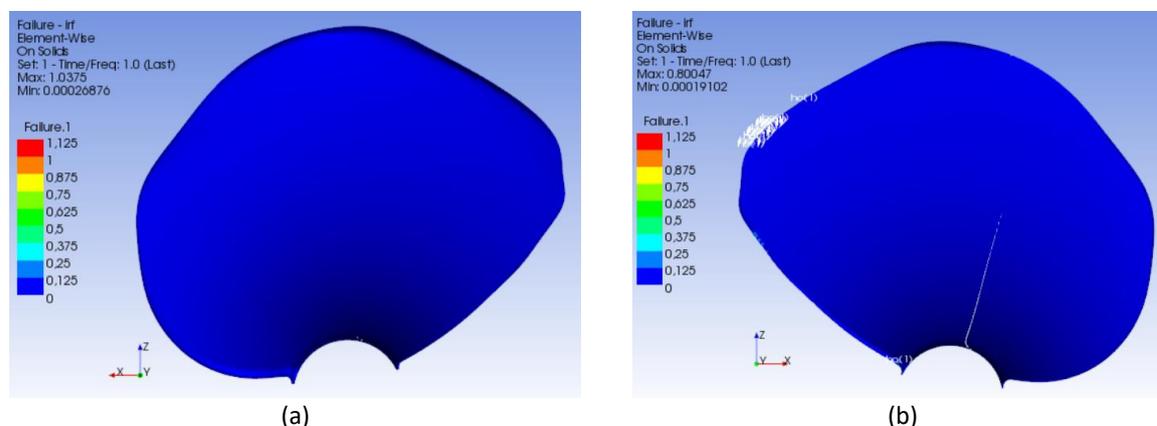


Figura 7: Análise de falha pelo critério de Hoffman na parte superior (a) e inferior (b)

Percebe-se que o modelo numérico aponta um local com o critério de segurança acima de 1, porém isso é interpretado como um problema de malha. A geometria da superfície do laminado é feita a partir da superfície da hélice, sofrendo um “offset” para compensar a espessura. Essa manipulação gerou alguns pontos instáveis na malha, e acarretou em concentradores de tensão que não condizem com uma hélice real.

### 7.3 FALHA NO PLA

Considerando o critério de falha de von Mises, a hélice feita totalmente em PLA (Figura 8) e o núcleo de PLA da hélice reforçada (Figura 9) não apresentam risco de falha, pois em nenhum dos modelos a tensão equivalente supera as tensões encontradas por Gusberti (2019).

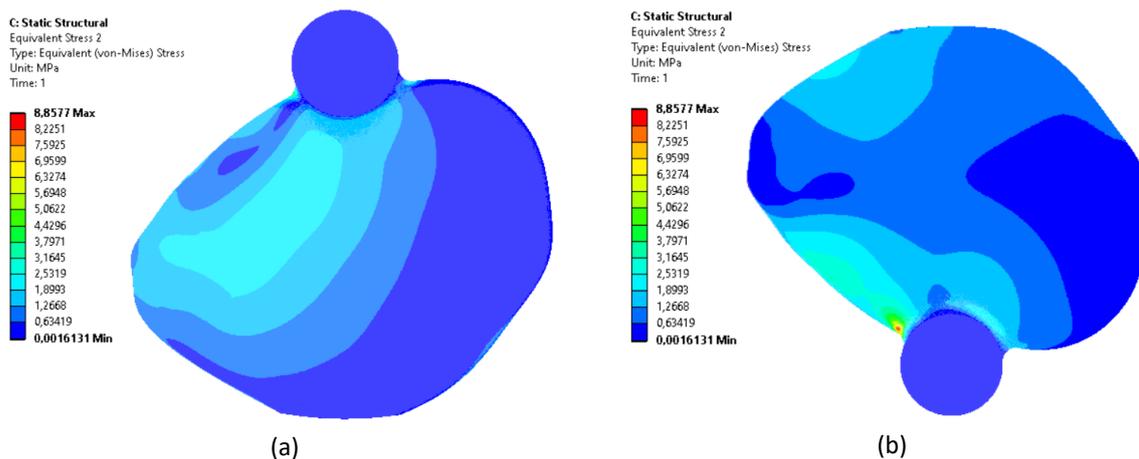


Figura 8: Análise de falha pelo critério de von Mises na hélice de PLA, nas partes superior (a) e inferior (b)

