



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS RUSSAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEONARDO DE SOUSA SAMPAIO

**ESTUDO DO AQUECIMENTO INFRAVERMELHO COM RESISTÊNCIAS
CERÂMICAS NA CURA DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE VIDRO**

RUSSAS

2021

ESTUDO DO AQUECIMENTO INFRAVERMELHO COM RESISTÊNCIAS CERÂMICAS
NA CURA DE COMPÓSITOS DE FIBRA DE VIDRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do
Campus Russas da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Ramon Rudá Brito Mendeiros

RUSSAS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S184e Sampaio, Leonardo de Sousa.
Estudo do aquecimento infravermelho com resistências cerâmicas na cura de compósitos de fibra de vidro / Leonardo de Sousa Sampaio. – 2021.
67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2021.

Orientação: Prof. Me. Ramon Rudá Brito Mendeiros.

1. Compósitos. 2. Fibra de vidro. 3. Aquecimento infravermelho. 4. Pá eólica. 5. Pá eólica. I. Título.
CDD 620.1

ESTUDO DO AQUECIMENTO INFRAVERMELHO COM RESISTÊNCIAS CERÂMICAS
NA CURA DE COMPÓSTIS DE FIBRA DE VIDRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica do
Campus Russas da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Ramon Rudá Brito Mendeiros (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Caroliny Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Dedico este trabalho a todos os meus familiares e amigos que me auxiliaram nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Evandro, que se esforçou diariamente para me proporcionar o benefício da educação. Sou grato por todo o carinho, amor, cuidados e conselhos valorosos que recebi ao longo da minha caminhada.

À minha mãe, Claucineide, que sempre me deu amor, carinho e apoio nos momentos de dificuldade. Obrigado por sempre acreditar nos meus sonhos e me fazer crer que “o céu é o limite”.

Ao meu irmão, Vinícius, que sempre deixou claro que sou um exemplo para ele. Isso me incentiva a sempre buscar meu melhor para ser uma referência em seu crescimento.

À minha companheira, Tereza, que me sempre incentiva a procurar minha felicidade e alcançar meu verdadeiro potencial. Agradeço do fundo do meu coração por me apoiar em todos os momentos difíceis.

Aos meus amigos de infância e da cidade de Russas, em especial Fábio, Israel e Caio. Com o apoio de vocês, sem dúvidas, a jornada se tornou mais branda.

Aos professores e funcionários da UFC Campus Russas, em especial, ao Luiz. Obrigado por proporcionarem um ensino de qualidade e acessível.

“Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta”

(Carl Sagan)

RESUMO

A energia eólica pode ser classificada como uma promissora fonte de energia renovável para países que utilizam extensivamente combustíveis fósseis em sua matriz energética, diminuindo a degradação do meio ambiente. A pá eólica, elemento responsável pela captação das forças dos ventos, normalmente é construída utilizando fibra de vidro através de um processo produtivo complexo, portanto, o emprego de novas tecnologias nos procedimentos de fabricação são fundamentais para reduzir o ciclo, garantindo a qualidade do item manufaturado. Nessa conjuntura, o presente trabalho busca estudar a elevação de temperatura no procedimento de HLU (Hand Lay-Up) de compósitos de fibra de vidro, utilizando aquecimento com resistências cerâmicas infravermelhas para a obtenção de uma temperatura de transição vítrea (T_g) superior a 65°C . Os resultados demonstraram que com a utilização desse equipamento, após 80 minutos da impregnação das fibras de vidro com resina epóxi no corpo de prova plano, utilizando uma temperatura na superfície do laminado de aproximadamente 95°C , foi possível obter um T_g superior ao especificado com 60 minutos de aquecimento. No corpo de prova curvilíneo, observou-se uma grande variação de temperatura na região superior, sendo inviável a utilização do dispositivo aquecedor em formatos curvados, como por exemplo, em pás eólicas. Por fim, pode-se concluir que a distância do laminado para o dispositivo e o tempo para iniciar o aquecimento após a impregnação com resina influenciaram significativamente nos resultados. Ademais, a utilização do equipamento possibilita a otimização de resultados, visto que ao ser comparado com mantas elétricas, apresenta uma redução no período de aquecimento de 75%.

Palavras-chave: Compósitos; Fibra de vidro; Aquecimento infravermelho; Pá eólica; Otimização

ABSTRACT

Wind energy can be classified as a promising source of renewable energy for countries that extensively use fossil fuels in their energy matrix, reducing environmental degradation. The wind blade, the element responsible for capturing the forces of the wind, is usually built using fiberglass through a complex production process, therefore, the use of new technologies in manufacturing procedures are essential to reduce the cycle, ensuring the quality of the manufactured item. In this context, the present work seeks to study the temperature rise in the HLU (Hand Lay-Up) procedure of fiberglass composites, using heating with infrared ceramic resistances to obtain a glass transition temperature (T_g) higher than 65°C . The results showed that with the use of this equipment, after 80 minutes of impregnation of the glass fibers with epoxy resin in the flat specimen, using a laminate surface temperature of approximately 95°C , it was possible to obtain a T_g higher than that specified with 60 minutes of warm-up. In the curved specimen, there was a large temperature variation in the upper region, making it impossible to use the heater device in curved shapes, such as wind blades. Finally, it can be concluded that the distance from the laminate to the device and the time to start heating after resin impregnation significantly influenced the results. Furthermore, the use of the equipment enables the optimization of results, since when compared to electric blankets, it presents a 75% reduction in the heating period.

Keywords: Composites; Fiber glass; Infrared heating; Wind blade; Optimization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Estrutura do compósito	19
Figura 2	– Classificação dos compósitos	20
Figura 3	– Fluxograma da fabricação de compósitos de matriz termofixa	24
Figura 4	– Esquematização do procedimento de HLU	25
Figura 5	– Calorímetro exploratório diferencial	26
Figura 6	– Gerenciamento do projeto	28
Figura 7	– Desenvolvimento do projeto	30
Figura 8	– Painel geral	32
Figura 9	– Dispositivo de aquecimento	33
Figura 10	– Modo de operação 1	33
Figura 11	– Modo de operação 2	33
Figura 12	– Modo de operação 3	34
Figura 13	– Configuração do primeiro corpo de prova	35
Figura 14	– Corpo de prova 1	36
Figura 15	– Configuração do segundo corpo de prova	37
Figura 16	– Canga utilizada na fabricação do corpo de prova 2	37
Figura 17	– Corpo de prova 2	38
Figura 18	– Configuração do teste 1	39
Figura 19	– Configuração do teste 2	40
Figura 20	– Configuração do teste 3	41
Figura 21	– Configuração do teste 4	42
Figura 22	– Configuração do teste 5	43
Figura 23	– Configuração do teste 6	44
Figura 24	– Configuração do teste 7	45

Figura 25 – Configuração do teste 8	46
Figura 26 – Configuração do teste 9	47
Figura 27 – Curva de desenvolvimento do Tg teórico	48
Figura 28 – Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 1	49
Figura 29 – Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 2	50
Figura 30 – Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 3	51
Figura 31 – Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 4	52
Figura 32 – Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 5	52
Figura 33 – Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 6	53
Figura 34 – Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 7	53
Figura 35 – Curva de temperatura dos termopares	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais documentos utilizados	29
Tabela 2 – Materiais utilizados no projeto	30
Tabela 3 – Configuração do equipamento	31
Tabela 4 – Resumo dos parâmetros utilizados	48
Tabela 5 – Valores da interpolação da curva desenvolvimento de Tg teórica do material	49
Tabela 6 – Temperatura média dos termopares	54
Tabela 7 – Resultados dos testes de Tg do grupo 1	55
Tabela 8 – Resultados dos Tg's dos testes 5, 6 e 7	56
Tabela 9 – Resultados dos Tg's dos testes 8 e 9	57
Tabela 10 – Parâmetros escolhidos	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IR	Radiação infravermelha
HLU	Hand lay-up
Tg	Temperatura de transição vítrea
DSC	Calorimetria exploratória diferencial
TGA	Termogravimetria
DMA	Análise térmica dinâmico-mecânica
tE	Duração esperada
tO	Duração otimista
tM	Duração mais provável
tP	Duração pessimista
UFC	Universidade Federal do Ceará
FISPQ	Ficha de informação de segurança de produtos químicos
PVC	Policloreto de Vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

kW	Quilowatt
mm	Milímetro
g/m ²	Gramas por metro cuadrado
kg/m ³	Quilogramas por metro cúbico
°C	Graus Celcius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivos	17
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	17
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	17
1.2	Estrutura da monografia	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Compósitos	19
<i>2.1.1</i>	<i>Classificação</i>	19
<i>2.1.2</i>	<i>Matriz</i>	21
<i>2.1.3</i>	<i>Reforços</i>	21
<i>2.1.4</i>	<i>Cura</i>	22
2.2	Hand lay-up (HLU)	23
2.3	Calorimetria exploratória diferencial (DSC)	25
2.4	Radiação infravermelha na cura de compósitos	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1	Planejamento das etapas envolvidas	28
3.2	Fabricação dos corpos de prova	34
3.3	Configuração dos testes	37
<i>3.3.1</i>	<i>Grupo 1</i>	37
<i>3.3.1.1</i>	<i>Teste 1</i>	38
<i>3.3.1.2</i>	<i>Teste 2</i>	39
<i>3.3.1.3</i>	<i>Teste 3</i>	39
<i>3.3.1.4</i>	<i>Teste 4</i>	40
<i>3.3.2</i>	<i>Grupo 2</i>	41
<i>3.3.2.1</i>	<i>Teste 5</i>	41
<i>3.3.2.2</i>	<i>Teste 6</i>	42
<i>3.3.2.3</i>	<i>Teste 7</i>	43
<i>3.3.2.4</i>	<i>Teste 8</i>	44
<i>3.3.1.5</i>	<i>Teste 9</i>	45
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	Curva de desenvolvimento do Tg teórico e estimativa de tempo	48

4.2	Curvas de desenvolvimento da temperatura	48
4.3	Análise da temperatura de transição vítrea dos testes.....	53
4.4	Determinação do ponto ótimo de funcionamento.....	56
5	CONCLUSÃO	57
6	TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICE A	63
	APÊNDICE B.....	64

1 INTRODUÇÃO

A utilização de energias renováveis como força motriz para geração de energia tem sido extensivamente buscada desde a década de 70, devido ao crescente cuidado e atenção com o meio ambiente, visto que sua degradação foi acentuada com a utilização de fontes de combustíveis fósseis. Adicionalmente, devido à escassez dos recursos naturais, diversos países buscam alternativas para geração de energia, bem como uma redução na dependência desses bens. Nessa conjuntura, a energia eólica pode ser classificada com uma promissora fonte renovável, na qual sua captação ocorre através de aerogeradores que recebem as forças dos ventos e as transformam em energia mecânica, sendo posteriormente convertida em energia elétrica. (GOMES, 2016).

Tendo em vista a sua natureza infinita e não poluidora, atreladas aos incentivos governamentais, as pesquisas e estudos nas universidades e indústrias especializadas nesse ramo vem crescendo, buscando aperfeiçoamentos para aumentar a eficiência e confiabilidade (MORAIS, 2018). Dessa maneira, devido a imprescindibilidade de aprimorar a performance nos projetos, levando em consideração redução de peso, custos e propriedades mecânicas, a indústria iniciou a utilização dos compósitos (GALVÃO, 2012).

Fabricados a partir da junção de diferentes materiais, os compósitos possuem propriedades diferentes se comparadas as dos seus componentes antes de efetivar-se a união. De maneira simplificada, os compósitos são constituídos por uma estrutura de reforço (geralmente formado a partir de fibras) e a matriz, o qual mantém as fibras unidas e possibilita a transferência de tensão entre os dois elementos (CALLISTER, 2002).

