

Investigação das propriedades mecânicas de laminados compósitos aplicados na indústria eólica: Impacto da infusão a vácuo, temperatura de transição vítrea e outros parâmetros

Investigation of the mechanical properties of composite laminates applied in the wind industry: Impact of vacuum infusion, glass transition temperature and other parameters

Investigación de las propiedades mecánicas de laminados compuestos aplicados en la industria eólica: Impacto de la infusión al vacío, temperatura de transición vítrea y otros parámetros

Recebido: 19/02/2024 | Revisado: 26/02/2024 | Aceitado: 27/02/2024 | Publicado: 29/02/2024

Brendo Rodrigues Garcia

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4916-6529>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: brendo.rodrigues30@gmail.com

Lutero Carmo de Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7313-729X>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: luterodelima@gmail.com

Elissandro Monteiro do Sacramento

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4808-7224>
Instituto Federal do Ceará, Brasil
E-mail: elissandro.monteiro@ifce.edu.br

Mauro Andres Cerra Florez

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0336-8463>
Universidade Federal do Ceará, Brasil
E-mail: mauro.cerra@ufc.br

José Maurício da Silva Ferreira

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1313-1451>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: jmauricio.f01@gmail.com

Mayara Oliveira Fonseca

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9288-0386>
Universidade Estadual do Ceará, Brasil
E-mail: mayara10fonseca@gmail.com

Resumo

Este estudo buscou analisar o impacto da orientação do ângulo da fibra de vidro e da temperatura de transição vítrea na resistência à ruptura em laminados produzidos por infusão a vácuo e laminação manual. A resina foi impregnada nos tecidos de fibra de vidro, e a temperatura de cura foi ambiente, determinada pela característica da resina durante o pico exotérmico. Os laminados foram fabricados com orientação 0°, tanto por infusão a vácuo quanto por laminação manual. Os testes de tração, conforme a norma ISO 527-5, foram realizados para avaliar a resistência longitudinal dos laminados. Os resultados mostraram que o laminado unidirecional (UD) produzido por laminação manual superou o laminado de mesmo tecido, mas com processo de fabricação por infusão a vácuo. Em particular, o laminado UD - Manual apresentou uma resistência 57,77% superior ao equivalente feito por infusão a vácuo. O estudo concluiu que, apesar das expectativas teóricas baseadas em testes de calcinação e dureza, a temperatura de transição vítrea foi o parâmetro dominante na resistência do laminado. Os resultados práticos indicaram que laminados produzidos por laminação manual, especialmente com orientação unidirecional a 0°, demonstraram maior resistência à ruptura em comparação com os laminados equivalentes produzidos por infusão a vácuo.

Palavras-chave: Energia eólica; Compósitos; Temperatura de transição vítrea; Infusão a vácuo; Laminação manual.

Abstract

This study sought to analyze the impact of glass fiber angle orientation and glass transition temperature on tear strength in laminates produced by vacuum infusion and manual lamination. The resin was impregnated into the fiberglass fabrics, and the curing temperature was ambient, determined by the characteristic of the resin during the exothermic peak. The laminates were manufactured with a 0° orientation, both by vacuum infusion and manual lamination. Tensile tests, in accordance with ISO 527-5, were carried out to evaluate the longitudinal strength of the laminates. The results showed that the unidirectional (UD) laminate produced by manual lamination outperformed the

laminate of the same fabric, but with a vacuum infusion manufacturing process. In particular, the UD - Manual laminate presented a resistance 57.77% higher than the equivalent made by vacuum infusion. The study concluded that, despite theoretical expectations based on calcination and hardness tests, the glass transition temperature was the dominant parameter in laminate strength. Practical results indicated that laminates produced by manual rolling, especially with unidirectional orientation at 0°, demonstrated greater resistance to rupture compared to equivalent laminates produced by vacuum infusion.

Keywords: Wind energy; Composites; Glass transition temperature; Vacuum infusion; Manual lamination.

Resumen

Este estudio buscó analizar el impacto de la orientación del ángulo de la fibra de vidrio y la temperatura de transición vítrea sobre la resistencia al desgarro en laminados producidos por infusión al vacío y laminación manual. La resina se impregnó en los tejidos de fibra de vidrio y la temperatura de curado fue la ambiente, determinada por las características de la resina durante el pico exotérmico. Los laminados se fabricaron con orientación 0°, tanto por infusión al vacío como por laminación manual. Se realizaron ensayos de tracción, de acuerdo con la norma ISO 527-5, para evaluar la resistencia longitudinal de los laminados. Los resultados mostraron que el laminado unidireccional (UD) producido mediante laminación manual superó al laminado del mismo tejido, pero con un proceso de fabricación por infusión al vacío. En particular, el laminado UD - Manual presentó una resistencia un 57,77% superior al equivalente elaborado por infusión al vacío. El estudio concluyó que, a pesar de las expectativas teóricas basadas en pruebas de calcinación y dureza, la temperatura de transición vítrea era el parámetro dominante en la resistencia del laminado. Los resultados prácticos indicaron que los laminados producidos por laminado manual, especialmente con orientación unidireccional a 0°, demostraron una mayor resistencia a la ruptura en comparación con laminados equivalentes producidos por infusión al vacío.

Palabras clave: Energía eólica; Compuestos; Temperatura de transición del vidrio; Infusión al vacío; Laminación manual.

1. Introdução

A energia proveniente dos ventos vem sendo utilizada pela humanidade há mais de 3000 anos. Podemos considerar que as primeiras utilizações foram em embarcações no qual tinham as velas que captavam o vento e transformavam aquela energia em energia cinética, sendo possível movimentar a embarcação, o que impulsiona o desenvolvimento das negociações de mercadorias e a exploração de novos continentes.

Essa tecnologia teve grande influência no surgimento dos moinhos de vento do tipo vela, que era de eixo vertical. De acordo com Marques (2004), o primeiro moinho de vento foi desenvolvido na Mesopotâmia por volta de 1700 a.C. e o sistema empregava um eixo vertical para bombear água. Posteriormente surgiu na Pérsia os primeiros moinhos de vento para automatizar tarefas como moer grãos e bombear água.

Posteriormente surgiram outras aplicações para o bombeamento de água como os cataventos que são utilizados até os dias atuais, os mesmos consistem em um conjunto de pás geralmente metálicas e giram no sentido vertical para aproveitar o vento da melhor forma possível seja qual for sua direção. Existem diversas empresas especializadas na fabricação e comércio desses equipamentos.

De acordo com Heinrich (2010), os cata-ventos com eixo horizontal foram introduzidos na Europa no século XII. Até a invenção do motor a combustão, as rodas de água e os cata-ventos foram as únicas fontes de energia mecânica com potências entre 5 e 10 HP. Mesmo com estes potenciais relativamente baixos, eles desempenharam um importante papel até o século XIX no desenvolvimento do continente europeu, sendo utilizados principalmente para moer grãos, bombear água, extrair óleo, serrar madeira e várias outras funções a que este equipamento podia ser agregado.

De acordo com Cleveland (2004), a utilização de aerogeradores para prover energia elétrica tem sua origem documentada no início do século 20, em várias regiões da Europa. Grande parte dessa utilização é atribuída ao fornecimento de energia restrito da época, pois em comunidades isoladas dificilmente se tinha o fornecimento de energia e conseqüentemente afetando o desenvolvimento da região. Então, a partir disso, desenvolveu-se geradores capazes de suprir a necessidade do fornecimento de energia em locais mais isolados. Com essa possibilidade de energia independente da rede convencional, foi gerado desenvolvimento dessas comunidades, pois regiões que sequer tinham energia passaram a ter a autonomia parcial e/ou

total gerando desenvolvimento. De acordo com Bretschneider (2018), essas máquinas utilizavam uma construção similar aos mecanismos das velas navais que eram compostas por estruturas de madeira e tecido compondo uma superfície capaz de captar o ar.

De acordo com HAU (2006), na década de 30 eram comuns geradores horizontais em fazendas nos Estados Unidos, esses geradores eram compostos por pás de metal. Na década de 40 em diversos pontos da Europa os aerogeradores já geravam energia em conjunto com a rede.