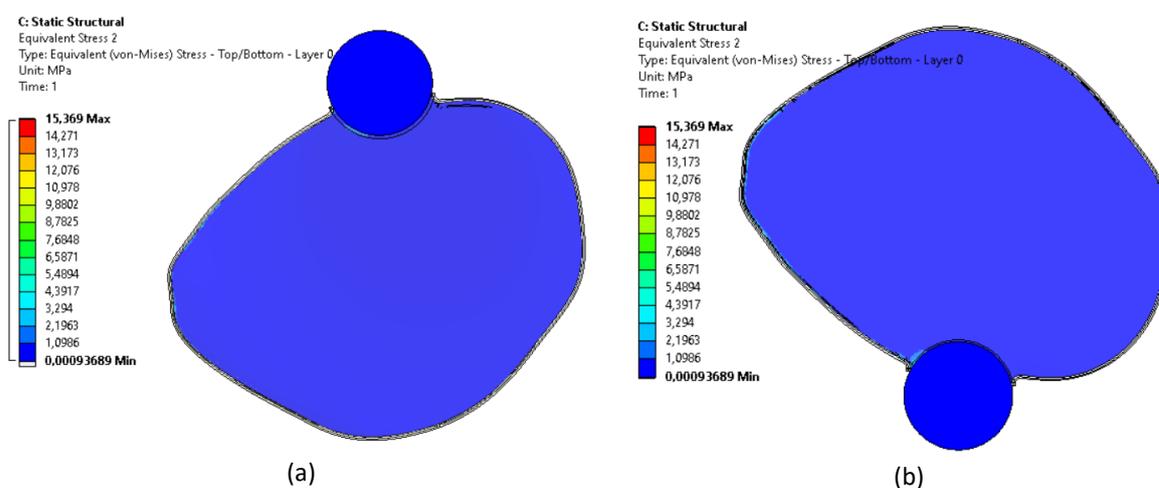


Figura 9: Análise de falha pelo critério de von Mises no núcleo de PLA nas partes superior (a) e inferior (b)

#### 7.4 FALHA NO COMPÓSITO DE FIBRAS CURTAS

Pela análise das tensões equivalentes de von Mises, representada na Figura 10, não há risco de falha. A tensão calculada de 251MPa é muito superior à tensão atingida, inferior a 9MPa.

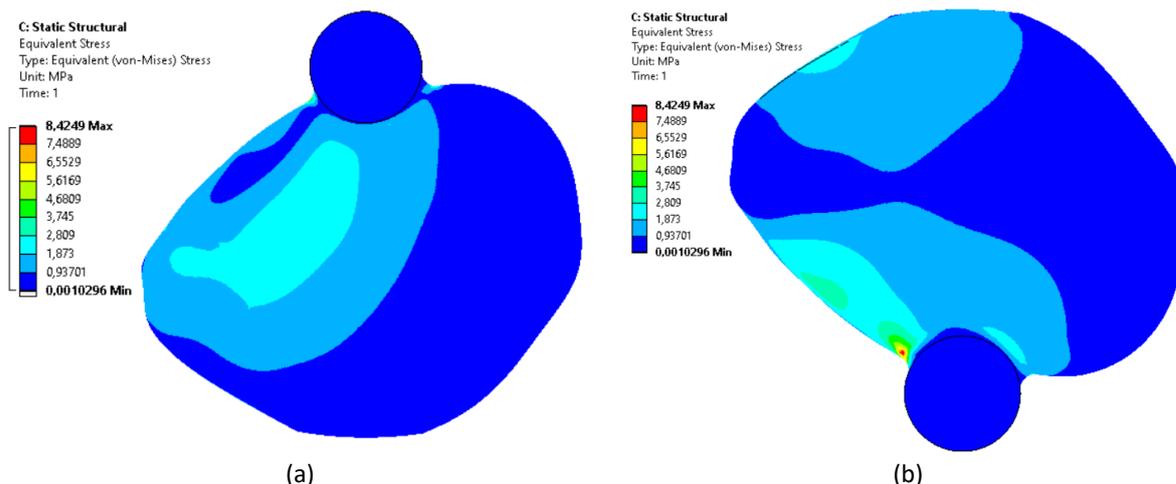


Figura 10: Análise das tensões equivalentes de von Mises na hélice de compósito de fibras curtas nas partes superior (a) e inferior (b)

## 8. CONCLUSÃO

A metodologia proposta permitiu obter resultados para comparar técnicas de fabricação mecanicamente diferentes em uma aplicação de hélice usada pela equipe Nautilus frente a um carregamento equivalente quase-estático obtido de literatura.