As fibras de vidro e de carbono são empregadas com maior frequência, de maneira simultânea com a resina epóxi na formação de compósitos para aplicação em pás eólicas (ASHWILL, 2009). A fibra de vidro é amplamente utilizada devido ser facilmente produzida e sua aplicação poder ocorrer através de inúmeras técnicas de fabricação, gerando materiais com boas propriedades mecânicas. Quando associadas a resinas, a mesma apresenta uma inércia química que possibilita a aplicação do compósito em ambientes corrosivos (CALLISTER, 2002).

A resina epóxi, possui uma ampla gama de aplicações industriais devido às suas características mecânicas e químicas. Com o objetivo de assegurar a obtenção das propriedades desejadas, a resina precisa passar por uma reação denominada cura, aumentando assim propriedades como a temperatura de transição vítrea. Esta reação vai ocorrer perante a

influência da temperatura e de um agente de cura, tendo papel primordial na cinética da reação, na conjuntura do processamento e características mecânicas finais (SANTOS, 2015).

Produtos diferentes necessitam de técnicas de manufatura, equipamentos para fabricação e requisitos de processamentos distintos para sua fabricação. Cada processo possuirá suas vantagens e desvantagens se comparados aos demais, levando em consideração custo e propriedades obtidas no produto final e, portanto, é um enorme desafio para engenheiros realizar a escolha correta dos materiais e da técnica de fabricação correta (MAZUMDAR, 2002).

O procedimento de laminação manual ou Hand Lay-up (HLU) é o mais antigo e fácil de ser realizado, visando a obtenção de produtos moldados com resina e fibra de reforço. Adicionalmente, essa técnica não requer investimento em equipamentos necessários para realizar o processo (ABMACO, 2009). Nesse método, muito aplicado em revestimento e reparos, as peças obtidas apresentam uma superfície lisa e com bom acabamento superficial, sendo normalmente pintadas posteriormente.

Diante o exposto, o presente trabalho busca investigar a aplicação de aquecimento na cura de compósitos de fibra de vidro, utilizando um protótipo com resistências cerâmicas infravermelhas para a obtenção de uma temperatura de transição vítrea superior a 65°C.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a utilização de um dispositivo de aquecimento com resistências cerâmicas infravermelhas na cura de um compósito de fibra de vidro.

1.1.2 Objetivos específicos

O estudo tem como objetivos específicos:

- a) Analisar a adequação do protótipo para casos reais;
- b) Após o aquecimento, obter um compósito com Tg superior a 65°C;
- c) Definir a condição ótima de funcionamento do equipamento;
- d) Monitorar o desenvolvimento da temperatura na região superior e central dos corpos de prova;

- e) Analisar o impacto do modo de operação do dispositivo de aquecimento no desenvolvimento do Tg;
- f) Comparar resultados de produtos obtidos com mantas elétricas e o protótipo, objetivando a redução do ciclo.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está organizado em cinco subdivisões, incluindo a introdutória. Na primeira seção, é exposta a problemática e os objetivos da monografia. Na segunda, é exibido uma fundamentação teórica com os principais assuntos correlatos e pertinentes a este estudo. Em seguida, a terceira seção mostra o planejamento de todas as etapas envolvidas no projeto, bem como fabricação dos materiais desejados e configuração dos testes. Na quarta subdivisão, serão expostos os principais resultados e suas respectivas avaliações críticas. Por fim, na última seção, serão apontadas as conclusões da monografia.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

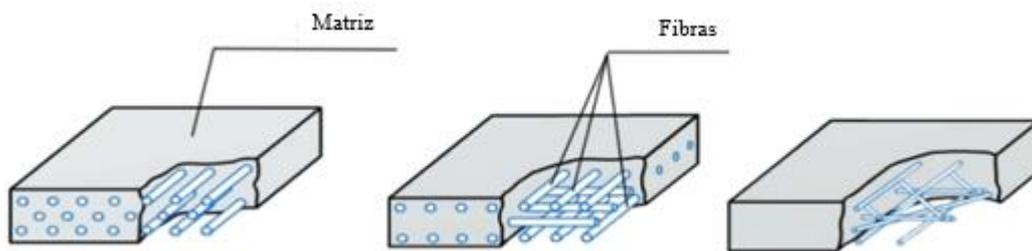
Neste capítulo serão descritos os principais conceitos pertinentes aos materiais compósitos, bem como sobre o método utilizado para sua obtenção.

2.1 Compósitos

Um compósito pode ser caracterizado como um conjunto de materiais interligados, constituídos de duas ou mais fases em escala macroscópica, no qual a performance mecânica visando aplicações e propriedades específicas são planejadas para serem superiores quando comparadas aos seus componentes constituintes (SILVA, 2011).

Uma dessas fases é nomeada de reforço ou “fase dispersa”, é normalmente descontínua e oferece ao material compósito resistência e rigidez. A outra, chamada de matriz, é mais fraca e contínua. Essa fase cobre o reforço preservando-o contra ataques químicos, além de realizar a transferência de esforços para a fase dispersa (SILVA, 2011). As fases são exibidas na figura 1.

Figura 1 - Estrutura do compósito



Fonte: Domingues, 2020

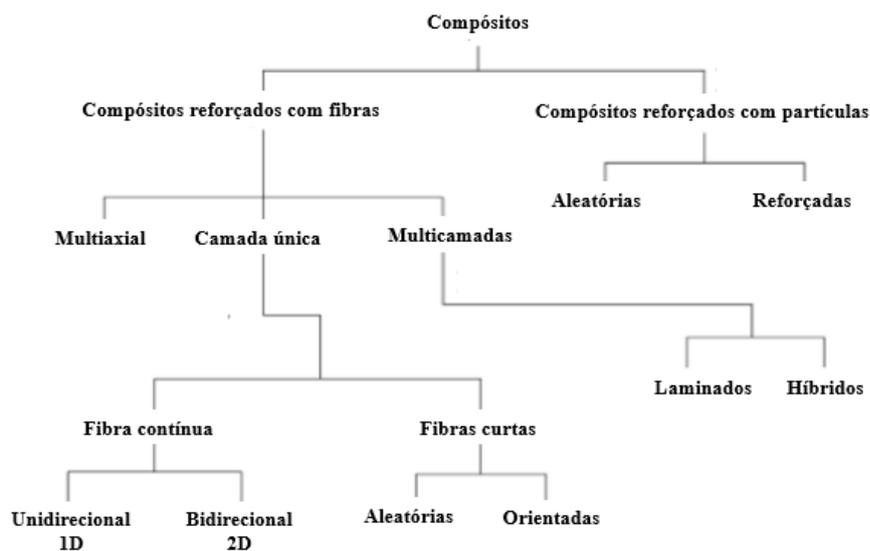
Diferentes tipos de materiais podem ser utilizados na fabricação de reforços de um compósito. A sua seleção não é realizada de maneira aleatória, sendo necessário um estudo profundo para verificar qual material é o mais adequado para determinado produto, analisando as características de cada tipo de reforço, bem como as peculiaridades desejadas para o produto final, além dos custos agregados para a fabricação (ALMEIDA, 2011). Seu emprego vai desde utensílios do dia a dia, até elementos de grande desempenho utilizada em indústrias automotiva, eólica e náutica (GALVÃO, 2012)

2.1.1 Classificação

As características dos compósitos derivam das propriedades de suas fases constituintes, de suas correspondentes frações, bem como da geometria do reforço, ou seja, seu tamanho, arranjo e orientação de suas partículas (MENDEIROS, 2006)

De forma macroscópica e ampla, os compósitos podem ser segmentados em naturais e sintéticos. Considerando os sintéticos, a Figura 1 apresenta uma série de classificações que decorrem dos diferentes tipos de reforços existentes (NETO e PARDINI, 2018)

Figura 2 - Classificação dos compósitos



Fonte: Neto e Pardini, 2018

Segundo Callister Jr. (2008), os compósitos podem ser classificados da seguinte maneira:

- a) **Compósitos particulados:** Uma matriz específica com o reforço na forma de partículas. As propriedades e características dos compósitos vão depender do tamanho e tipo da partícula, da interação entre matriz-reforço, dentre outros.
- b) **Compósitos reforçados com fibras :** Os reforços na fase de fibras, vão melhorar na rigidez e aumentar a resistência do compósito, obstando a propagação da

trinca na direção normal a fibra.

Ao observar a Figura 1, percebe-se que os compósitos podem ser de fibras ou partículas. Considerando o primeiro caso, os compostos sintéticos com fibras contínuas podem possuir reforços 1D ou 2D, onde, nesses casos, cada camada do reforço possui uma orientação preferencial. Em casos especiais, pode-se ter mantas de fibras picadas ou contínuas. (NETO e PARDINI, 2018)

Geralmente, os compósitos reforçados com fibras com melhores performances são obtidos quando a distribuição das fibras são uniformes, entretanto, essas propriedades mecânicas dependerão de diversos fatores, como fração volumétrica das fases, orientação de aplicação da tensão ou carga, entre outros (VENTURA, 2009). Esses compósitos apresentarão maior resistência à tração na orientação das fibras, entretanto, na direção transversal, sua performance mecânica será baixa e sua resistência será ditada pelas características da matriz (SILVA, 2003)

2.1.2 Matriz

Os polímeros admitem uma significativa variedade na produção de matrizes e, portanto, é o material mais utilizado na fabricação de compósitos, destacando-se entre eles a resina (SILVA, 2013). Esses materiais são utilizados em matrizes de compósitos reforçados com fibras, podendo ser termoplásticas ou termorrígidas, conforme a influência da temperatura em suas propriedades (PILATO e MICHNO, 1994).

As matrizes poliméricas normalmente têm baixa resistência mecânica, entretanto, ao ser combinada com a fase dispersa que possuem boas propriedades mecânicas, resultam em materiais de ótima performance (JUNIOR, 2016).

Termoplásticos quando expostos a determinadas variações de temperaturas, amolecem e posteriormente, após o resfriamento, se fundem. O Nylon é um exemplo clássico de resinas termoplásticas (PILATO e MICHNO, 1994).

Os compósitos com matrizes termofixas, normalmente tem uma matriz com uma melhor resistência a fluência quando comparados aos termoplásticos, além de possibilitar temperaturas de trabalhos mais elevadas (SILVA, 2013), entretanto, apresentam dificuldade em seu armazenamento e complexidade na fabricação quando comparados aos compósitos com matrizes termoplásticas (DE e WHITE, 1996)

Mesmo existindo diversos tipos de compósitos fabricados com diferentes resinas no ambiente industrial, a maior parte das partes estruturais é realizada com termorrígidas,

necessitando da ação de uma reação de cura. Dentre as termofixas, as resinas de poliéster, vinil éster e epóxi são empregues em maior quantidade (SOBRINHO, 2005).

A resina epóxi é o termofixo central em aplicações industriais de compósitos com matrizes poliméricas devido diversos fatores, como: baixo retraimento ao longo da reação de cura, ótima adesão a superfícies, baixa adsorção de umidade, elevada relação entre resistência e o peso e boa resistência química (SILVA, 2013)

2.1.3 Reforços

Os reforços ou fase dispersa, apresentam-se normalmente sob a forma de partículas ou fibras, onde essa última, pode ser contínua ou descontínua. Os reforços com formato de partícula apresentam-se em várias formas e tamanhos espalhadas aleatoriamente dentro da matriz, enquanto os reforços descontínuos apresentam fibras pequenas ou picadas, por fim, os reforços contínuos têm fibras longas contínuas (DANIEL e ISHAI, 2006).

O tipo de reforço utilizado na construção do compósito não é realizado de forma aleatória, sendo necessário um estudo aprofundado levando em consideração as propriedades desejadas para serem alcançadas. De acordo com Almeida (2011), a fibra de vidro é a mais empregada atualmente, adicionalmente, de acordo com Spigosso (2017), representam mais de 90% das fibras empregadas em reforços de compósitos com matrizes poliméricas, devido a facilidade em sua produção e boas propriedades mecânicas.

As fibras de vidro são fabricadas com o vidro em forma líquida onde posteriormente o mesmo é resfriado em altas velocidades. Dessa maneira, controlando a variação de temperatura e velocidade de escoamento do vidro, são fabricados diversos modelos de filamentos com diâmetros distintos (NASSEH, 2011).