Após o fim da segunda guerra mundial, tivemos uma intensificação na utilização de combustíveis fósseis e no final da década de 70 tivemos a crise dos combustíveis fósseis. Com a iminência de novas crises, movimentos criados em prol da sustentabilidade incentivaram o investimento em novas tecnologias de energias renováveis, uma vez que até então não dispúnhamos de aerogeradores com capacidade significativa de geração de energia.

Para o desenvolvimento de aerogeradores de grandes dimensões, um grande obstáculo foi a influência do peso no desempenho do sistema como um todo, pois se as pás do rotor fossem feitas de metal, a resistência, flexibilidade e peso não ajudaria na eficiência e capacidade de geração de energia. Principalmente no final da década de 70 e durante a década de 80 foram realizados diversos investimentos em pesquisa para a evolução da energia eólica. Tivemos o fortalecimento da empresa *Vestas* que de acordo com a *Mapfre Global Risks* foi eleita a maior fabricante de aerogeradores do mundo em 2018, em 1984 tivemos a criação da *Enercon* e assim o mercado foi ficando aquecido e a evolução das máquinas com o passar dos anos foi acontecendo de forma exponencial.

A evolução da potência das máquinas e do tamanho das pás está ocorrendo da seguinte forma de acordo com Kumaran (2017):

- 1980 - 1990: máquinas com 75 kW e pás com 8,5 m;
- 1990 - 1995: máquinas com 300 kW e pás com 15 m;
- 1995 - 2000: máquinas com 750 kW e pás com 25 m;
- 2000 - 2005: máquinas com 1500 kW e pás com 35 m;
- 2005 - 2010: máquinas com 1800 kW e pás com 40 m;
- 2010 - 2015: máquinas com 3000 kW e pás com 50 m;
- 2015 - 2020: máquinas com 5000 kW e pás com 62,5 m;
- Estimativa dos anos seguintes: máquinas com 10000 kW de potência e pás com 75 m.

Já no ano de 2021 a fabricante de aerogeradores *Siemens Gamesa* já disponibiliza para o mercado a máquina SG 5.8-170, que tem potência nominal de 6200 kW e pás com 85m de comprimento, comprovando novamente a significativa evolução do setor.

Percebe-se claramente a evolução da capacidade de geração dos aerogeradores e em paralelo o crescimento também do tamanho das pás. Um exemplo disso é o modelo de pá E44 com 44 metros de diâmetro de rotor da fabricante Alemã *Enercon*, uma das maiores fabricantes do mundo, a mesma gera uma potência de 900 kW, mas em comparativo com o modelo E92 que tem um diâmetro de rotor de 92 metros, é gerado uma potência de 2350 kW, ou seja, percebe-se a evolução da capacidade de geração ao longo dos anos e em conjunto com a evolução do tamanho das pás.

Um grande desafio para as indústrias fabricantes de aerogeradores e seus componentes foi encontrar um material com a capacidade de dar flexibilidade, resistência, baixo peso e baixo custo de fabricação. O metal que era utilizado no princípio era incapaz de fornecer todas essas propriedades, pois com quase que a obrigação de maiores potências os tamanhos das pás também iriam evoluir junto. Uma das possibilidades do que poderia ocorrer é que com os diversos ciclos de flexão ao qual uma pá é submetida, se não tiver propriedade mecânica adequada, a pá fabricada em metal poderia acidentalmente atingir a torre e

danificar de forma catastrófica toda a estrutura do aerogerador.

Contudo, não somente a indústria do segmento de eólica como indústria do segmento de aeronáutica geraram grandes desafios no desenvolvimento de materiais inovadores que pudessem aumentar a tecnologia de seus produtos, nesse contexto o desenvolvimento de materiais compósitos evoluiu de maneira significativa na engenharia e ciência dos materiais.

Os compósitos se destacam essencialmente devido fatores econômicos, a exemplo da indústria aeronáutica que utilizando os compósitos obtiveram redução no peso total das aeronaves acarretando uma economia de combustível e implicando em uma maior carga útil (NIU,1992 apud Alves,2019).

Segundo a Associação Latino-americana de Materiais Compósitos (ALMACO), em 2019 o setor brasileiro de compósitos emplacou o terceiro ano seguido de crescimento com faturamento de R\$ 2,8 bilhões. É um setor que vem evoluindo a cada ano que passa, com aplicações em diversas áreas tais como: aeronáutica, eólica, indústria naval.

A matriz energética do Brasil no ano de 2019, de acordo com a ABEE (Associação Brasileira de Energia Eólica), é formada da seguinte forma:

- Hidrelétrica: 98,2 GW, representando 60% da matriz energética;
- Biomassa: 14,8 GW, representando 9% da matriz energética;
- Eólica: 14,8 GW, representando 9% da matriz energética;
- Pequena Central Hidrelétrica e Central Geradora Hidráulica: 5,9GW, representando 4% da matriz energética;
- Fotovoltaica: 1,9 GW, representando 1% da matriz energética;
- Gás Natural: 13,4 GW, representando 8% da matriz energética;
- Petróleo: 8,9 GW, representando 6% da matriz energética;
- Carvão Mineral: 3,3 GW, representando 2% da matriz energética;
- Nuclear: 2 GW, representando 1% da matriz energética;

Atualmente com toda a tecnologia empregada na confecção de pás para aerogeradores foi possível aumentar consideravelmente o tamanho das pás para que assim fosse possível aumentar capacidade de geração de energia.

Porém, a fabricação das pás exige um complexo e preciso processo de fabricação, pois caso ocorra alguma falha durante o andamento do processo de infusão a vácuo, podemos ter dos mais variados problemas tais como: Tecido seco, rugas, não adesão da resina devido a contaminação do tecido de fibra de vidro e geração de bolhas devido ao ar que pode não ter sido retirado da peça.

O estudo focou na influência que se pode ter na resistência a tração do laminado de acordo com a orientação do ângulo de costura da fibra de vidro e a variação da temperatura de transição vítrea e o quanto pode ser influenciado a qualidade do laminado de acordo com o processo de infusão. Os métodos testados foram *VIP* (*Vacuum infusion process* – infusão a vácuo) e *HLU* (*Hand lay up* – Laminação manual). Dessa forma será feito um comparativo de o quão prejudicado ficará a estrutura do laminado em cada uma das situações.

A orientação do ângulo da fibra de vidro utilizada para esse trabalho foi 0°, ou seja, tecidos unidirecionais. Na fabricação de uma pá para aerogerador temos diversos ângulos utilizados nas composições dos tecidos de fibra de vidro e evidentemente cada um tem sua importância na composição e resistência global da estrutura, mas para esse trabalho o estudo vai focar especificamente em apenas um tipo de orientação devido aos custos que acarretariam fazer com todos os tipos de tecido utilizados na fabricação.

A temperatura de transição vítrea é um outro parâmetro importantíssimo para a segurança operacional de toda a estrutura, pois supondo que no local de operação do aerogerador, tenhamos temperatura média de 45 °C, mas durante o funcionamento exigem-se cargas longitudinais superiores a 80.000 kgf, e se curado a temperatura de 50 °C o laminado atingirá

capacidades em torno de 60.000 kgf, claramente é observado que no quesito da temperatura em si, na qual a estrutura muda as suas propriedades não ocorrerá nenhuma falha, porém nessa temperatura, o nível de coesão das moléculas não disponibilizará a resistência suficiente para a estrutura suportar toda a carga.

Este trabalho tem por objetivo analisar a influência do ângulo da fibra de vidro e temperatura de transição vítrea na resistência a tração associado ao processo de infusão de um laminado compósito utilizado em pá eólica por vácuo e laminação manual.

2. Metodologia

Será abordado o principal tipo de aerogerador, como são as estruturas básicas de uma pá eólica, como são os materiais empregados na confecção da pá e alguns testes que são realizados em ambiente fabril para se obter alguns parâmetros essenciais para a determinação da qualidade do laminado fabricado. Após será abordado a metodologia que será aplicada para a realização do trabalho.

2.1 Conceitos básicos de aerogerador

Os aerogeradores de eixo horizontal são baseados nos moinhos de vento, os mesmos possuem um custo mais elevado que o de eixo vertical, porém, tem-se um rendimento muito superior e está submetido a menos esforços e cargas mecânicas. Os aerogeradores de eixo horizontal necessitam de um mecanismo para movimentar a orientação do rotor da máquina com objetivo de sempre estar na frente do vento e assim se obter o máximo possível de energia.