Foram apresentados três modelos representativos da hélice com intuito de estudar os possíveis ganhos em rigidez e resistência, que poderiam ser proporcionados pelo uso de compósitos. A resposta entre os deslocamentos desses modelos, sob os mesmos esforços, indica melhora significativa com os materiais alternativos, porém não suficientes para justificar a incorporação de materiais compósitos que elevariam consideravelmente o custo e complexidade da fabricação no caso dos reforços. Os resultados de tensões também indicam que o PLA, apenas, possui capacidade para resistir aos esforços.

Este trabalho destaca que a análise computacional de materiais compósitos, especialmente os de fibras curtas, pode atingir resultados de maior credibilidade quando aliada a experimentos, ensaios de corpos de prova e boa interpretação dos métodos de fabricação. O montante de dados disponíveis sobre o comportamento de compósitos de fibras curtas ainda é escasso devido à complexidade da distribuição e direção das fibras, que ocorre em peças fabricadas pelos métodos mais comuns.

Para estudo futuros recomenda-se realizar o estudo de fenômenos relacionados a instabilidades de interações fluido-estrutura, que necessita análises específicas, e não era do escopo deste trabalho, porém pode ser importante para um projeto mais confiável. Tal fenômeno pode levar a necessidade de incorporar reforços, mesmo que a análise por sobrecarga não tenha tido tal indicação.

Por fim, conclui-se que o uso de modelamento de elementos finitos pode trazer informações valiosas para o projeto de estruturas complexas, como as hélices de material compósito.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-QURESHI, H.A., *Composite Materials: Fabrication and Analysis*, 3ª Edição, ITA, 1988.

CASARIL, A.; GOMES, E.; SOARES, M.; FREDEL, M.; AL-QURESHI, H. **Análise micromecânica dos compósitos com fibras curtas e partículas**. *Revista Matéria*, v. 12, n. 2, pp. 408 – 419, 2007. Disponível em <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10815>.

COLCLOUGH, W.J. "**Environmental Testing for Civil Certificate of Composite Propellers**". *British Aviation Exhibition & Seminar*, Madrid, 1983. Disponível em <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/eb035945/full/html?skipTracking=true>

DANTAS, Francine F. **Desenvolvimento do projeto conceitual de uma prensa para compósitos**. Trabalho desenvolvido para conclusão da graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Espírito Santo, 2022. Disponível em <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/2294>.

DONG, M.; SCHMAUDER, S.; BIDLINGMAIER, T; WANNER, A. **Prediction of the mechanical behavior of short fiber reinforced MMCs by combined cell models**. *Computational Materials Science*, Volume 9, 1997,pg. 121-133. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025697000669>.

FONTOURA, Cláudia Moreira da. **Desenvolvimento De Hélice De Material Compósito Polimérico Utilizando a Moldagem Por Transferência De Resina**. Trabalho desenvolvido para conclusão da graduação em Química Industrial. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. Disponível em [https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS\\_67bc6839834ba9e1755801fb00acc630](https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/URGS_67bc6839834ba9e1755801fb00acc630)

GUSBERTI, Lucas W.; **Um Estudo Experimental Do Comportamento Mecânico Do PLA Frente Aos Parâmetros Do Processo De Impressão 3D**. Trabalho desenvolvido para conclusão da graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019. Disponível em <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/197461/001097964.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

HANSON, Donald B. **Sound from a propeller at angle of attack: a new theoretical viewpoint**. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 449 p., 315 - 328, 1995. Disponível em <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rspa.1995.0046>. Acesso em 25/01/2024

KAW, Autar K.; **Mechanics of Composite Materials**. CRC Press, 1ª edição, 1997.

KUIPER, G. **Cavitation Research and Ship Propeller Design**. *Flow, Turbulence and Combustion* **58**, 33–50 (1997). Disponível em <https://doi.org/10.1023/A:1000754928962>.

MATTHEWS, F.L.; RAWLINGS, R.D. **Composite Materials**. Engineering and Science, 1<sup>a</sup> ed., Woodhead Publishing, 1999. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/book/9781855734739/composite-materials?via=ihub=>.