Segundo Almeida (2011), as propriedades que tornam a utilização de fibra de vidro favoráveis para sua utilização são: boa resistência mecânica, excelente resistência a tração e impacto, baixa absorção de água, boas propriedades térmicas e elétricas, incombustibilidade e fácil moldagem em peças.

As fibras de vidro podem se apresentar na forma de tecidos, os quais possuem duas orientações principais. A primeira, chamada de urdume, diz respeito a direção do comprimento do tecido, enquanto a segunda, denominada de trama, tem uma direção transversal a primeira (JUNIOR, 2016). Dessa maneira, excluindo os triaxiais, os tecidos são constituídos por uma união de cabos interlaçados em ângulos retos, dispostos em uma sequência ou padrão específico (LEVY e PARDINI, 2012)

2.1.4 Cura

Sendo considerada uma das etapas mais críticas do processo, a cura vai consolidar a estrutura do laminado. Existem diversos parâmetros nessa etapa que vão impactar diretamente no produto final, como grandes alterações de temperatura, modificações de estado físico, de viscosidade e densidade, além do surgimento de tensões residuais (MARTINEZ, 2011). Segundo Costa *et al* (1999), essas mudanças ocorrem de maneira irreversível, geralmente acompanhadas pela ação de calor.

Em resinas epóxi com dois componentes, base e endurecedor, a reação da cura é promovida por este último, o qual promove a construção de ligações cruzadas tridimensionais, onde a utilização de fontes de aquecimento promovendo energia externa pode ser necessária ou não (MARTINEZ, 2011)

O desempenho do compósito após a reação de cura não depende exclusivamente dos tipos de reagentes envolvidos, mas também das condições de processamentos utilizadas no trabalho, como temperatura, tempo e pressão, onde esses parâmetros podem ser definidos experimentalmente por métodos de análise térmicas (LEAL *et al*, 2009).

Ao longo da cura de termorrígidos, os dois eventos macroscópicos mais significativos que ocorrem são a gelificação e vitrificação. Segundo Abreu *et al* (2007), de forma resumida, a gelificação é caracterizada pela transição de um estado líquido para um borrachoso, enquanto a vitrificação, é definida pela transição de um estado líquido ou borrachoso, para um vítreo.

2.2 Hand lay-up

Segundo Murphy (1998), para realizar a fabricação de materiais compósitos com matriz polimérica, existem diversos processos de fabricação utilizados, onde, dentre eles, destacam-se:

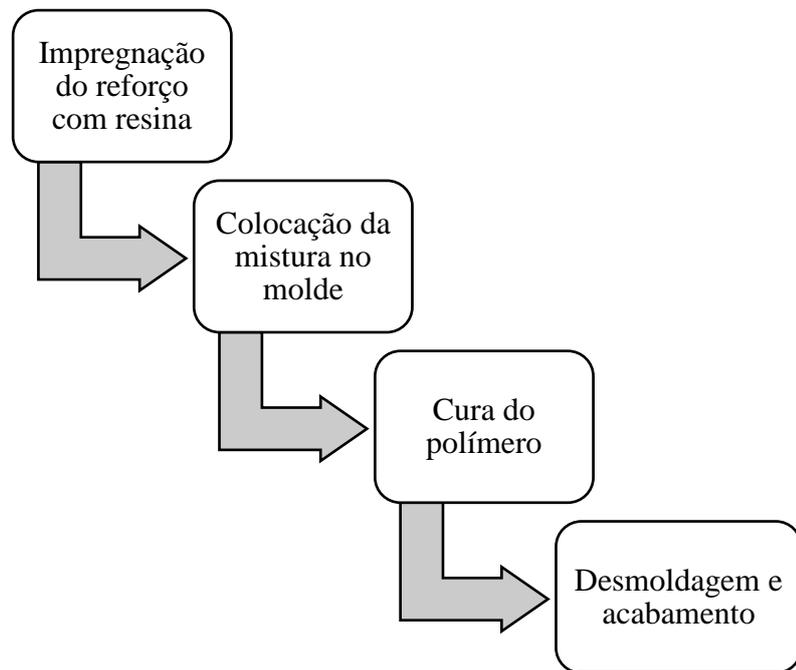
- a) Processos com molde aberto
- b) Processos com molde fechado
- c) Processos com molde cilindro
- d) Processos contínuos

Nos processos com molde aberto, faz-se uso de uma única forma, onde a resina juntamente com a fibra é aplicada. Os investimentos e custos agregados ao procedimento de

fabricação são baixos se comparados aos demais métodos, entretanto, podem aumentar dependendo das especificações desejadas do produto final (KERSTING, 2014)

A técnica de laminação manual ou hand lay-up (HLU), faz parte do grupo de processos com molde aberto, sendo essa a mais antiga e simples de se conseguir produtos moldados fabricados através de compósitos (ABMACO, 2009). O fluxograma exposto na Figura 2 esquematiza as principais etapas envolvidas nesse processo.

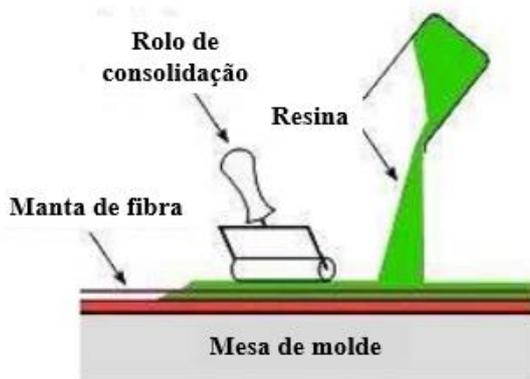
Figura 3 - Fluxograma da fabricação de compósitos de matriz termofixa



Fonte: Adaptado de Leite (2015)

Segundo Al-Qureshi (2010), no procedimento de laminação manual, a primeira etapa a ser realizada é a aplicação de um desmoldante na superfície do molde, como por exemplo, álcool polivinílico. Em seguida, deve-se impregnar os tecidos ou mantas dispostas na superfície do molde com resina (se esse for o material da matriz) com auxílio de pinceis e posteriormente, utilizando rolos, retirar as bolhas e garantir a impregnação às fibras. Se necessário, repete-se o processo para atingir a espessura almejada.

Figura 4 - Esquematização do procedimento de HLU



Fonte: Almeida (2009)

Finalizada a cura, deve-se efetuar a desmoldagem da peça e por fim, realizar seu acabamento. De acordo com Leite (2015), a utilização de resina epóxi é bem comum nesse procedimento e suas principais vantagens são:

- Produtos sem a presença de emendas;
- Investimento e custos iniciais baixos;
- O procedimento não requer grande qualificação dos colaboradores .

As desvantagens são:

- Grande quantidade de mão de obra;
- Tempo de cura alto quando realizado em temperatura ambiente;
- Possibilidade de gerar altos índices de desperdícios.

2.3 Calorimetria exploratória diferencial (DSC)

A análise térmica pode ser considerada como o conjunto de métodos utilizados para analisar as características físicas e químicas de um produto, quando submetidos a um aquecimento ou resfriamento controlado, ou em função do tempo (isotérmico), utilizando uma atmosfera singular e controlada (NUNES, 2013). Esses métodos podem ser utilizados para estudar as propriedades de diversos materiais, como compósitos termofixos, termoplásticos e cerâmicos (KOREEDA, 2011). Segundo Franco (2003), ao se trabalhar com polímeros, as principais técnicas empregadas são: Calorimetria exploratória diferencial (DSC), Termogravimetria (TGA) e Análise térmica dinâmico-mecânica (DMA). Nessa monografia, o

estudo será focado no estudo do DSC.

O DSC pode ser entendido como “um método que consiste em medir a quantidade de energia necessária para estabelecer o equilíbrio térmico entre uma amostra e um material inerte de referência” (Azevedo, 2014, p8). Indo além, Nunes (2013) afirma que, o DSC pode ser entendido como um procedimento que realiza a medição de temperaturas e fluxo de calor relacionados com as transições dos materiais de acordo com a temperatura e tempo. Essas medidas irão fornecer dados quantitativos e qualitativos relacionados as mudanças físicas e químicas que compreendem processos endotérmicos e exotérmicos dos materiais. A figura 4 exibe um calorímetro exploratório diferencial.

Figura 5 – Calorímetro exploratório diferencial



Fonte: Takeuchi, 2018

De acordo com Mothé e Azevedo (2002), a técnica DSC é capaz de fornecer informações sobre as propriedades de materiais, como por exemplo: Temperatura de transição vítrea, de cristalização, ponto de fusão e ebulição, estabilidade térmica, entre outros.

2.4 Radiação infravermelha na cura de compósitos

Diversos pesquisadores trabalham com alternativas para superar as desvantagens da cura térmica, como por exemplo, através de micro-ondas, radiofrequência, radiação ultravioleta e infravermelha (IR). Segundo Kumar *et al* (2010), dentre os métodos citados anteriormente, a IR utilizada para cura de compósitos poliméricos é uma das mais eficientes.

Labeas *et al* (2008) propôs a utilização de IR utilizando lâmpadas para o

aquecimento de produtos termoplásticos e concluiu que à medida que a espessura do corpo de prova aumenta, o tempo de aquecimento também se eleva.

Segundo Kumar *et al* (2010), uma das vantagens da cura por IR é que esse tipo de radiação esquenta diretamente a peça e não o ar circundante, sendo assim, ela é absorvida diretamente pelo composto e não pelo ar entre o equipamento de aquecimento e o corpo de prova, entretanto, Kumar *et al* (2011) afirmou que uma parcela de IR insignificativa é absorvida pela umidade presente no ar.

Em seu trabalho, Kumar *et al* (2010) percebeu que compósitos polímeros curados com IR apresentam uma redução de tempo de cura de até 75% para alcançar as mesmas propriedades que a cura térmica convencional.

Kersting *et al.* (2016), avaliaram a cura de compósitos de fibras de vidro com resina epóxi ao serem submetidos a diferentes níveis de potência de IR ao longo do tempo. Em seu trabalho, obtiveram que a cura utilizando essa tecnologia exigia uma duração consideravelmente menor se comparada a cura térmica.

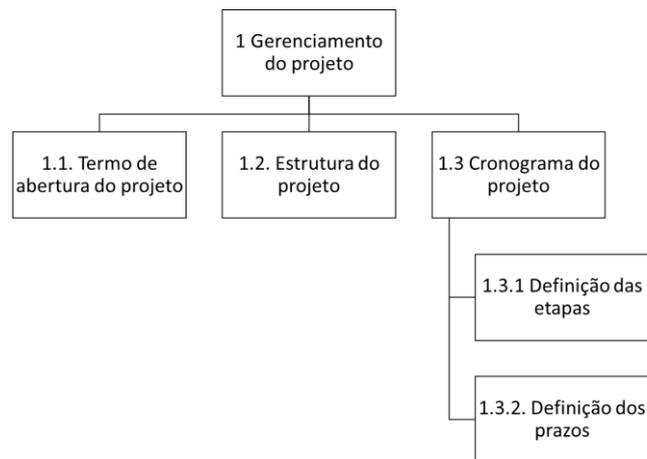
De acordo com Kumar *et al* (2011), apesar da pouca quantidade de trabalhos disponíveis na literatura, a cura por IR pode ser uma alternativa viável para cura de compósitos poliméricos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Planejamento das etapas envolvidas

Os testes realizados no presente trabalho foram custeados por uma empresa que trabalha com compósitos para fins industriais. Dessa maneira, para a realização dos objetivos previstos neste trabalho, fez-se um planejamento detalhado de todas as etapas desenvolvidas no projeto, evidenciando as vertentes e pontos críticos envolvidos no mesmo. Para ilustrar e organizar as diferentes atividades necessárias para a obtenção da condição ótima de funcionamento do equipamento de aquecimento com resistências cerâmicas, foi desenvolvido um fluxograma (Apêndice A) contendo três grandes áreas denominadas de: Gerenciamento do projeto, desenvolvimento e encerramento (Figura 5).