Os aerogeradores de eixo horizontal são baseados nos moinhos de vento, os mesmos possuem um custo mais elevado que o de eixo vertical, porém, tem-se um rendimento muito superior e está submetido a menos esforços e cargas mecânicas.

Podem ser construídos de 1 a 3 pás, porém o mais utilizado é o modelo de 3 pás devido ao equilíbrio e eficiência que é possível conseguir com essa disposição. De acordo com Castro (2005), a turbina de 3 pás é a mais frequentemente encontrada pois constitui um bom compromisso entre coeficiente de potência, custo, velocidade de rotação e uma melhor estética em relação aos modelos de turbina de 2 pás.

2.2 Pá eólica

Pás eólicas são estruturas fabricadas com perfil aerodinâmico com a finalidade de transformar parte da energia cinética que incide da superfície em energia elétrica. De acordo com Cleveland (2004), a utilização de geradores eólicos para prover energia elétrica tem sua origem documentada no início do século 20. Os componentes internos das pás são: *Spar cap* (longarina) e *Web* (alma).

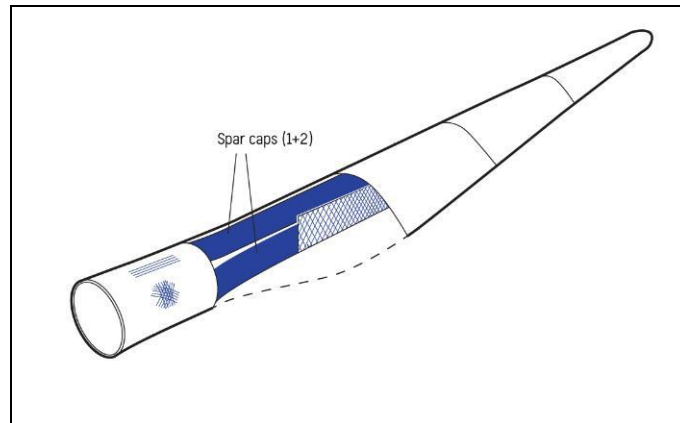
De acordo com HAU (2006), na década de 30 eram comuns geradores horizontais em fazendas nos Estados Unidos, esses geradores eram compostos por pás de metal. Na década de 70 com o desenvolvimento de materiais compósitos, os mesmos passam a integrar a maior parte da fabricação das pás eólicas. Materiais utilizados são fibra de vidro, resina epóxi, madeira e espuma.

2.3 Spar cap - Longarina

A *spar cap* é uma estrutura da pá eólica com a função de dar mais rigidez a estrutura, logo, elas são fabricadas com o ângulo da fibra sempre em um único sentido. A preferência é a utilização da fibra de vidro com a orientação 0°, pois terá resistência maior a tensão longitudinal e suportará mais eficientemente as cargas constantes em direção a ponta da pá.

Esse componente da pá é fabricado de forma separada e depois inserido nas cascas da pá. Na fabricação é utilizado fibra de vidro ou fibra de carbono associado a resina epóxi. Na Figura 1 é possível visualizar a posição da longarina na pá através das duas linhas que são apontadas para esse componente.

Figura 1 – Principais componentes – Longarina.

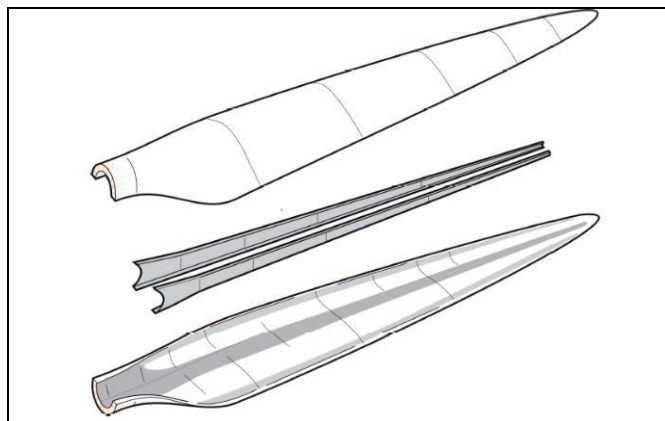


Fonte: Adaptado de KIRT x THOMSEN (2022).

2.4 Web - Alma

As almas têm o propósito de ligar as longarinas superior e inferior criando uma estrutura do tipo viga, no qual as tensões são distribuídas e a rigidez é mantida. Também tem a função de manter a estrutura/geometria da pá eólica. Também existem almas que são coladas em regiões onde não tem longarina, geralmente ficam localizadas nas bordas das cascas para criar uma estrutura tipo viga naquela região e distribuir as tensões, mas essas especificidades variam de projeto e tamanho da pá. Na Figura 2 é mostrado um exemplo de duas almas, uma ao lado da outra.

Figura 2 – Principais componentes – Alma.



Fonte: Adaptado de KIRT x THOMSEN (2022).

2.5 Materiais compósitos

Material compósito tem seu significado voltado para qualquer material multifásico que mostre de maneira significativa a proporção das propriedades de ambas as fases que o compõem, consequentemente obtendo a melhor combinação de propriedades. A partir desse princípio que está apto a ser chamado de ação combinada podem gerar combinações superiores de propriedades, onde são criadas por uma combinação de dois ou mais materiais distintos (Callister, 2012).

No segmento de fabricação de pá eólica, o compósito utilizado é a matriz de resina com o reforço de fibra de vidro. Os compósitos de resina – fibra de vidro se destacam pelo baixo peso, alta flexibilidade, resistência a intempéries e baixo custo.

2.6 Matriz - Resina

A matriz (resina) tem o papel de distribuir os esforços para o reforço, pois de acordo com a ligação que é realizada quimicamente isso se torna possível. De acordo com Moreira (2008), a matriz de um material compósito deve, além de manter a coesão das fibras, garantir as seguintes funções:

- Proteger as fibras do meio envolvente;
- Proteger as fibras do dano durante o manuseamento;
- Distribuir os esforços pela estrutura das fibras;
- Redistribuir os esforços pelas fibras resistentes em caso de ruptura.

2.7 Reforço

De acordo com Moreira (2008), O reforço é o componente descontínuo do material compósito, é, em regra, mais resistente que a matriz e no caso de assumir a forma de fibras permite que o material tenha capacidade de resistência na direção do carregamento. O reforço é a parte do material compósito direcionado para os esforços, no qual a matriz distribuirá as tensões e cargas na estrutura do reforço e ela tem o papel de ter resistência a essas cargas e possibilitar que o material compósito seja utilizado em diversas aplicações. No segmento da energia eólica, os principais reforços utilizados são de fibra de vidro e fibra de carbono. A fibra de carbono é utilizada geralmente em partes que suportam mais cargas e exigem mais reforços, pois além de agregar menos peso, tem uma resistência maior e o fator limitante para não ser utilizado em mais partes da pá é o elevado custo do material.

2.8 Temperatura de transição vítrea – T_g

De acordo com Abreu (2008), a transição vítrea (T_g) pode ser definida como o fenômeno no qual um sólido amorfo exibe uma variação "mais ou menos" abrupta nas derivadas de propriedades termodinâmicas (capacidade calorífica e expansividade térmica), em função da temperatura. O vidro é um produto inorgânico proveniente da fusão que resfriou a uma condição rígida sem cristalizar. A transição vítrea consta como uma mudança reversível em um polímero amorfo ou em regiões amorfas de um polímero parcialmente cristalino com uma condição emborrachada ou viscosa para um material rígido e relativamente frágil. A temperatura de transição vítrea é o ponto médio aproximado da faixa de temperatura sobre a qual a transição vítrea ocorre. (MIL-HDBK-17-3F,2002).

A temperatura de transição vítrea é uma etapa importante do processo de fabricação de uma pá eólica, pois o mesmo tem que estar acima da temperatura ao qual a pá será submetida no parque eólico e determinará o quão coeso estará a estrutura cristalina. Por exemplo, se no momento da fabricação o laminado atinge um T_g de 60 °C, e o local de operação chega a 80 °C, conseqüentemente a temperatura ao qual foi curado o laminado não será o suficiente para resistir a alta temperatura e a estrutura de resina começará a emborrachar podendo ocasionar sérios riscos para a máquina e a estrutura da pá eólica.