MCCARTHY, R.F.J; HAINES, G.H.; NEWLY, R.A. **Polymer composite applications to aerospace equipment**. Composites Manufacturing, Volume 5, Volume 2, 1994, Pages 83-93. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0956714394900590>.

MIRA, Diego G. M.; **Análise estrutural da longarina de asa em material compósito em uma aeronave não tripulada**. Trabalho desenvolvido para conclusão da graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/76035?show=full>

Nakashima Propeller Company. **Benefits of Carbon Composite Marine Propeller**. Disponível em [http://classnk-rd.com/pdf/katsudou201511\\_D.pdf](http://classnk-rd.com/pdf/katsudou201511_D.pdf)

OLIVEIRA, Sanches I.; **Desenvolvimento de filamentos para impressão 3D (de hélices de drones) a partir de nanocompósitos poliméricos Poli (ácido láctico) e Nanotubo de carbono**. Trabalho desenvolvido para conclusão da pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Amazonas, 2023. Disponível em <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9920>

OVEN, V.A.; BURGESS, I.W.; PLANK, R.J.; ABDUL WALI, A.A. **An analytical model for the analysis of composite beams with partial interaction**. Computers & Structures, Volume 62, 1997, p. 493-504. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045794997800012>.

TSAI, Stephen W.; HAHN, Thomas H. **Introduction to Composite Materials**. Technomic Pub. Co., 1980. Disponível em [https://www.researchgate.net/profile/Mahsa\\_Jahani2/post/How\\_do\\_you\\_obtain\\_calculate\\_stiffness\\_degradation\\_and\\_viscoelastic\\_response\\_of\\_a\\_composite\\_material/attachment/59d6227a79197b8077980cbc/AS:302153485225993@1449050412897/download/Introduction+to+Composite+Materials-Tsai.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Mahsa_Jahani2/post/How_do_you_obtain_calculate_stiffness_degradation_and_viscoelastic_response_of_a_composite_material/attachment/59d6227a79197b8077980cbc/AS:302153485225993@1449050412897/download/Introduction+to+Composite+Materials-Tsai.pdf).

YU, Kai; YAN, Peikai; HU, Jian. **Numerical Analysis of Blade Stress of Marine Propellers**. J. Marine. Sci. Appl. 19, 436-443, 2020. Disponível em <https://link.springer.com/article/10.1007/s11804-020-00161-3#citeas>.

WOLFF, Ernest G. **Introduction to the Dimensional Stability of Composite Materials**. DEStech Publications, Lancaster, 2004. Disponível em <https://app.knovel.com/kn/resources/kpIDSCM00B/toc>

## 10. APÊNDICE

Equações utilizadas para obtenção das propriedades dos compósitos laminados. A partir da lei das misturas (KAW, 1997).

$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (1)$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{12,f} V_f + \nu_m V_m \quad (2)$$

$$\frac{1}{E_2} = \frac{V_f}{E_{2,f}} + \frac{V_m}{E_m} \quad (3)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_{12,f}} + \frac{V_m}{G_m} \quad (4)$$

$$\frac{1}{G_{13}} = \frac{V_f}{G_{13,f}} + \frac{V_m}{G_m} \quad (5)$$

$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1} \quad (6)$$

Tensão máxima de tração, proposta por Matthews e Rawlings (1999).

$$\sigma_1^T = \sigma_{1,f}^T V_f + \sigma_m^* V_m \quad (7)$$

$$\sigma_m^* = \frac{\sigma_{max,f}}{E_f} E_m$$

$$\sigma_2^T = \left[ 1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \left( 1 - \frac{E_m}{E_{2,f}} \right) \right] \sigma_m \quad (8)$$

$$\sigma_1^C = V_f \sigma_{1,f}^C \quad (9)$$

$$\sigma_2^C = \left[ 1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \left( 1 - \frac{E_m}{E_{2,f}} \right) \right] \sigma_m \quad (10)$$

$$\tau_{12} = \left[ 1 - (\sqrt{V_f} - V_f) \left( 1 - \frac{G_m}{G_{12,f}} \right) \right] \tau_m \quad (11)$$

Equações utilizadas para obtenção das propriedades de compósitos de fibras curtas. Conforme proposto por Wolff (2004).