Figura 6 - Gerenciamento do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Na primeira fase, explicitada na Figura 5, foram expostas para todas as partes interessadas as disposições e informações gerais para a realização e administração do projeto, como por exemplo a especificação do objetivo geral e dos específicos.

De maneira macroscópica, no termo de abertura do projeto, foram estabelecidas as atividades que seriam executadas para que os objetivos fossem atingidos e enviado para todas as partes interessadas. Dessa maneira, está presente no escopo do projeto: realizar o planejamento das etapas envolvidas no projeto, efetuar os testes para obtenção dos resultados e analisar os resultados. O que não faz parte: criar protótipo do equipamento e inserir o equipamento no processo industrial.

Além do escopo, a determinação das premissas é um fator importante para que os objetivos do projeto sejam alcançados de forma bem sucedida, portanto, as incertezas tomadas como verdade foram estabelecidas e as restrições foram definidas. A Tabela 1 mostra os eventos esperados para a execução das fases, bem como suas restrições.

Tabela 1 - Premissas e restrições

PREMISSAS	RESTRICÇÕES
Todos os recursos (materiais, mão de obra, ferramentas, local e bom funcionamento do equipamento) desejados serão fornecidos	Mão de obra exclusiva ao projeto
Disponibilidade do laboratório para realização dos testes com as amostras fornecidas	
Disponibilização do corpo de prova para testes	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Com base nas informações anteriores, foi criado um cronograma exibindo como as etapas seriam seguidas ao longo do tempo. Seu período foi calculado utilizando o método da estimativa de 3 pontos, o qual é utilizado quando não se tem dados históricos referentes as atividades ou quando se lida com dados baseados em opiniões.

A estimativa de 3 pontos é obtido pela Equação 1:

$$tE = \frac{tO+tM+tP}{3} \quad (1)$$

Onde:

tE : Duração esperada (obtido 3 meses).

tO : Duração otimista (adotado 2 meses).

tM : Duração mais provável (adotado 3 meses).

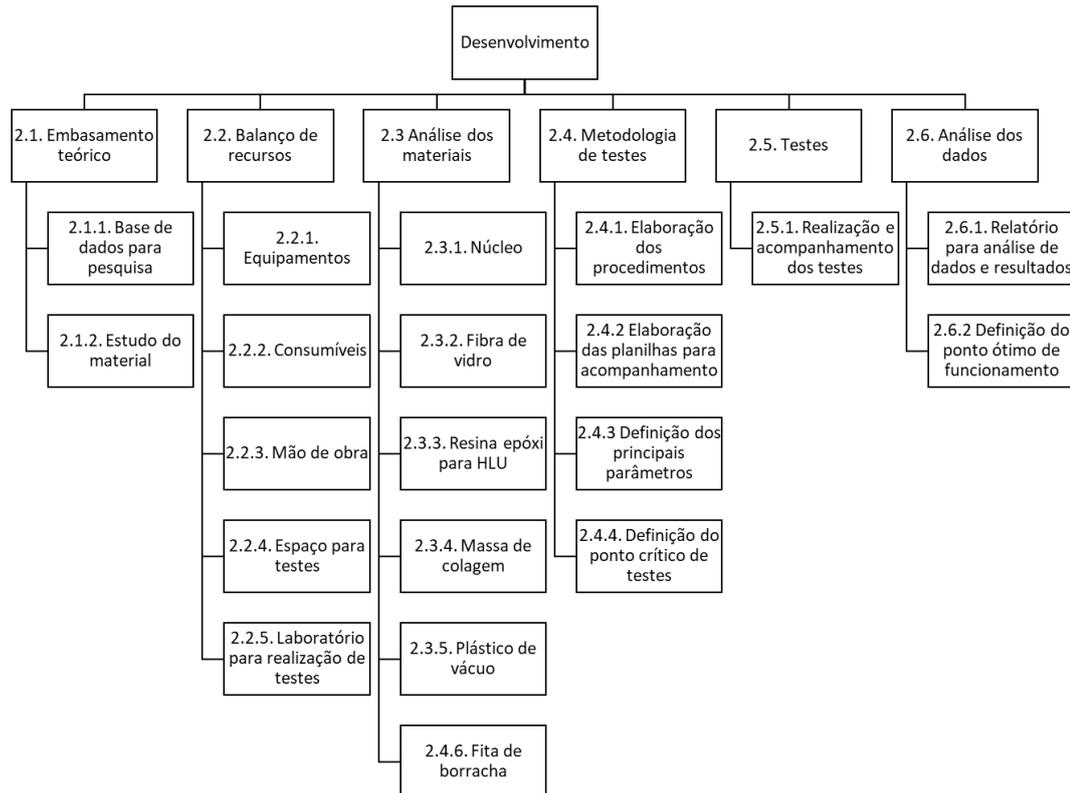
tP : Duração pessimista (adotado 4 meses).

No cronograma exposto no Apêndice B, as atividades referentes ao balanço de recursos da mão de obra utilizada, do espaço para os testes, do corpo de prova, além da realização e acompanhamento dos testes foram sinalizadas devido sua complexidade e alto risco

de impactar diretamente nas entregas.

A segunda etapa do projeto, denominada de Desenvolvimento (Figura 6), consistiu de 6 subgrupos, cada um com suas características e funções, o qual teve uma duração de 10 semanas para realização de todas as atividades previstas.

Figura 7 - Desenvolvimento do projeto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

No embasamento teórico, foram analisados quinze documentos e observados os principais aspectos e conteúdo que poderiam contribuir no desenvolvimento dos testes. A Tabela 2 contém os principais arquivos, bem como palavras chaves dos principais temas.

Tabela 2 - Principais documentos utilizados

RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Número	Documento	Data	Conteúdo
1	Cálculo da radiação infravermelha na atmosfera por um método numérico (NUNES, 1981)	1981	Fluxo de radiação, equações básicas, taxa de variação de temperatura
2	Processing and Characterization of Composites Curing by Microwave Irradiation (KERSTING, 2016)	2016	Cura dos compósitos com base em fibra de vidro e epoxi submetida a vários níveis de potência de irradiação de microondas e tempo.
3	Effect of infrared cure parameters on the mechanical properties of polymer composite laminates (KUMAR, 2011)	2011	Utilização de cura por radiação infravermelho como alternativa para a cura térmica convencional
4	Optimization of infrared radiation cure process parameters for glass fiber reinforced polymer composites (KUMAR, 2011)	2011	Utilização de cura por radiação infravermelho como alternativa para a cura térmica convencional. Distância, cronograma de cura e volume do composto foram analisados
5	Development of infrared radiation curing system for fiber reinforced polymer composites: An experimental investigation (KUMAR, 2010)	2010	Comparação de laminados preparados por método de cura térmica (convencional) e infravermelho

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

O balanço de recursos, segundo componente do desenvolvimento, foram verificados quais materiais eram necessários para a realização dos testes, o estado do equipamento, condição dos corpos de prova, foi programado com o laboratório para condução dos testes de Tg e acordado com colaboradores responsáveis por auxiliar na preparação e condução dos testes. Essa etapa foi essencial para planejar com todas as partes interessadas suas respectivas responsabilidades.

A análise de materiais foi realizada com base nos consumíveis (Tabela 3) que seriam utilizados nos testes, bem como na fabricação dos corpos de prova.

Tabela 3 - Materiais utilizados no projeto

MATERIAIS DO PROJETO

MATERIAL	Documentos
EPIKURE CURING AGENT MGS BPH 137 GF (HEXION)	FISPQ e Ficha Técnica
EPIKOTE RESIN MGS BPR 135 G3 (HEXION)	FISPQ e Ficha Técnica
EPIKOTE RESIN MGS LR 135 (HEXION)	FISPQ e Ficha Técnica
EPIKURE CURING AGENT MGS LH 135 (HEXION)	FISPQ e Ficha Técnica
Fita de borracha 15mx12,5mmx3,17mm (CYTEC)	Ficha Técnica
Plástico de vácuo 75µm ML	Documento interno
Tecido de vidro biaxial (1010g/m ²)	Documento interno
Espuma PVC (densidade 60kg/m ³ e espessura de 15 mm)	Documento interno

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Através dos documentos, informações sobre propriedades físicas, temperatura de fusão, curvas de temperatura, curvas de desenvolvimento do Tg entre outros fatores puderam ser encontrados e analisados.

Na metodologia de testes, quarto subgrupo do desenvolvimento, foram desenvolvidas todas as informações e padrões necessários para a realização dos testes.

Para a realização desses experimentos descritos na metodologia, foi utilizado um equipamento de aquecimento infravermelho, que consiste em um painel geral (Figura 7) que é responsável por realizar a energização de 21 placas de cerâmicas de aquecimento através de infravermelho (Figura 8), onde cada uma tem a potência de 21kW.

Figura 8 - Painel geral



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

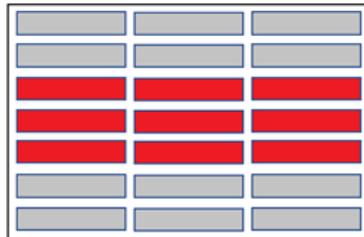
Figura 9 - Dispositivo de aquecimento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

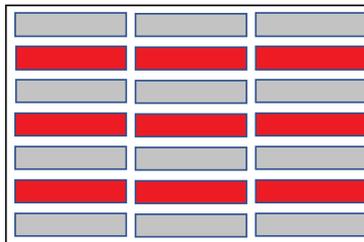
Devido a limitações da estrutura fornecida para realizar os testes, o equipamento só pode admitir 3 tipos de configurações distintas, cada uma com 9kW. Cada uma dessas possibilidades serão mostradas nas Figuras 9, 10 e 11.

Figura 10 - Modo de operação 1



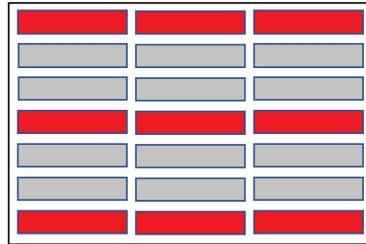
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Figura 11 - Modo de operação 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Figura 12 - Modo de operação 3



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Cada retângulo representa uma placa cerâmica de 1 kW, onde as cinzas estão inoperantes e as vermelhas estão operando.

Ainda na metodologia de testes, foi definido as etapas que deveriam ser seguidas na padronização e realização do procedimento. As etapas estão dispostas na lista a seguir:

- 1- Separar todos os materiais necessários para realizar o procedimento de hand lay up no corpo de prova.
- 2- Preparar a configuração do equipamento de aquecimento.
- 3- Laminar 2 camadas de fibra de vidro, com 500 mm x 400 mm no corpo de prova, com 1 camada de nylon por baixo, bem como as amostras de Tg.
- 4- Aguardar um tempo de pré-determinado para iniciar o aquecimento.
- 5- Posicionar as resistências cerâmicas a uma distância pré-determinada do corpo de prova.
- 6- Através do pirômetro, monitorar e anotar a temperatura da superfície do corpo de prova nos pontos onde serão retiradas as amostras, de 30 em 30 minutos (garantir uma angulação de 90° do pirômetro para a superfície do corpo de prova, bem como uma distância de 2cm).
- 7- Garantir que a temperatura fique no intervalo determinado, monitorando in loco (se necessário, ajustar a potência do equipamento).
- 8- Retirar as amostras de Tg de acordo com o teste definido.
- 9- Após a realização do procedimento, remover as camadas de tecido e nylon do corpo de prova.
- 10- Desligar o equipamento de aquecimento infravermelho.

Foram realizados 9 testes, divididos em duas baterias distintas, onde foram observados os seguintes parâmetros: Comportamento do Tg variando a distância do equipamento para o corpo de prova, formato do corpo de prova, tempo de cura, método de

aquecimento, sequência das resistências, materiais utilizados no processo e variação da posição das amostras.