2.9 Calcinação

O teste de calcinação de um laminado consiste em descobrir qual a porcentagem de fibra de vidro e de resina existente no laminado. O ideal é que após uma infusão, caso seja a vácuo, deverá conter 70 % de fibra e 30 % de resina, porém, caso seja por laminação manual, deverá conter 50 % de fibra e 50 % de resina.

2.10 Dureza Barcol

De acordo com a Impac instrumentos de medição (2021), a dureza Barcol foi desenvolvida durante a segunda guerra mundial para controle dos rebites dos aviões, pois existia a suspeita de sabotagem desse material. A dureza Barcol tem escala

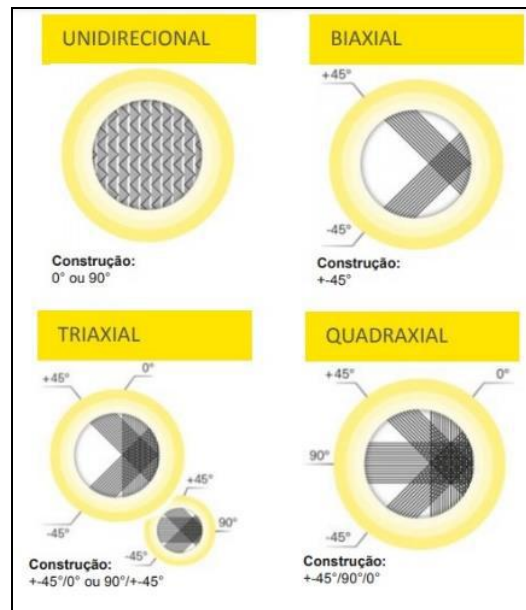
de medição de 0 a 100, sendo quanto mais próximo de 0 menor a dureza e quanto mais próximo de 100 maior a dureza do material. Para laminados de fibra de vidro, geralmente é aceitável um laminado com dureza maior ou igual a 35.

De acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), o valor de dureza é obtido pela medida da resistência à penetração de uma ponta de aço sob uma mola carregada. De acordo com Oliveira (2015), a dureza Barcol pode ser usada como um indicador simples do nível de cura de resinas termorrígidas, podendo servir como um parâmetro de controle de qualidade. Por meio deste ensaio, é possível determinar o tempo mínimo necessário para realizar a desmoldagem de uma peça, por exemplo.

2.11 Fibra de vidro

Tecidos formados de fibra de vidro podem ter os *rovings* (Filamento de fibra de vidro) costurados em diversas direções, os tecidos unidirecionais (UD) têm apenas uma direção, podem possuir orientação 0° ou 90° , é utilizado para aplicações onde exigem alto esforço da estrutura do laminado. Os tecidos biaxiais (Biax) têm duas direções nas suas linhas de costuras, podem possuir orientação $\pm 45^\circ$ ou 0° e 90° . Os tecidos triaxiais (Triax) tem três direções nas suas linhas de costuras, podem possuir orientação 0° e $\pm 45^\circ$ ou 90° e $\pm 45^\circ$. Os tecidos quadriaxiais (quadriax) têm 4 direções nas suas linhas de costura, possuem as orientações 0° , $\pm 45^\circ$ e 90° todas no mesmo tecido. Na Figura 3 é possível ver 4 tipos de orientação de tecidos, sendo eles: unidirecional, biaxial, triaxial e quadriaxial.

Figura 3 – Orientação do ângulo das fibras do tecido.



Fonte: Saertex (2021).

2.12 Laminados

De acordo com Faria (2021), um laminado é constituído por duas ou mais lâminas empilhadas em orientações arbitrárias. A resistência desse laminado dependerá da quantidade de camadas e da orientação, onde quanto mais camadas tiver no laminado, maior será a sua resistência, porém, quanto menor for a quantidade de camadas, menor será a resistência. Se tratando da orientação, ao laminar camadas de tecidos UD 0° , o laminado terá grande resistência no sentido longitudinal, pois todas as fibras estão orientadas em um mesmo sentido, porém no sentido transversal esse mesmo laminado não terá uma resistência tão grande mesmo com um número grande de camadas, então o quão resistente será o laminado dependerá tanto do número de camadas como da orientação das fibras.

2.13 Metodologia aplicada

Serão confeccionados 2 laminados da seguinte forma: um laminado com orientação 0° por infusão a vácuo e um laminado com orientação 0° por laminação manual, após será feito o teste de resistência a tração, temperatura de transição vítrea, dureza Barcol e calcinação. Nenhum laminado será aquecido por algum dispositivo externo.

Nos processos de infusão a vácuo, existe apenas uma máquina utilizada no processo que é a bomba de vácuo, a mesma será responsável por retirar o ar da peça e através da pressão negativa que exerce faz com que a resina percorra o caminho até a entrada onde a bomba é conectada.

A bomba de vácuo utilizada foi a da fabricante *Busch*, modelo R5 RA 0063 F. Essa bomba foi utilizada para o processo de infusão a vácuo do laminado 0°. A bomba executa duas tarefas essenciais no processo, que é a retirada do ar das camadas e auxilia na impregnação da resina no tecido através da pressão negativa.

A mesa para a confecção do laminado foi feita de laminado de fibra de vidro, a mesma suporta elevadas temperaturas sem modificar sua propriedade, além de possibilitar uma boa infusão sem vazamentos nas emendas do plástico devido a sua conformidade da estrutura. A mesma pode ser aquecida através de mantas para que possa aumentar a velocidade da cura da resina e elevar o T_g .

A máquina utilizada para a realização do teste de resistência a tração foi da fabricante *EMIC*, modelo DL-10000, disponibilizada pelo Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da Universidade Federal do Ceará. Na Figura 4 a máquina pode ser visualizada.

Figura 4 – Máquina *EMIC*.



Fonte: Elaborado pelos autores.

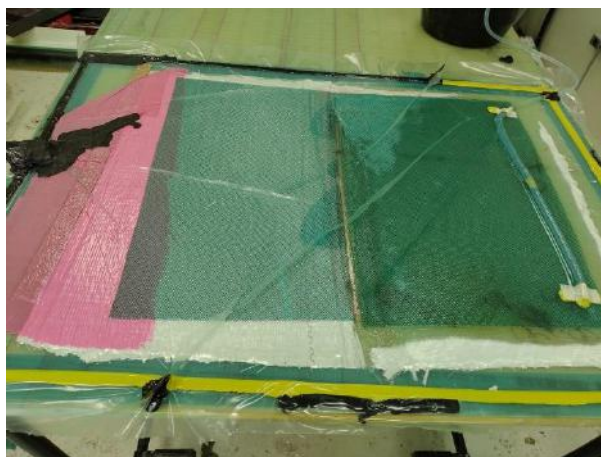
Para a fabricação de um laminado de fibra de vidro através de infusão a vácuo ou laminação manual exige a utilização de vários tipos de materiais desde o material de reforço até o material que ajuda no vácuo e distribuição da resina entre as camadas.

Para a confecção do laminado com sentido unidirecional, foi utilizado o tecido LTx1200/07C01 1200 G/M² UD 0°. Para a matriz no método de infusão a vácuo foi utilizado a resina da fabricante *Hexion*, modelo *EPIKOTE™ Resin MGS™ RIMR035c* e o endurecedor *EPIKURE™ Curing Agent MGS™ RIMH0 038* e para o método de laminação manual foi utilizado a resina do fabricante *Gurit*, modelo *AMPREG™ 30* que tem o mesmo nome para base e endurecedor.

O primeiro laminado a ser fabricado foi pelo processo de infusão a vácuo, o método é complexo, pois envolve muitas variáveis que podem influenciar a qualidade da peça fabricada. Entre os problemas que podem ocorrer, estão: entrada de ar na peça durante a infusão devido a algum vazamento no plástico devido a furo ou vedação, falta de energia no local, ocasionando

o desligamento da bomba de vácuo, falha no plano de infusão ocasionando a não impregnação total das camadas e etc. Na Figura 5, pode ser visualizado o processo em andamento, e os materiais utilizados na seguinte ordem: tecido LTx1200/07C01 1200 G/M² UD 0°, Tela plástica, Nylon rosa, fibra de coco, espiral de plástico, tubo de plástico e fitas de borracha para vedação e resina.