$$E_{3D} = \frac{1}{5} E_1 + \frac{4}{5} E_2 \quad (12)$$

Onde:

$$E_1 = E_{1,f} \left( 1 - \frac{\tanh\left(\frac{\eta l}{2}\right)}{\frac{\eta l}{2}} \right) V_f + E_m V_m$$

$$\eta = \left( \frac{8\pi G_m}{E_{1,f} \pi D^2 \ln\left(\frac{2R}{D}\right)} \right)^{1/2}$$

$$R = D \left( \frac{\pi}{2V_f \sqrt{3}} \right)^{1/2}$$

$$E_2 = E_m \left( \frac{1+2\eta_2 V_f}{1-2\eta_2 V_f} \right)$$

$$\eta_2 = \frac{\left(\frac{E_{1,f}}{E_m}\right)^{-1}}{\left(\frac{E_{1,f}}{E_m}\right)^{+2}}$$

$$\nu = \frac{E_{3D}}{2G} - 1 \quad (13)$$

Tensão máxima de tração, proposta por Matthews e Rawlings (1999).

$$\sigma^T = \beta E_f \frac{\sigma_m}{E_m} V_f \left( 1 - \frac{L_t}{L} \right) + V_m \sigma_m \quad (14)$$

Equação utilizada para obtenção de tensão equivalente de Von Mises.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{31}^2)}{2}} \quad (15)$$

Equação utilizada para obtenção do valor do critério de Hoffman.

$$C_1(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + C_2(\sigma_3 - \sigma_1)^2 + C_2(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + C_3\sigma_1 + C_4\sigma_2 + C_4\sigma_3 + C_5\tau_{23}^2 + C_6\tau_{13}^2 + C_7\tau_{12}^2 \leq 1 \quad (16)$$

Onde;

$$C_1 = \frac{1}{2} \left[ \frac{2}{\sigma_2^T \sigma_2^C} - \frac{1}{\sigma_1^T \sigma_1^C} \right]$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\sigma_1^T \sigma_1^C} \right]$$

$$C_3 = \left[ \frac{1}{\sigma_1^T} - \frac{1}{\sigma_1^C} \right]$$

$$C_4 = \left[ \frac{1}{\sigma_2^T} - \frac{1}{\sigma_2^C} \right]$$

$$C_5 = \frac{1}{\tau_{23}^2}$$

$$C_6 = \frac{1}{\tau_{13}^2}$$

$$C_7 = \frac{1}{\tau_{12}^2}$$

Os dados da Fibra de vidro Gevetex 21x43, da resina éster vinílica, dos compósitos analisados e do PLA estão dispostos nas tabelas 3 a 7.

Tabela 3: Propriedades da fibra de vidro Gevetex 21x43.

Propriedade	Valor
$E_1, E_2 [Pa]$	8e+10
$G_{12}, G_{23} [Pa]$	3,33e+10
$\nu_{12}, \nu_{23}$	0,2
$\sigma^T [Pa]$	2,15e+9
$\sigma^C [Pa]$	1,45e+9

Tabela 4: Propriedades da resina éster-vinílica.

Propriedade	Valor
$E [Pa]$	3,45e+9
$G [Pa]$	1,17e+9
$\nu$	0,38
$\sigma^T [Pa]$	7,58e+7
$\sigma^C [Pa]$	3,72e+8
$\tau [Pa]$	1,56e+8

Tabela 5: Propriedades do compósito laminado unidirecional.

Propriedade	Valor
$E_1 [Pa]$	5,703E+10
$E_2 [Pa]$	1,044E+10
$G_{12} [Pa]$	3,611E+09
$\nu_{12}, \nu_{13}$	0,254
$\nu_{21}$	0,047
$\sigma_1^T [Pa]$	2,51E+08
$\sigma_2^T [Pa]$	2,219E+07
$\sigma_1^C [Pa]$	1,015E+09
$\sigma_2^C [Pa]$	3,238E+08
$\tau_{12} [Pa]$	1,359E+08

Tabela 6: Propriedades do compósito de fibras dispersas.

Propriedade	Valor
$E [Pa]$	2,71e+10
$\nu$	0,395
$\sigma^T [Pa]$	2,51e+8

Tabela 7: Propriedades do PLA, adaptado de Gusberti (2019).

Propriedade	Valor
$E_1 [Pa]$	3,25e+9
$E_2, E_3 [Pa]$	3,35e+9
$\nu$	0,35
$G [Pa]$	1e+9
$\sigma^T [Pa]$	4,8e+7