Para finalizar a etapa do desenvolvimento, foram realizados os testes e posteriormente, analisados seus dados, possibilitando assim definir uma condição ótima de funcionamento.

3.2 Fabricação dos corpos de prova

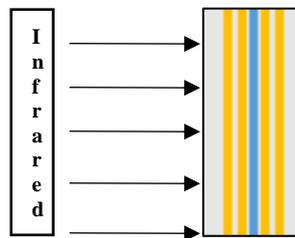
Para a realização dos experimentos foram fabricados e utilizados 2 corpos de provas distintos, verificando a adequação do equipamento de aquecimento infravermelho ao formato da pá eólica. Os corpos de prova foram construídos com base em uma região crítica da pá (mais frágil) visando analisar o comportamento dos constituintes da estrutura quando submetidos a um fluxo de calor contínuo e intenso.

O primeiro corpo de prova possuía um formato plano e os componentes utilizados na sua fabricação foram:

- 4 camadas de fibra de vidro, com uma granulatura de 1010g/m^2
- 1 camada de espuma PVC (Policloreto de Vinila) com densidade de 60kg/m^3 e espessura de 15 mm.
- 3 kg de mix (base com endurecedor) de resina HLU.

Cada camada possuía 1050 mm de comprimento de 850 mm de largura. A configuração do primeiro corpo de prova, bem como o posicionamento do dispositivo de aquecimento é ilustrado na Figura 12.

Figura 13 - Configuração do primeiro corpo de prova



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

As linhas amarelas representam as camadas de fibra de vidro, a azul o núcleo (placa PVC) e as linhas pretas o fluxo de calor cedido pelo infravermelho. As camadas foram unidas, formando o compósito através do método de hand lay up (HLU), utilizando um tempo de 24

horas para a cura, conforme procedimento usual praticado pela empresa. Em seguida, as rebarbas das laterais foram retiradas (25 mm de cada lado) utilizando uma serra policorte com disco de 110 mm de diâmetro. A Figura 13 exibe o corpo de prova após a impregnação com a resina.

Figura 14 - Corpo de prova 1



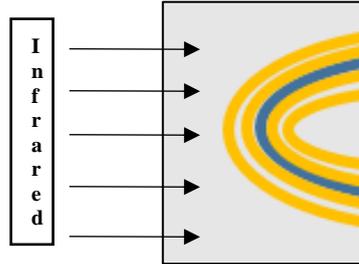
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

O segundo corpo de prova foi construído com o objetivo de averiguar a possibilidade de utilização do equipamento de aquecimento (que possui um formato plano) em um objeto com formato curvado, representando uma região do bordo de ataque de uma pá eólica. Em sua construção foram utilizados os seguintes materiais:

- 4 camadas de fibra de vidro, com uma granulatura de 1010g/m²
- 1 camada de espuma PVC (Policloreto de Vinila) com densidade de 60kg/m³ e espessura de 15 mm.
- 3 kg de mix (base com endurecedor) de resina HLU.
- Molde previamente fabricado

O comprimento e a largura foram escolhidos de maneira análoga ao primeiro componente (1050 mm x 850 mm). A Figura 14 representa os elementos integrantes do corpo de prova, bem como seu posicionamento quanto ao dispositivo de aquecimento.

Figura 15 - Configuração do corpo de prova 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

As linhas amarelas representam as camadas de fibra de vidro, a azul o núcleo (placa PVC) e as linhas vermelhas o fluxo de calor cedido pelo infravermelho. Para realizar a fabricação do compósito, foi utilizado uma peça guia já existente

Figura 16 - Canga utilizada para a fabricação do corpo de prova 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

As camadas foram impregnadas com o mix de resina (composto da base e do endurecedor) e dispostas na superfície do pré-fabricado.

Figura 17 - Corpo de prova 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

De maneira similar a construção realizada no primeiro corpo de prova, foi utilizado um tempo de 24 horas para cura e, posteriormente, retirado suas rebarbas com a mesma serra policorte citada anteriormente.

3.3 Configuração dos testes

Após a Fabricação dos corpos de prova, foi possível iniciar a realização dos testes. Como comentado anteriormente, realizou-se 9 experimentos, os quais foram divididos em 2 grupos distintos. Os principais parâmetros que foram alterados ao longo dos experimentos foram:

- Distância do equipamento de aquecimento para o laminado;
- Formato do corpo de prova;
- Tempo de cura do laminado no corpo de prova;
- Método de aquecimento;
- Sequência das resistências do protótipo;
- Materiais utilizados no processo (plástico de vácuo/massa de colagem);
- Posicionamento e quantidade de amostras de Tg.

3.3.1 Grupo 1

Os testes foram divididos em dois grandes grupos, onde sua principal diferença foi o método de aquecimento. Nessa categoria, foram realizados 4 testes variando diversos parâmetros entre eles (formato do corpo de prova, materiais utilizados, distância do equipamento de aquecimento para o corpo de prova, entre outros), entretanto, o método de aquecimento foi o mesmo para todos, iniciado 30 minutos após a impregnação com a resina.

3.3.1.1 Teste 1

Para a realização do primeiro teste, foram laminadas 2 camadas de fibra de vidro biax com uma granulatura de 1010 g/m², com 500 mm de comprimento e 400 mm de largura, além de 1 camada de nylon entre o laminado e o corpo de prova (a camada de nylon possui a função de facilitar a remoção dos laminados, evitando danificar o corpo de prova para os próximos testes). Essas camadas foram impregnadas com 1,5 kg de resina (base e endurecedor nas suas devidas proporções) através de hand lay up. Adicionalmente, foram dispostas 16 amostras de Tg na superfície do laminado. A Figura 17 expõe o que foi comentado anteriormente

Figura 18 - Configuração do teste 1



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nesse experimento, o aquecimento foi iniciado com 30 minutos após a impregnação com resina, e o mesmo teve 4 horas de duração. A distância do corpo de prova para o infravermelho foi de 300 mm.

Foram realizadas medições para mensurar seus valores ao longo do teste nos locais onde foram dispostas as amostras de Tg, seguindo um mesmo padrão. Foram realizadas 3 aferições na parte superior, com um pirômetro a uma distância de 30 mm e com uma angulação de 90° do laminado e em seguida, retirado a média desses valores. O mesmo procedimento foi realizado para obter a temperatura no centro do laminado.

A sequência definida para o primeiro teste foi o modo de operação 1 (Figura 9),

onde as 3 sequências centrais estão ligadas (9 kW de potência) enquanto as demais estão inoperantes. Nesse experimento, foram retiradas 1 amostra de cada região (centro e superior) a cada 30 minutos

3.3.1.2 Teste 2

No teste 2, foram laminadas 2 camadas de biax 1010 g/m², com 500 mm de comprimento e 400 mm de largura, com uma camada de nylon entre a fibra de vidro e o corpo de prova 1. O mix de resina utilizado, bem como a quantidade de amostras de Tg foram as mesmas do teste anterior. A principal diferença entre ambos foi a distância do equipamento para o dispositivo de aquecimento, que nesse ensaio foi de 150 mm. A Figura 18 mostra as camadas de fibra de vidro e as amostras de Tg laminadas.

Figura 19 - Configuração teste 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

O procedimento de aferição da temperatura na superfície do corpo de prova com o pirômetro, foi o mesmo utilizado no teste anterior. O modo de operação utilizado foi o 1, onde as 3 sequências centrais estão ligadas, enquanto as demais estão inoperantes.

O dispositivo de aquecimento foi ligado após 30 minutos da impregnação do material com resina, possuindo um período total de 4 horas. Nesse experimento, foram retiradas 1 amostra de cada região (centro e superior) a cada 30 minutos

3.3.1.3 Teste 3

No teste 3, foi utilizado o corpo de prova 2, o qual foi criado para simular uma

região crítica do bordo de ataque de uma pá eólica visando analisar a viabilidade de utilizar um protótipo plano para aquecer a pá.

O procedimento de laminação dos tecidos, bem como a quantidade de amostras de Tg foram similares ao teste 2. Nesse experimento, foi utilizado uma distância para o equipamento de aquecimento infravermelho de 150 mm a partir do bordo do corpo de prova para o protótipo. A Figura 19 exibe as camadas de fibra de vidro e amostras após a impregnação com resina.

Figura 20 - Configuração do teste 3



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

O procedimento de aferição da temperatura se manteve o mesmo dos testes anteriores, utilizando um pirômetro calibrado. O aquecimento, regrado pelo modo de operação 1, começou após 30 minutos da impregnação dos tecidos com resina, com uma duração total de 4 horas. Foram retiradas uma amostra de cada região (central e superior) a cada 30 minutos para a realização do teste de Tg.

3.3.1.4 Teste 4

No quarto experimento, foi utilizado o corpo de prova plano com os mesmos parâmetros do teste 2, entretanto, foi adicionada uma camada de plástico perfurado em sua superfície, bem como fita de borracha para selar suas laterais. A Figura 20 ilustra essa montagem.

Figura 21 - Configuração do teste 4



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

O aquecimento, operando de acordo com o método de operação 1, foi iniciado após 30 minutos da impregnação dos tecidos com resina, teve uma duração de 4 horas e foi mensurado utilizando a mesma metodologia adotada nas etapas anteriores.

3.3.2 Grupo 2

No grupo 2, foram realizados 5 experimentos, iniciando o aquecimento 1 hora e 20 minutos após a impregnação com resina. Esse tempo foi selecionado experimentalmente, utilizando como base a saída do laminado do aspecto gelatinoso para um estado sólido.

3.3.2.1 Teste 5

Nesse experimento, foram laminadas 2 camadas de fibra de vidro (granulatura 1010g/m^2) com 500 mm de comprimento e 400 mm de largura, no corpo de prova plano, sem a utilização de massa de colagem antes da laminação dos reforços na superfície do corpo de prova. Essa massa de colagem fornece uma aderência ao material, remove possíveis bolhas e é utilizado no procedimento de HLU realizado nas pás eólicas. A Figura 21 exibe o laminado, após o início do aquecimento.

Figura 22 - Configuração do teste 5



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nesse teste, foi utilizado uma distância de 150 mm do equipamento para o laminado com o dispositivo de aquecimento operando no modo 1. O procedimento de aferição da temperatura seguiu o mesmo padrão explicitado nos ensaios do primeiro grupo, entretanto, só foi medido na região central.

Diferente dos experimentos do primeiro grupo, nesse ensaio foram adicionadas 6 amostras na região central do corpo de prova. As duas primeiras foram retiradas com 120 minutos de aquecimento e as demais foram removidas de 60 em 60 minutos.

3.3.2.2 Teste 6

No teste 6 foram laminadas 2 camadas de biax 1010 g/m², com 500 mm de comprimento e 400 mm de largura, no corpo de prova plano, utilizando as mesmas configurações do ensaio 5, contudo, foi utilizado massa de colagem antes de posicionar as camadas impregnadas com resina na superfície do corpo de prova. A Figura 22 apresenta a distância do corpo de prova para o dispositivo de aquecimento.

Figura 23 - Configuração teste 6



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Como especificado na Figura, foram utilizados 150 mm de distância da superfície do laminado para o equipamento de aquecimento infravermelho. Foram dispostas 6 amostras no corpo de prova, onde 5 foram posicionadas na parte central do laminado e 1 na parte superior.