Figura 5 – Processo de infusão a vácuo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Abaixo no Quadro 1, pode ser visualizado cada material utilizado e a sua função no processo de infusão a vácuo.

Quadro 1 - Materiais utilizados para a infusão a vácuo.

Material	Função no processo
Bambam	Fita para selar o plástico de vácuo e impedir que saia ar da peça durante o vácuo.
Tecido de fibra de vidro	Componente principal da peça, responsável por dar resistência a peça.
Plástico perfurado	Isolar a tela do tecido, e ajudar na distribuição de resina.
Tela de plástico	Ajudar da distribuição de resina ao longo da peça.
Fibra de coco	Auxiliar na retirada de ar.
<i>Nylon</i>	Função 1: Após a sua remoção, cria poros na peça. Função 2: pode ser utilizado para auxiliar na retirada de ar da peça.
Material	Função no processo
Plástico de vácuo	Garantir que seja retirado o ar da peça e não entre novamente até que seja retirado
Tubo em formato espiral	Ajuda na retirada de ar ou distribuição de resina
Tubo de plástico	Inserir resina na peça

Fonte: Elaborado pelos autores.

O segundo laminado a ser fabricado foi por laminação manual, um método bem mais simples, no qual não corre nenhum dos riscos citados anteriormente que envolve o processo de infusão a vácuo, porém tem algumas desvantagens como espessura e qualidade que pode ser considerado a porcentagem de fibra para resina contida na estrutura e dureza. Na Figura 6, pode ser visualizado o processo e andamento, e os materiais utilizados foram apenas tecido LTx1200/07C01 1200 G/M² UD 0°, rolo de lã e resina.

Figura 6 – Processo de laminação manual.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Abaixo no Quadro 2, pode ser visualizado cada material utilizado e a sua respectiva função no processo de laminação manual.

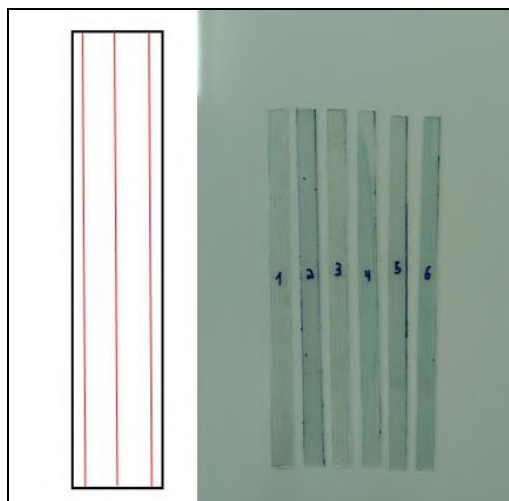
Quadro 2 - Materiais utilizados para laminação manual.

Material	Função no processo
Tecido de fibra de vidro	Componente principal da peça, responsável por dar resistência a peça.
Rolo de lâ	É utilizado para fazer a impregnação da resina no tecido.
Plástico	Utilizado abaixo das camadas para evitar adesão da camada de fibra de vidro na superfície que é utilizada para laminar.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os corpos de prova foram confeccionados conforme norma *ISO-527-5:2009*. Para o laminado UD, foram confeccionadas 12 amostras de 15 mm de largura por 250 mm de comprimento. 6 amostras ficaram de acordo com o sentido global de 0°. Na Figura 7, pode ser visualizado o esquema de corte da amostra, onde a linha vermelha mostra o sentido global da fibra.

Figura 7 – Corpos de prova.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O ensaio de tração mostrará a resistência do laminado a forças longitudinais, ou seja, no sentido global da fibra unidirecional 0°.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) da Universidade Federal do Ceará, o mesmo possui uma máquina de modelo DL-10000, fabricante *EMIC*, suficiente para realizar os ensaios, pois sua capacidade é de 100 KN. A Figura 8 mostra uma amostra no fixador da máquina durante um dos testes.

Figura 8 – Amostra fixada na máquina.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Serão realizadas posteriormente as análises da temperatura de transição vítrea, calcinação e dureza Barcol.

Para determinar a temperatura de transição vítrea (T_g), foi utilizado o método de *DSC* (Calorimetria Exploratória Diferencial). Foi retirada uma amostra de cada laminado garantindo que as amostras não tenham nenhum tipo de contaminação ou sujeira, pois caso exista qualquer tipo de agente contaminante ou outro material impregnado que não seja resina ou fibra de vidro o teste não consegue disponibilizar dados reais da amostra. Na Figura 9, lado esquerdo, podemos ver um exemplo da máquina utilizada.

O teste de calcinação consiste em pesar 2 amostras de 30 cm x 30 cm em uma balança de precisão, em seguida colocá-las em um recipiente que resista a altas temperaturas, colocar o recipiente dentro de uma mufla e por fim aquecer essas amostras a 620 °C por 4 horas. Ao final do tempo de aquecimento, só restará a fibra de vidro, pois toda a resina foi evaporada devido a temperatura dentro da mufla e então é só pesar novamente as amostras e determinar a proporção de fibra x resina no laminado. Para laminados feitos por infusão a vácuo, o percentual recomendado é de 70% de fibra de vidro para 30% de resina e para laminados fabricados por laminação manual, o percentual recomendado é de 50% de fibra de vidro para 50% de resina.

Para determinar a dureza Barcol do laminado, foi utilizado um durômetro portátil digital Barcol. Foram realizadas 10 medições em cada uma das 2 placas de laminados. O método de realização do teste consiste em eliminar a maior medida e a menor medida dentro das 10 medições realizadas e fazer uma média das 8 medidas restantes. Na Figura 9, do lado direito, podemos visualizar o equipamento utilizado.

Figura 9 – Equipamentos DSC e Barcol.



Fonte: Adaptado de *Mettler Toledo* (2021).

3. Resultados e Discussão

Os testes de resistência a tração longitudinal, temperatura de transição vítrea, calcinação e dureza foram todos realizados e registrados em tabelas.

3.1 Dimensões dos corpos de prova

Na Tabela 1 consta as informações referente aos corpos de prova Unidirecionais feitos pelo processo de infusão a vácuo e na Tabela 2 consta os corpos de prova unidirecionais fabricados por laminação manual.

Tabela 1 - Medidas dos corpos de prova unidirecionais – Infusão a vácuo.

Número da amostra	Tipo	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Área [mm ²]
1	UD - Vácuo	251,50	14,80	0,92	231,38
2	UD - Vácuo	249,00	14,54	0,95	236,55
3	UD - Vácuo	251,00	14,95	0,93	233,43
4	UD - Vácuo	249,80	14,60	0,92	229,81
5	UD - Vácuo	249,00	14,90	0,92	229,08
6	UD - Vácuo	249,70	14,90	0,92	229,72

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Tabela 1 dentro do grupo dos tecidos UD - Vácuo, a maior amostra considerando a área foi a de número 2 (236,55 mm²) e a menor foi a número 5 (229,08 mm²).

Tabela 2 - Medidas dos corpos de prova unidirecionais – Laminação manual.

Número da amostra	Tipo	Comprimento [mm]	Largura [mm]	Espessura [mm]	Área [mm ²]
1	UD - Manual	250,50	14,10	1,61	403,30
2	UD - Manual	250,50	14,30	1,58	395,79
3	UD - Manual	250,00	14,45	1,70	425,00
4	UD - Manual	250,00	13,80	1,68	420,00
5	UD - Manual	250,50	14,53	1,61	403,30
6	UD - Manual	250,50	13,54	1,64	410,82

Fonte: Elaborado pelos autores.

Na Tabela 2 dentro do grupo dos tecidos UD - Manual, a maior amostra considerando a área foi a de número 3 (425,00 mm²) e a menor foi a número 2 (395,79 mm²).

3.2 Propriedades mecânicas

Nesse item será explorado as propriedades mecânicas das amostras, tais como: ensaio de tração, temperatura de transição vítrea, calcinação e dureza Barcol.

3.2.1 Ensaio de tração

O ensaio foi conduzido de acordo com a norma *ISO 527-5*, no qual determina no mínimo 5 amostras para cada tipo de teste, mas por segurança o teste foi realizado com 6 amostras, então cada tipo de amostra foi numerado de 1 a 6 para melhor identificação e garantia do teste. As amostras foram inseridas na seguinte ordem: amostras com tecidos unidirecionais com infusão realizada pelo processo de infusão a vácuo e amostras com tecidos unidirecionais com infusão realizada pelo processo de laminação manual.