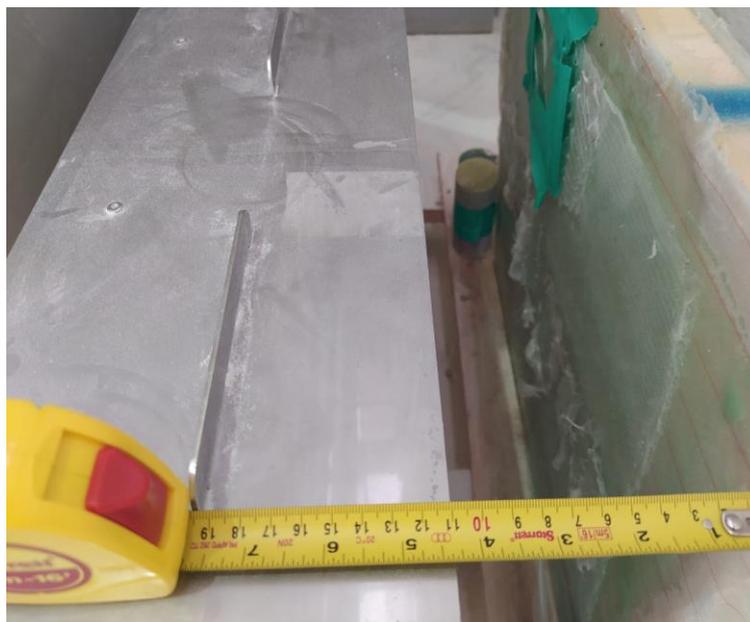
Após 80 minutos da impregnação, o protótipo iniciou o aquecimento utilizando o modo de operação 1. O procedimento de aferição da temperatura foi o mesmo dos métodos anteriores.

Nesse ensaio, a primeira amostra de T_g foi retirada com 60 minutos após o início do aquecimento, a segunda com 90 minutos e a terceira com 120 minutos. Posteriormente, o fluxo de retirada foi de 60 em 60 minutos.

3.3.2.3 Teste 7

No teste 7 foram utilizadas as mesmas configurações do ensaio 6, como as dimensões do laminado e distância do mesmo para o corpo de prova plano (Figura 23). A principal diferença desse experimento consistiu na variação da sequência das resistências do equipamento para a realização do aquecimento, ou seja, foi utilizado o modo de operação 2.

Figura 24 - Configuração teste 7



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

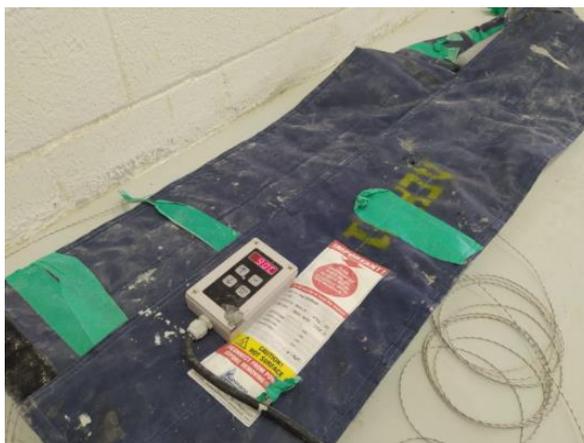
Nesse teste, foram dispostas 7 amostras de Tg na superfície do laminado, as quais 5 foram alocadas no centro e 2 na parte superior (uma com plástico de vácuo e outra sem), portanto, o procedimento de aferição da temperatura, realizado da forma padronizada, foi efetuado nas regiões central e superior com a utilização de um pirômetro calibrado

O aquecimento e a retirada das amostras foram realizados de acordo com o teste 06, onde a primeira foi removida com 60 minutos, a segunda com 90 minutos e a terceira com 120 minutos e as demais em intervalos de 60 minutos.

3.3.2.4 Teste 8

No experimento 8 (Figura 24), não houve a utilização do dispositivo de aquecimento infravermelho para aquecer o material, no entanto, o experimento foi conduzido com mantas térmicas elétricas para simular o aquecimento do procedimento de laminação de reforços em uma pá eólica, realizado atualmente. Para isso, foram laminadas 2 camadas de biax 1010 g/m², com 500 mm de comprimento e 400 mm de largura, no corpo de prova plano e expostos ao aquecimento das mantas após 80 minutos de impregnação com a resina.

Figura 25 - Configuração teste 8



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A manta elétrica foi setada com uma temperatura de 90°C. Nesse teste, o procedimento de aferição da temperatura ocorreu por meio de 4 termopares, dispostos em regiões diferentes do laminado no corpo de prova.

Nesse procedimento, foram dispostas 10 amostras de Tg no laminado, no qual as duas primeiras foram retiradas após 120 minutos de aquecimento com a manta elétrica e as demais de 60 em 60 minutos (2 amostras por vez).

3.3.2.5 *Teste 9*

Após utilizar mantas para aquecer um corpo de prova no experimento 8, nesse teste foram adicionadas amostras de Tg na superfície de um laminado de uma pá eólica real para verificar seu comportamento, ou seja, foram adicionadas amostras de nos reforços do bordo de ataque da mesma. A Figura 25 apresenta a região com os reforços já laminados, antes da utilização das mantas térmicas para aquecimento.

Figura 26 - Configuração teste 9



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nesse procedimento, o aquecimento foi iniciado após 80 minutos da impregnação do tecido com resina e posteriormente foi fornecido calor através de mantas térmicas setadas com 90°C (Foram utilizadas as mesmas mantas do ensaio 8).

Nesse experimento, foram adicionadas 6 amostras de Tg no procedimento de laminação de reforços da região do bordo de ataque. As duas primeiras amostras foram retiradas após 120 minutos de aquecimento com a manta e as demais foram removidas de 60 em 60 minutos.

Na Tabela 4, será exibido um resumo contendo os principais parâmetros utilizados em cada teste.

Tabela 4 - Resumo dos parâmetros utilizados

Teste	Quantidade de amostras por região		Distância	Retirada da primeira amostra	Tempo para início do aquecimento	Tempo total de aquecimento	Formato do corpo de prova
	Centro	Superior					
Teste 1	8	8	300	30 minutos	30 minutos	240 minutos	Plano
Teste 2	8	8	150	30 minutos	30 minutos	240 minutos	Plano
Teste 3	8	8	150	30 minutos	30 minutos	240 minutos	Curvilíneo
Teste 4	7	7	150	30 minutos	30 minutos	240 minutos	Plano
Teste 5	6	-	150	120 minutos	80 minutos	300 minutos	Plano
Teste 6	5	1	150	60 minutos	80 minutos	240 minutos	Plano
Teste 7	5	2	150	60 minutos	80 minutos	240 minutos	Plano

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Os valores referentes aos testes 8 e 9 não são exibidos na Tabela 4 devido ao padrão ser diferente dos demais.

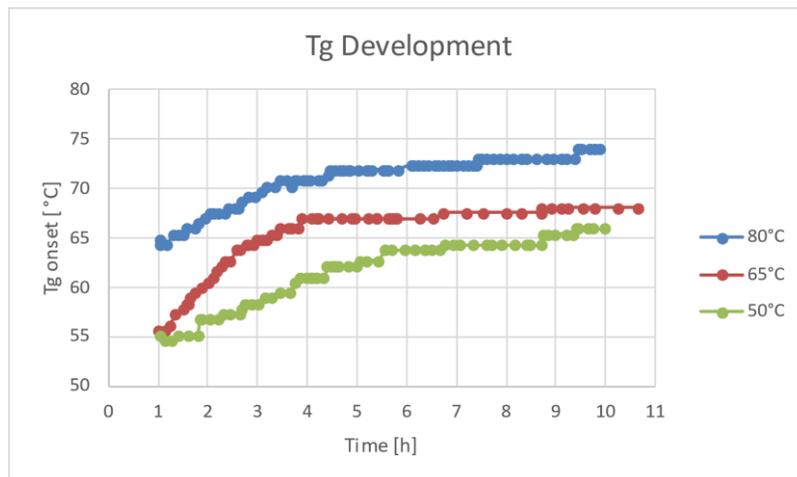
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão exibidos o resultado de Tg teórico e os valores alcançados após a realização dos 9 experimentos, adicionalmente, será comparado como a variação dos parâmetros dos testes podem influenciar nesses valores.

4.1 Curva de desenvolvimento de Tg teórico e estimativa de tempo

Ao analisar as especificações técnicas da resina (base e endurecedor), foi possível obter a curva de desenvolvimento de Tg teórica do material, bem como seus valores ao variar a temperatura na superfície do laminado (80°C, 65°C e 50°C). Dessa maneira, o gráfico exposto na Figura 26 apresenta essas informações.

Figura 27 - Curva de desenvolvimento do TG teórico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nos experimentos realizados, esperava-se obter um Tg de no mínimo 65°C. Dessa forma, interpolando os valores utilizados para construir o gráfico anterior, foi possível estimar o tempo para obter o Tg esperado, com a variação das temperaturas do material. A Tabela 4 indica esses valores.

Tabela 5 - Valores da interpolação da curva desenvolvimento de Tg teórica do material

INTERPOLAÇÃO (80°C)		INTERPOLAÇÃO (65°C)		INTERPOLAÇÃO (50°C)	
Tempo (h)	Tg onset (°C)	Tempo (h)	Tg onset (°C)	Tempo (h)	Tg onset (°C)
1,27	65	3,22	65	8,75	65

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Dessa maneira, esperava-se que ao manter uma temperatura de 80°C na superfície do material, o Tg atingiria o valor especificado com aproximadamente 1 hora e 16 minutos (1,27 horas).

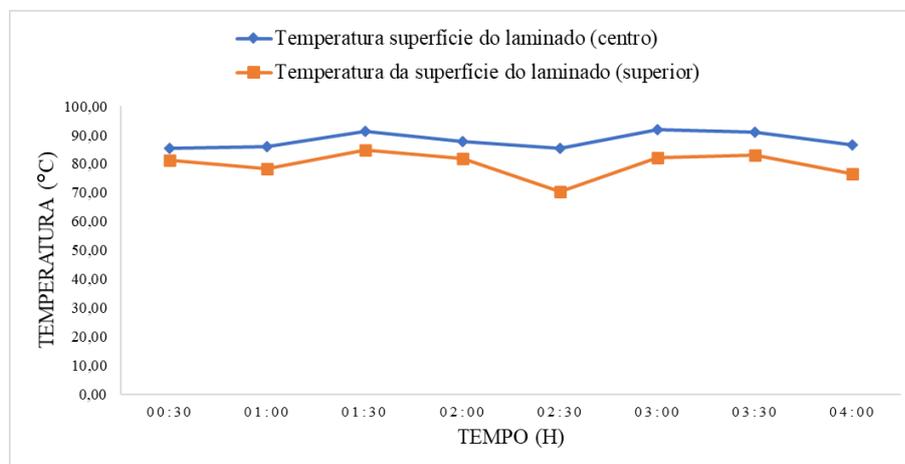
No presente trabalho, para a obtenção do Tg, as amostras foram enviadas para um laboratório parceiro da empresa patrocinadora dos testes. Dessa forma, o método utilizado para obtenção do Tg foi o DSC com uma máquina do fabricante Mettler Toledo. As configurações e modelo do equipamento não foram divulgadas pelo laboratório por se tratar de um dado sigiloso da empresa.

4.2 Curvas de desenvolvimento da temperatura

Cada teste possuiu uma curva de desenvolvimento de temperatura própria, mensurada de forma padronizada, como já discutido nesse trabalho.

No teste 1, a temperatura média obtida na região central foi de 88,24°C, enquanto na região superior foi de 74,74°C. O gráfico de temperatura em função do tempo do experimento é exibido na Figura 27.