3.2.1.1 Ensaio de tração do laminado unidirecional – Infusão a vácuo

O software que faz a conexão entre a máquina e o computador indicava em sua tela todas as informações do teste, para os testes dos laminados UD Vácuo o programa informou os dados de ruptura das amostras conforme Tabela 3.

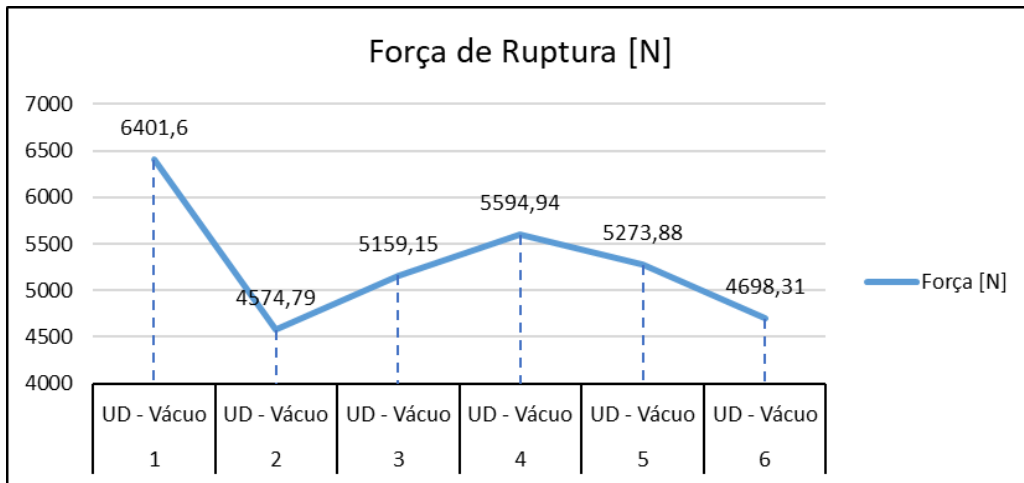
Tabela 3 - Tensões e forças de ruptura das amostras unidirecionais – vácuo.

Número da amostra	Tipo	Área [mm ²]	Força [N]	Tensão [N/mm ²]	Tensão [Mpa]
1	UD - Vácuo	231,38	6401,60	27,66	1,71
2	UD - Vácuo	236,55	4574,79	19,34	1,25
3	UD - Vácuo	233,43	5159,15	22,10	1,37
4	UD - Vácuo	229,81	5594,94	24,34	1,53
5	UD - Vácuo	229,08	5273,88	23,02	1,42
6	UD - Vácuo	229,72	4698,31	20,45	1,26
	Média	-	5283,77	-	1,42

Fonte: Elaborado pelos autores.

Analisando a força de ruptura de acordo com os dados disponíveis na Tabela 3, a amostra 1 obteve a maior força do grupo para o rompimento, sendo necessário 6401,60 N para o rompimento total. A amostra de número 2 que é a de maior área teve a menor força do grupo para rompimento, sendo necessário uma força 4574,79 N para romper a amostra. A amostra número 6 que tem a segunda menor área ficou com o segundo pior desempenho com rompimento em 4698,31 N. A média de força para romper as amostras ficou em 5283,77 N. Os valores relacionados a força obtidos na Tabela 7 com relação as amostras UD VIP 0° representa uma diferença de 28,54 % entre a maior e a menor força de ruptura. Analisando ainda os dados da Tabela 3 com relação a tensão de ruptura, houve uma diferença de 26,90 % entre a maior e menor tensão, porém o restante dos dados se mantiveram na ordem de resistência já citado nos resultados das forças de ruptura, como a amostra 1 com maior tensão, amostra 2 com menor tensão e amostra 6 como segunda menor tensão de ruptura. A média de tensão de ruptura ficou em 1,42 Mpa. Abaixo no Gráfico 1, é mostrado os dados da Tabela 3 de forma resumida com o comparativo das forças de ruptura das amostras UD – Vácuo.

Gráfico 1 – Força de ruptura amostras UD – Vácuo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 10 mostra os corpos de prova unidirecional feito por infusão a vácuo após o rompimento.

Figura 10 – Amostras VIP após teste de tração.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2.1.2 Ensaio de tração do laminado unidirecional – Laminação manual

O software que faz a conexão entre a máquina e o computador indicava em sua tela todas as informações do teste, para os testes dos laminados UD Laminação manual o programa informou os dados de ruptura das amostras conforme Tabela 4.

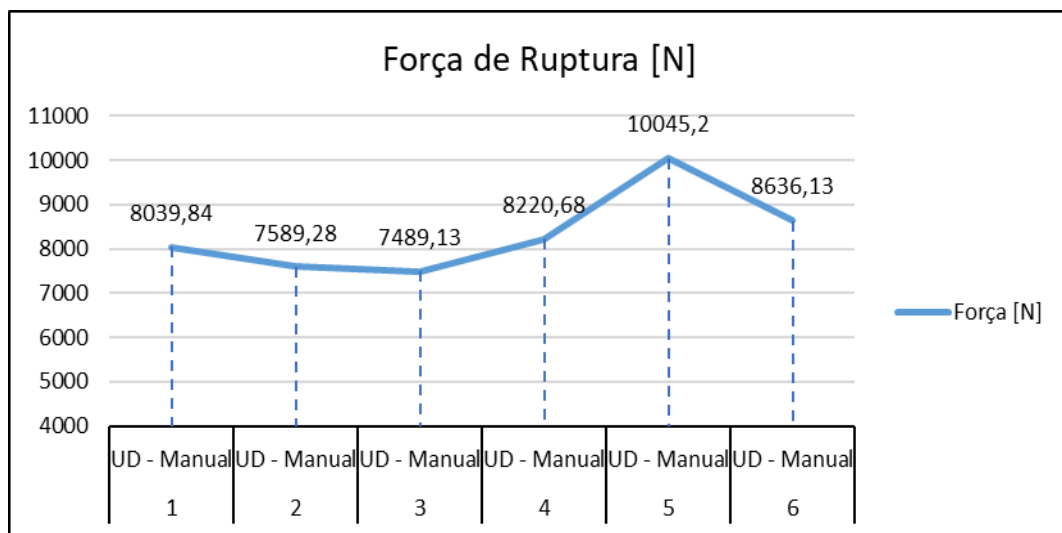
Tabela 4 - Tensões e forças de ruptura das amostras unidirecionais – laminação manual.

Número da amostra	Tipo	Área [mm ²]	Força [N]	Tensão [N/mm ²]	Tensão [Mpa]
1	UD - Manual	403,30	8039,84	19,93	3,78
2	UD - Manual	395,79	7589,28	19,17	3,52
3	UD - Manual	425,00	7489,13	17,62	2,06
4	UD - Manual	420,00	8220,68	19,57	2,38
5	UD - Manual	403,30	10045,20	24,90	2,75
6	UD - Manual	410,82	8636,13	21,02	2,54
Média		-	8336,71	-	2,84

Fonte: Elaborado pelos autores.

Analisando a força de ruptura de acordo com os dados disponíveis na Tabela 4, a amostra 5 obteve a maior força do grupo para o rompimento, sendo necessário 10045,20 N para o rompimento total. Seguindo a análise com o mesmo grupo de amostras, a amostra de número 3 que é a de maior área teve a menor força do grupo para rompimento, sendo necessário uma força 7489,13 N para romper a amostra. A amostra número 2 que tem a menor área ficou com o segundo pior desempenho com rompimento em 7589,28 N. A média de força para romper as amostras ficou em 8336,71 N. Os valores relacionados a força obtidos na Tabela 4 representa uma diferença de 25,45 % entre a maior e a menor força de ruptura. Analisando ainda os dados da Tabela 4 com relação a tensão de ruptura, houve uma diferença de 45,49 % entre a maior e menor tensão. A amostra 1 obteve a maior tensão de ruptura, um total de 3,78 Mpa enquanto a amostra 3 teve a menor tensão, um valor de 2,06 Mpa. A amostra 5 que teve a maior força de rompimento, ficou com apenas a quarta maior tensão de ruptura, um valor de 2,75 Mpa. A média de tensão de ruptura ficou em 2,84 Mpa. Abaixo no Gráfico 2, é mostrado os dados da Tabela 3 de forma resumida com o comparativo das forças de ruptura das amostras UD – Manual.

Gráfico 2 – Força de ruptura amostras UD – Manual.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 11 mostra os corpos de prova unidirecional feito por laminação manual após o rompimento.

Figura 11 – Amostras *HLU* após teste de tração.



Fonte: Elaborado pelos autores.

3.2.2 Teste de temperatura de transição vítrea

Foi retirado uma amostra de cada uma das 2 placas de laminado para realizar o teste na máquina.

Tabela 5 – Temperatura de transição vítrea (T_g).

Tipo da amostra	Temperatura [°C]
UD - Vácuo	57
UD - Manual	66

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os 2 laminados foram curados a temperatura ambiente, nenhum teve qualquer tipo de aquecimento externo e devido a isso as características exotérmicas dos dois tipos de resina tiveram um papel fundamental na temperatura de cura do laminado. A resina de infusão, tem uma cura menos acelerada é chamada de resina tipo lenta, na qual ela leva várias horas para atingir seu pico e devido a isso, não consegue atingir pela própria reação altas temperaturas de cura. Geralmente leva até 8 horas para se ter uma cura completa.

A resina de laminação tem uma característica de curar rápido, geralmente chamada de resina extra rápida, a mesma devido a característica do catalisador tem uma cura acelerada e atinge o pico exotérmico de forma extremamente rápida, consequentemente consegue ter temperaturas de cura mais elevadas em relação a resina de infusão.

De acordo com os dados demonstrados na Tabela 5, o laminado feito por laminação manual teve uma cura de 66 °C e o laminado feito por infusão a vácuo teve uma cura de 57 °C. Essa diferença de 9°C pode ser considerado uma grande diferença.

3.2.3 Teste de calcinação

Foram retiradas 2 amostras de 30 cm x 30 cm de cada um dos 2 laminados fabricados para realizar o teste de calcinação.

Tabela 6 – Resultado calcinação.

Tipo da amostra	Fibra [%]	Resina [%]
UD - Vácuo	69,8	30,2
UD - Manual	49,5	50,5

Fonte: Elaborado pelos autores.

Uma das características da infusão a vácuo é a alta qualidade do laminado, pois esse método de infusão compacta as camadas antes da infusão através do vácuo, e injeta a quantidade necessária para impregnação do tecido ocasionando baixa espessura e alta resistência, a diferença é relativamente alta em relação a laminação manual. Essa vantagem dá uma maior resistência ao laminado devido ao baixo teor de resina em sua estrutura, pois quem dá a resistência ao laminado não é resina e sim a fibra. De acordo com a Tabela 6, para o laminado por infusão a vácuo, a quantidade de fibra ficou com 69,80 %, enquanto que no laminado feito por laminação manual ficou com 49,50 % de fibra, o que ocasiona uma diferença de 20,30 % na quantidade de fibra no compósito. Vale reforçar que a camada de tecido utilizado é a mesma tanto para infusão a vácuo quanto para laminação manual, a diferença é que no método manual, como a impregnação é feita com um rolo de lã, não se tem a precisão de o quanto injetar e existe a presença de ar para ocupar também os espaços no compósito e a soma desses fatores ocasiona uma maior quantidade de resina no laminado.

3.2.4 Teste de dureza Barcol

Foi realizado o teste com 10 medições em cada uma das 2 placas de laminado, os resultados estão nas Tabelas 7 e 8. Na Tabela 7 é mostrado o resultado para o processo realizado por infusão a vácuo.

Tabela 7 – Resultado Barcol – UD vácuo.

Tipo da amostra	Número	Valor medido
UD - Vácuo	1	59,10
UD - Vácuo	2	43,50
UD - Vácuo	3	56,90
UD - Vácuo	4	28,28
UD - Vácuo	5	55,60
UD - Vácuo	6	54,10
UD - Vácuo	7	45,90
UD - Vácuo	8	58,58
UD - Vácuo	9	62,60
UD - Vácuo	10	58,40
Média		54,01

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com os dados da Tabela 7, o menor valor que foi desconsiderado no cálculo foi a medição de número 4, com dureza 28,28 e o maior valor que também foi desconsiderado foi a medição de número 9, com dureza 62,60. As medições consideradas para o cálculo da média foram as medições 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 10. Na Tabela 8 é mostrado o resultado para o processo realizado por laminação manual.

Tabela 8 – Resultado Barcol – UD laminação manual.

Tipo da amostra	Número	Valor medido
UD - Manual	1	48,60
UD - Manual	2	51,30
UD - Manual	3	38,70
UD - Manual	4	46,46
UD - Manual	5	49,00
UD - Manual	6	23,30
UD - Manual	7	53,00
UD - Manual	8	46,60
UD - Manual	9	29,30
UD - Manual	10	42,40
Média		44,26

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com os dados da Tabela 8, o menor valor que foi desconsiderado no cálculo foi a medição de número 6, com dureza 23,30 e o maior valor que também foi desconsiderado foi a medição de número 2, com dureza 51,30. As medições consideradas para o cálculo da média foram as medições 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9 e 10.

A média de dureza Barcol para um laminado unidirecional feito por infusão a vácuo é de 54,01 conforme a Tabela 7 e a média para um laminado unidirecional feito por laminação manual é de 44,26 conforme Tabela 8. Existe uma diferença de 9,75 de dureza entre os laminados, logo o laminado por infusão a vácuo tem uma maior dureza.

3.2.5 Resumo do resultado de resistência a tração

As médias de tensão de ruptura dos laminados fabricados com tecido UD foram:

- UD - Vácuo 0°: 5283,77 N;
- UD - Manual 0°: 8336,71 N.

Para a determinação dos parâmetros de resistência de um laminado existem diversas variáveis que podem influenciar diretamente, tais como: T_g , calcinação e dureza. Teoricamente, se criado exatamente nas mesmas condições, ou seja, mesma temperatura de transição vítrea, infusão sem falhas e sem tecido contaminado (ocasionando uma calcinação e dureza dentro dos parâmetros normais), teremos o laminado por infusão a vácuo mais resistente que o laminado por laminação manual, pois o grau de adesão das moléculas estará equivalente devido ao T_g , a calcinação mostrará uma porcentagem maior de fibra e a dureza será maior. No caso do teste, ocorreu o contrário do que se esperava, pois o laminado unidirecional feito por laminação manual apresentou uma resistência a tração 57,77 % maior que o feito por infusão a vácuo.

Analisando a Tabela 5, percebe-se que existe uma diferença de 9 °C na temperatura de transição vítrea, entre o laminado feito por infusão e os fabricado por laminação manual, e como já citado o T_g é um dos itens que pode influenciar diretamente a qualidade do laminado, pois ele é um dos parâmetros mais importante para a definição de um polímero, ou seja, quanto maior e mais constante a temperatura de cura do laminado, melhor será formado a estrutura cristalina que por consequência, em um ensaio de resistência a tração o resultado será influenciado pelo T_g .

Logo, é possível afirmar que a importância da temperatura de transição vítrea se sobrepôs aos parâmetros de calcinação e dureza, pois mesmo com o laminado fabricado por infusão a vácuo sendo bem superior nesses parâmetros, o T_g definiu o tipo de laminado que teve o melhor desempenho.

4. Considerações Finais

Este artigo objetivou a busca das propriedades mecânicas dos laminados unidirecionais associado a influência do método de infusão, temperatura de transição vítrea, calcinação e dureza sobre a qualidade do laminado.

Uma variável importante identificada nos testes foi a temperatura de transição vítrea, pois mesmo com todos os outros parâmetros favorecendo o método de infusão a vácuo como dureza, calcinação e compactação do laminado, o T_g determinou que o laminado feito pelo método de laminação manual fosse o mais resistente. Para garantir a confiabilidade do teste, foram fabricadas 2 placas de laminados seguindo todos os critérios de qualidade na fabricação de uma peça real, com exceção da aplicação do aquecimento externo para elevar a temperatura de cura, pois um dos objetivos era avaliar a influência do T_g na qualidade do laminado. Das 2 placas foram criadas, obteve-se uma placa para cada método de infusão e após foram confeccionados 12 corpos de provas conforme norma ISO 527-5.