Figura 28 - Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 1

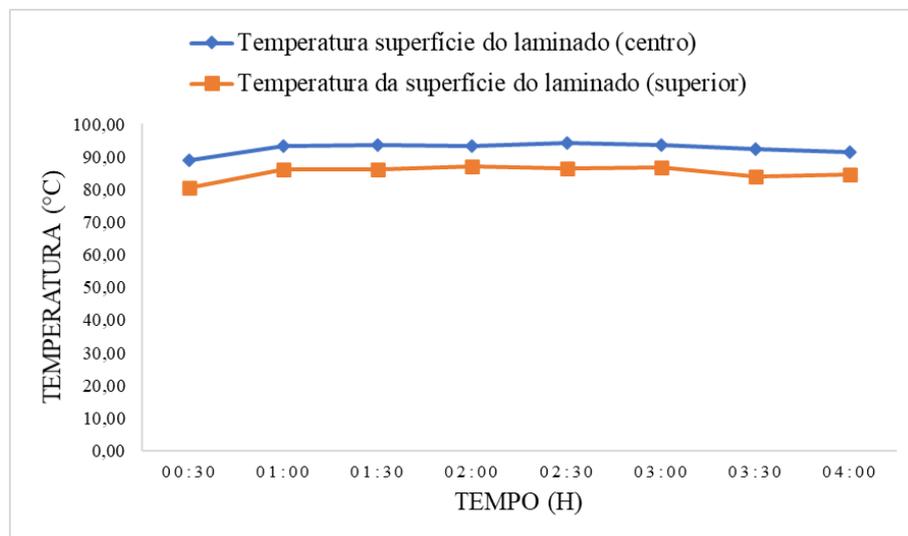


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Percebeu-se uma variação de temperatura entre a região central e superior do laminado. Isso pode ser explicado devido a dissipação de calor para o ambiente, visto que as laterais do corpo de prova não são isoladas, facilitando a troca de calor nas extremidades do laminado. Nesse teste, a média da diferença das temperaturas das duas regiões foi de 8,5°C.

No teste 2, a distância entre o corpo de prova e o dispositivo de aquecimento foi reduzida para 150 mm, como comentado anteriormente. Isso refletiu diretamente nas temperaturas obtidas em ambas as regiões (Figura 28), a qual no centro foi alcançado uma média de 92,56°C enquanto na região superior 85,20°C.

Figura 29 - Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 2

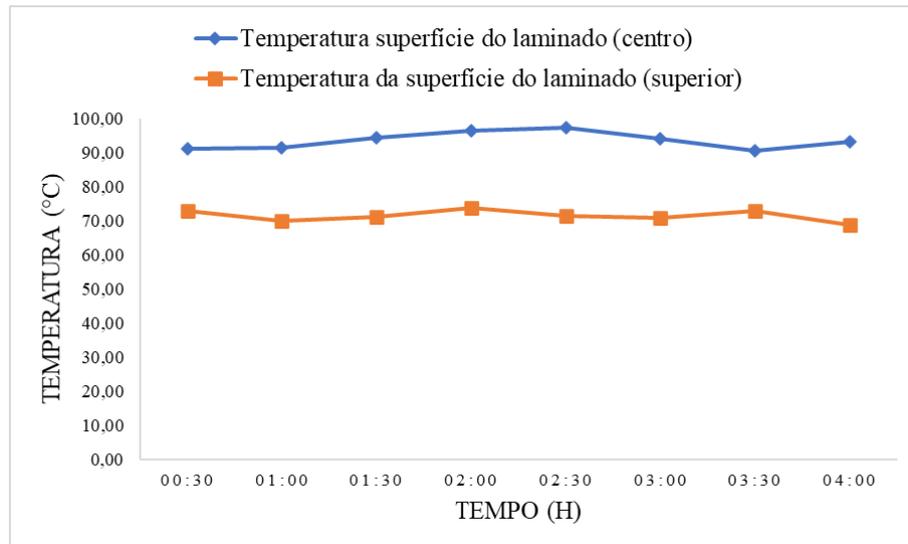


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

De maneira similar ao teste 1, verificou-se uma diferença de temperatura, ocasionada principalmente devido a troca de calor com o ambiente. A média da diferença entre as regiões é 7,36°C. A variação inicial de temperatura, no intervalo de 30 a 60 minutos de aquecimento, foi realizada de forma intencional no potenciômetro do painel central, visando aumentar a temperatura média da superfície do laminado em ambas as regiões.

No teste 3, foi utilizado o corpo de prova 2, o qual possui um formato curvilíneo, facilitando assim a perda de calor para o ambiente. Foi obtido uma temperatura média de 93,63°C na região central e 71,54°C na região superior (Figura 29).

Figura 30 - Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 3



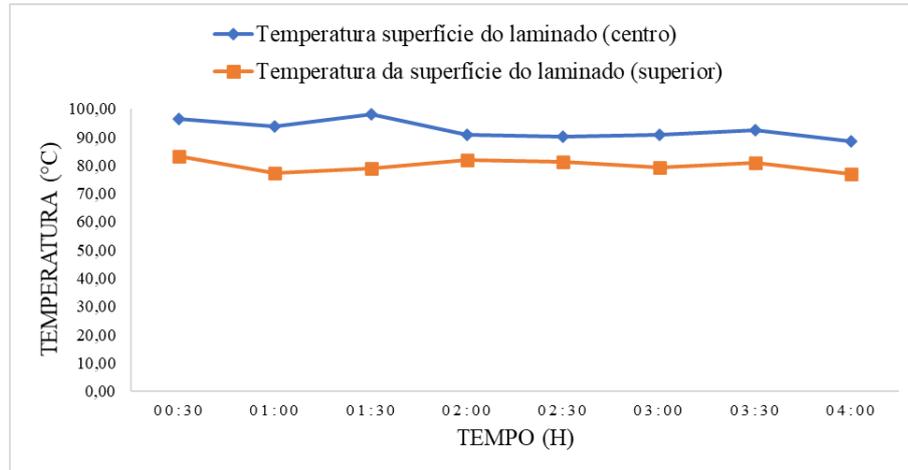
Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A diferença média de temperatura da superfície central e superior do laminado apresentaram uma diferença média de 22,09°C. Essa variação ocorre devido a dois fatores. O primeiro é a diferença na distância do corpo de prova para o equipamento inconstante, isto é, na região do bordo é de 150 mm, enquanto na área superior é de aproximadamente 250 mm. O segundo é a troca de calor com o meio externo, visto que as amostras de Tg's que estão na parte superior do laminado tem um contato maior com o meio externo, propiciando a troca de calor. Como consequência dessas fontes de instabilidade, a diferença de temperatura média na superfície de uma mesma amostra de Tg localizada na parte superior do corpo de prova apresentou uma variação de temperatura de 10°C.

No teste 4, foi adicionado uma camada de plástico de vácuo com fita de borracha nas laterais, objetivando isolar a superfície de agentes contaminantes, entretanto, além do material possuir uma resistência térmica desconhecida, a retirada das amostras de Tg foi complexa, visto que a cada 30 minutos era necessário remover toda a estrutura para retirada das amostras de Tg.

Observando a Figura 30, percebe-se um aspecto decrescente nas aferições de temperatura em ambas as regiões. Isso pode ser explicado devido o fluxo de calor descontínuo devido as paradas para retirada das amostras de Tg. Nesse experimento, foi obtido uma média de 92,65°C na região central e 79,65°C na região superior. A média da diferença entre ambas as regiões foi de 12,70°C.

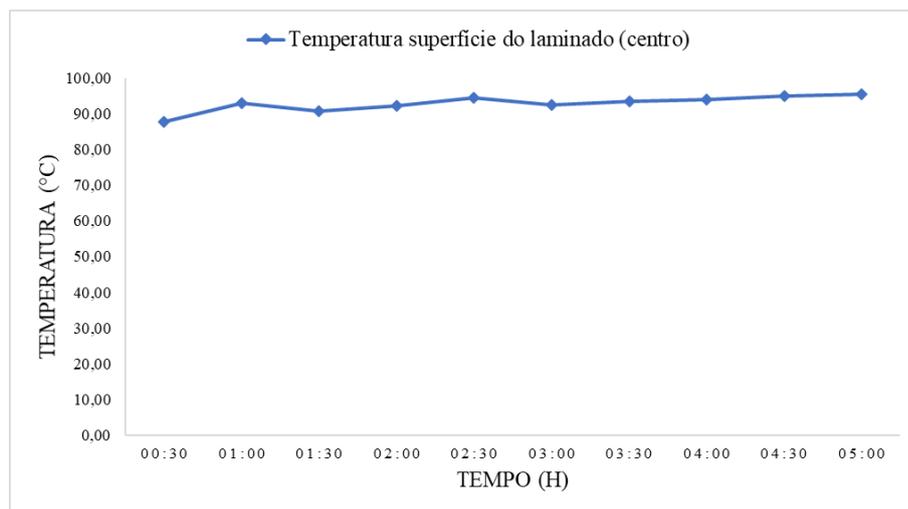
Figura 31 - Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 4



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

No teste 5, a aferição da temperatura foi realizada ao longo das 5 horas (Figura 31). Diferentemente dos anteriores, só foram laminadas amostras de Tg na região central, portanto, as medições foram realizadas nesse local. Foi observado uma temperatura média central de 92,80°C.

Figura 32 - Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 5

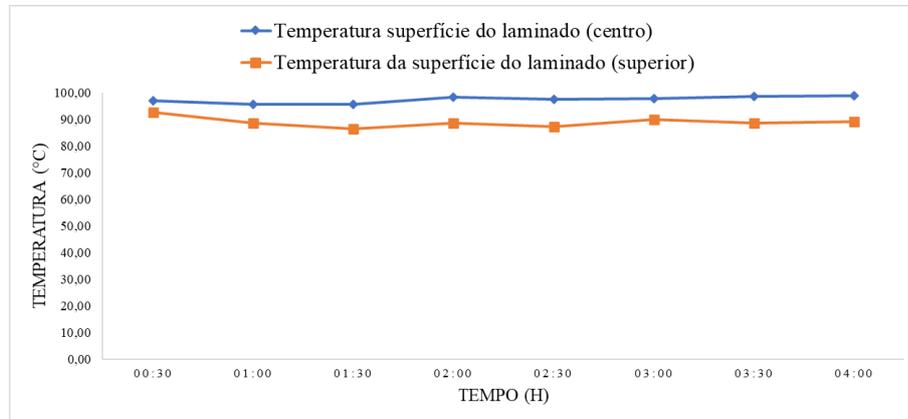


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

No ensaio 6 (Figura 32), a temperatura média na superfície do laminado foi elevada se comparada com o teste 5, o qual possui condições similares de funcionamento. Na região central, foi alcançado um valor de 97,51°C enquanto na faixa superior, 88,94°C. Nesse

experimento, foi obtido uma diferença de temperatura média de 8,57°C.

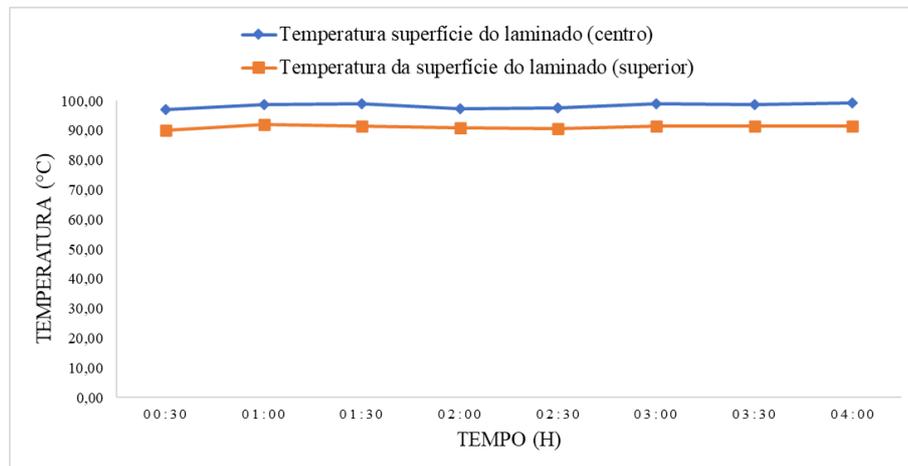
Figura 33 - Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 6



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

O teste 7 foi o único com o aquecimento regrado pelo modo de funcionamento 2. A temperatura média na região central foi de 98,34°C, na superior 91,20°C e a média da diferença de temperaturas entre as regiões foi de 7,14°C (Figura 33).