O teste DSC determinou a temperatura de transição vítrea e o laminado fabricado por laminação manual teve 9 °C a mais que o laminado feito por infusão a vácuo. Nos testes de calcinação e dureza, o laminado por infusão a vácuo foi bem superior ao laminado por *HLU*, sendo 20,30 % de fibra a mais no teste de calcinação e 9,75 a mais para o laminado *VIP*. Mesmo com todas essas superioridades, não foi o suficiente para se sobrepor a importância e influência da temperatura de transição vítrea na resistência do laminado, logo, infere-se que qualquer tipo de laminado feito com qualquer tipo de resina, para uma garantia da qualidade e resistência estrutural, deve-se obrigatoriamente aplicar aquecimento externo no laminado.

Nos ensaios realizados com a máquina *EMIC*, os resultados mostraram uma diferença relativamente alta no comparativo entre as médias de ruptura dos laminados *VIP* e *HLU*, pois para o laminado unidirecional o método *HLU* teve uma resistência 57,77% maior que o *VIP* considerando o teste no sentido 0°.

Vale ressaltar que o método de infusão a vácuo dá uma melhor forma para o laminado, menor espessura, maior qualidade, maior quantidade de fibra e maior dureza, logo, é o método utilizado para praticamente todos os componentes de uma pá eólica, pois não é necessário um número elevado de pessoas para executar o processo e caso não ocorra nenhum problema durante a infusão, tem-se uma garantia de um laminado mais uniforme e mais resistente, desde que a temperatura de transição vítrea esteja dentro dos parâmetros requeridos para a operação da pá no parque eólico.

Com relação a espessura dos corpos de prova, percebe-se a diferença do método de infusão e a justificativa da calcinação dar uma quantidade elevada de fibra de vidro no compósito curado, pois para os laminados fabricados por infusão a vácuo temos uma variação de 0,04 mm entre a maior espessura (0,95 mm) e a menor espessura (0,91 mm) e para os laminados fabricados por laminação manual existe uma variação de 0,19 mm entre a maior espessura (1,7 mm) e a menor espessura (1,51 mm) e comparando os dois laminados tem-se uma variação de 0,79 mm entre a menor (0,91mm) e maior espessura (1,7 mm). Logo, esse aumento na altura do laminado se dá apenas pela resina, consequentemente deixando um acúmulo maior de resina no método *HLU* influenciando tanto a qualidade do laminado como o teste de calcinação. Essa diferença de 0,79 mm se deu para 1 camada, mas em uma peça estrutural de uma pá eólica, tem componentes com mais de 50 camadas, logo a diferença de peso e qualidade afetaria diretamente a qualidade da estrutura geral do material compósito.

Esse artigo conseguiu mostrar a importância de seguir os critérios de qualidade estabelecidos previamente para a fabricação de compósitos, pois surgindo algum desvio, pode-se ter um dano estrutural irreversível e muitas vezes o mesmo não se dará de forma imediata, mas após os ciclos de funcionamento vindo a danificar não só a estrutura do compósito como danificar a máquina ao qual a pá eólica estiver instalada.

Como trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Fabricação de laminados biaxiais, triaxiais e quadriaxiais e fazer um comparativo da direção com maior resistência.

- Fabricar os mesmos tipos de laminados deste trabalho, mas colocando aquecimento externo em todos os laminados.

Agradecimentos

Agradecemos a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização e sucesso deste artigo.

Referências

- ABEEÓLICA. (2019). Boletim Anual de Geração Eólica. <http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2019/02/N%C3%BAmeros-ABEE%C3%B3lica-02.2019.pdf>
- Abreu, W. M. (2008). Estudo da temperatura de transição vítrea (T_g) em vidros orgânicos: mel, corante caramelo e frutose. Orientador: Antônio Valadão Cardoso. 187 p. Tese de Doutorado do programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008. <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2828>
- ANAC. (2023). Dureza Barcol. <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por-por/tr1033.htm>
- ALMACO. (2020). Setor de compósitos cresceu 5,6% em 2019. <http://almaco.org.br/2020/04/30/setor-de-compositos-cresceu-56-em-2019/>
- Alves, F. L. (2019). Análise da influência da orientação do ângulo de fibra na resistência à tração do compósito laminado de fibra de vidro e resina poliéster. Orientador: Cândido Jorge de Sousa Lobo. 61 p. TCC (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Centro de tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Russas, 2019. <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/49564>
- Bretschneider, M. R.; Schneider, E. L. & Dias, M. M. (2016). Análise do uso de materiais em aerogeradores. <http://www.feevale.br/Comum/midias/468ef546-5ae1-442a-a4de-362fa799952a/MAXIMILIAN%20DA%20ROSA.pdf>
- Callister JR., W. D. & Rethwisch, D. G. (2012). Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução. (8a ed.), LTC.
- Castro, Rui M. G. (2005). Introdução à energia eólica. (Apostila). (1a ed.), Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, IST.
- Cleveland, C. J. (2004). Encyclopedia of Energy. Elsevier.
- Enercon. (2023). Overview of ENERCON platform. <https://www.enercon.de/en/products/>
- Faria, A. R. (2021). Introdução a materiais e processos de fabricação - Introdução a compósitos. http://www.mec.ita.br/~arfaria/MT717_01.pdf ou <https://pt.scribd.com/document/516594924/MT717>
- Hau, E. (2006). Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics. (2a ed.), Springer.
- Heinrich, H. V. (2010). Análise estrutural de pás de gerador eólico de pequeno porte feitas de fibra vegetal brasileira. Orientador: Paulo Cesar Marques de Carvalho. 130 p. Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Ciências Físicas Aplicadas, Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.
- IMPAC (2023). Durômetro Alumínio Durômetro Barcol. <https://impac.com.br/durometro-barcol/durometro-aluminio-barcol-medicao-dureza-astm-b648-0.html>
- KIRT x THOMSEN. (2022). WIND TURBINE BLADES - THE BLADE HANDBOOK™. (2a ed.), Bladena. <https://www.bladena.com/news/a-new-edition-of-the-blade-handbook-is-out>
- Kumaran, V. G., Padmanathan, K., Govindarajan, U., Varunraj, P., Oli, S. S. T., & Tamizharasan, T. (2017). Conceptual Framework of Antecedents to Trends on Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Energy Conversion System, 10.20944/preprints201707.0057.v1
- Mapfre Global Risks. (2018). Os 15 maiores fabricantes mundiais de aerogeradores. <https://www.mapfreglobalrisks.com/gerencia-riesgos-seguros/estudos/os-15-maiores-fabricantes-mundiais-de-aerogeradores-2/?lang=pt-br>
- Marques, J. (2004). Turbinas eólicas: Modelo, análise e controle do gerador de indução com dupla alimentação. Orientador: Humberto Pinheiro. 158 p. Dissertação de Mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2004. <http://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/8442/JEFERSON%20MARQUES.pdf>
- Mettler Toledo. (2023). Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) - Instrumentos DSC de Alto Desempenho para Pesquisa Acadêmica e Desenvolvimento Industrial. https://www.mt.com/br/pt/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/TA_Family_Browse/DSC.html
- Moreira, A. M. (2008). Materiais Compósitos. http://www.estt.ipt.pt/download/disciplina/2932__Compositos_MC1.pdf
- Niu, M. C-Y. (1992). Composite airframe structures. Hong Kong: Conmil Press LTD.
- Oliveira, A., Miotto, C. B., & Campos, S. A. (2015). Avaliação das características da resina epóxi com diferentes aditivos desaerantes. Polímeros, 25(2), 186-191.
- Sartex. (2023). Basics of multiaxial fabrics - how a saertex non-crimp fabric (ncf) is made. <https://saertex-usa.com/>
- Siemens Gamesa. (2021). Onshore Wind Turbine SG 5.8-170. <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/onshore/wind-turbine-sg-5-8-170>
- United States. Department of Defense. (2002). MIL-HDBK-17-3F. Composite Materials Handbook, Polymer Matrix Composites: Materials Usage, Design, and Analysis. http://everyspec.com/MIL-HDBK/MIL-HDBK-0001-0099/MIL_HDBK_17_3F_216/