Figura 34 - Curva de desenvolvimento da temperatura do teste 7

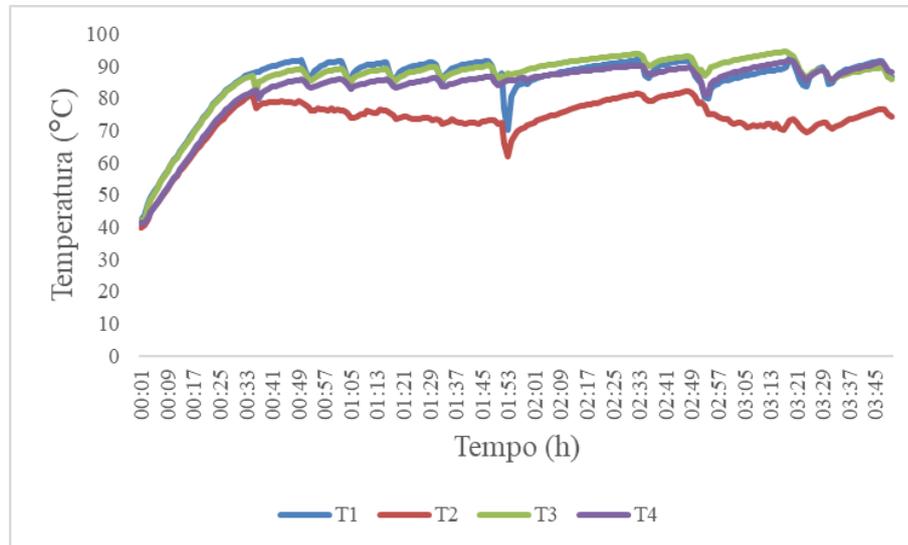


Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

No teste 8, o aquecimento foi efetuado através de mantas elétricas. A aferição da temperatura foi realizada através de 4 termopares, dispostos na superfície do corpo de prova. Foi selecionado um valor de 90°C no dispositivo de controle automático contido na manta elétrica, entretanto, sua temperatura real foi diferente do especificado. As curvas de

desenvolvimento de temperatura são exibidas na Figura 34.

Figura 35 - Curva de desenvolvimento da temperatura dos termopares



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A média de temperatura dos termopares, são explicitadas na Tabela 5:

Tabela 6 - Temperatura média dos termopares

TERMOPARES	TEMPERATURA (°C)
Termopar 1	85,6
Termopar 2	73,2
Termopar 3	86,4
Termopar 4	83,4

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Apesar da troca de calor com o ambiente não ser considerável, pode-se verificar que a manta não proporciona um aquecimento uniforme na superfície do corpo de prova. Apesar das resistências cerâmicas infravermelhas não proporcionarem também, o monitoramento e regulagem através de potenciômetros são mais simples de serem realizados e podem corrigir essas deficiências.

No teste 9, não foi monitorado a temperatura, entretanto foram utilizadas as mesmas mantas do experimento anterior.

4.3 Análise da temperatura de transição vítrea dos testes

O principal parâmetro para verificar a efetividade do teste foi a análise da temperatura de transição vítrea (Tg), a qual tinha como objetivo a obtenção de um resultado maior que 65°C. Ao longo dos experimentos, como citado anteriormente, foram dispostas diversas amostras que foram submetidas a diferentes variáveis. Os resultados dos ensaios do grupo 1 são explicitados na Tabela 6.

Tabela 7 - Resultados dos testes de Tg do grupo 1

REGIÃO	PARÂMETROS		TG ON SET (°C)			
	Tempo (minutos)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	
CENTRAL	30	69	>28	84	-	
	60	51	>28	>28	>28	
	90	53	>28	58	53	
	120	55	58	>28	52	
	150	56	58	>28	54	
	180	57	59	60	54	
	210	57	59	60	54	
	240	56	57	56	55	
SUPERIOR	30	52	>28	>28	-	
	60	54	>28	>28	>28	
	90	53	>28	>28	>28	
	120	53	>28	>28	>28	
	150	55	58	>28	>28	
	180	56	55	>28	>28	
	210	57	59	>28	55	
	240	55	59	>28	56	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Apesar da análise teórica do material especificar que a Tg de 65°C seria obtida com 1 hora e 16 minutos, utilizando uma temperatura superficial no laminado de 80°C, os resultados obtidos nos quatro primeiros testes não alcançaram os valores esperados (desconsiderou-se os valores de 69°C e 84°C obtidos com 30 minutos de aquecimento nos testes 1 e 3, respectivamente)

Os testes 1, 2 e 4, apesar de não obter a meta especificada, apresentaram uma tendência crescente nos valores da Tg, obtendo um valor máximo de 59°C na região central do

teste 2.

Nos testes 2, 3 e 4 algumas amostras apresentaram um valor inferior a 28°C. A maioria desses resultados foram obtidos na região superior, área a qual possui uma alta troca de calor com o meio externo, o que pode ter impactado diretamente na qualidade das amostras.

Percebe-se que as amostras dispostas na parte superior do teste 3 apresentaram Tg inferior a 28°C, enquanto na região central algumas apresentaram valores superiores. Diferentemente dos testes anteriores, a terceiro não apresentou uma tendência crescente em seus valores, indicando assim que o aquecimento não foi homogêneo.

Os resultados de Tg do quarto ensaio foram similares aos testes 1 e 2, onde apresentaram um aspecto crescente, entretanto fora do especificado. Um fator importante que contribuiu para a obtenção desses valores foi a dificuldade de retirada das amostras de Tg, acarretando em um tempo maior para remove-las. Isso ocorreu devido ao envelopamento do laminado com o plástico de vácuo utilizando fita de borracha nas laterais.

No grupo 2, o tempo para início do aquecimento após a impregnação com resina foi de 80 minutos, o que impactou diretamente nos resultados das amostras de Tg. Os valores obtidos são explicitados na Tabela 7.

Tabela 8 - Resultados das Tg's dos testes 5, 6 e 7

PARÂMETROS		TG ON SET (°C)		
REGIÃO	Tempo (minutos)	Teste 5	Teste 6	Teste 7
CENTRAL	60	-	70	71
	90	-	70	71
	120	67	71	72
	120	66	-	-
	180	67	73	72
	240	69	72	74
	300	71	-	-
	300	75	-	-
SUPERIOR	240	-	71	73
	240	-	-	72

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Os experimentos 5, 6 e 7 obtiveram valores de Tg superiores a 65°C, sendo o primeiro com 120 minutos e os demais com 60 minutos de aquecimento respectivamente. Os maiores intervalos de retirada de amostra de Tg foi utilizado para proporcionar um aquecimento

sem interrupções e, portanto, mais uniforme. De maneira similar aos demais testes, observa-se uma tendência crescente nos resultados de Tg.

As duas primeiras amostras do ensaio 5 foram removidas com 120 minutos de aquecimento e as duas últimas com 300 minutos. Realizou-se essa duplicação proposital de retirada das amostras para observar a compatibilidade dos valores de Tg.

Nos testes 6 e 7, as primeiras amostras foram retiradas com 60, 90 e 120 minutos de aquecimento para compreender o desenvolvimento dos resultados nos minutos iniciais.

Com 60 minutos de aquecimento no teste 6, obteve-se um Tg de 70°C, o qual é superior ao especificado, garantindo assim uma boa qualidade na cura do laminado. Além das amostras posicionadas no centro, também foi colocada uma na parte superior do laminado, que tinha como objetivo verificar a influência da troca de calor do meio externo com o desenvolvimento da Tg. Pode-se observar que foi obtido um valor similar a amostra disposta no centro do laminado.

No ensaio 7, pode-se observar que foi obtido o valor de 71°C com 60 minutos de aquecimento. As duas amostras que foram dispostas na região superior do corpo de prova apresentaram resultados similares. Uma dessas amostras (72°C) foi laminada com um plástico de vácuo por cima, para verificar a influência desse material no fluxo de calor fornecido para a cura do material. Os resultados obtidos foram similares para ambas, o que nos garante um impacto não significativo na cura do material.

Por fim, os resultados dos testes 8 e 9 realizados serão mostrados na Tabela 8:

Tabela 9 - Resultados dos Tg's dos testes 8 e 9

REGIÃO	PARÂMETROS	TG ON SET (°C)	
	Tempo (minutos)	Teste 8	Teste 9
N/A	120	60	61
	120	59	61
	180	59	64
	180	61	-
	240	63	65
	240	63	65
	300	67	66
	300	70	-
	360	69	-
	360	68	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nesses experimentos a superfície do corpo de prova não foi dividida em uma faixa central e superior, visto que a manta elétrica é disposta em todo o espaço do laminado. Analisando a Tabela 8, observa-se que ambos os testes atingiram o valor mínimo especificado.

No procedimento 8, o teste teve um aquecimento com duração total de 360 minutos, obtendo o valor esperado com 300 minutos (67°C ou 70°C). Nesse ensaio, as amostras foram duplicadas para verificar a compatibilidade dos resultados, observando uma diferença máxima de 3°C com 5 horas de experimento.

No teste 9, com amostras laminadas na superfície de uma pá eólica real, obteve-se a Tg esperado com 4 horas de aquecimento. Ambos os testes apresentaram uma tendência de resultados crescentes, variando positivamente com o tempo de exposição ao aquecimento.

4.4 Determinação do ponto ótimo de funcionamento

Através da realização dos testes, pôde-se perceber que a modificação nas variáveis de configurações dos experimentos influenciou significativamente nos resultados das amostras de Tg. A Tabela 9 exhibe os parâmetros escolhidos como ponto ótimo de funcionamento.

Tabela 10 - Parâmetros escolhidos

PARÂMETROS ESCOLHIDOS

PARÂMETRO	VALOR
Temperatura na superfície do laminado	95°C ($+5^{\circ}\text{C}/-10^{\circ}\text{C}$)
Distância do equipamento para o laminado	150 milímetros
Tempo para iniciar o aquecimento após a impregnação com resina do laminado	80 minutos
Tempo de aquecimento para obtenção de um tg de 65°C	60 minutos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Para a aplicação, protótipo e materiais utilizados no experimento, utilizando como base os resultados dos Tg's dos testes 6 e 7, foi possível determinar uma temperatura para a superfície do laminado média de 95°C ($+5^{\circ}\text{C}/-10^{\circ}\text{C}$). No limite superior (100°C) a temperatura não vai influenciar nas propriedades dos materiais, enquanto no limite inferior (85°C), o valor obtido de Tg será superior ao parâmetro de qualidade estabelecido.

A distância do equipamento para o laminado foi determinada com base nos testes 1 e 2. O desvio padrão da temperatura na região central do teste 1 foi de 2,79, enquanto do teste 2 foi 1,68. Adicionalmente, a diferença da temperatura média entre a região central e superior nos testes 1 e 2 foram, respectivamente, 8,5°C e 7,36°C.

Utilizando como parâmetro os testes 5, 6 e 7 do segundo grupo, os quais obtiveram um Tg superior a 65°C com 60 minutos de aquecimento, o tempo para iniciar a utilização do protótipo após a impregnação com resina do laminado foi 80 minutos

Dessa forma, utilizando os valores indicados na Tabela 9 adicionado de condições ambientais não prejudiciais e materiais com qualidade, é possível obter os resultados semelhantes em testes similares.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi realizado um estudo sobre a utilização de um dispositivo de aquecimento composto por resistências cerâmicas infravermelhas após a impregnação de resina epóxi em fibras de vidro através da laminação manual, empregando a análise da temperatura de transição vítrea como principal parâmetro de qualidade

O tempo para início do aquecimento após a impregnação das fibras de vidro com resina influenciou nos resultados de Tg, visto que no primeiro grupo não se obteve o valor mínimo especificado, enquanto no segundo grupo foi possível alcançar o resultado esperado com 60 minutos de aquecimento.

O corpo de prova curvilíneo apresentou uma grande variação de temperatura na sua superfície devido a frequência de retirada de amostras e a troca de calor para o ambiente, portanto, o dispositivo de aquecimento plano não deve ser utilizado em formatos curvados, como por exemplo os bordos de uma pá eólica.

Os experimentos 6 e 7 se diferenciaram quanto ao modo de operação das sequências das resistências, entretanto, ao observar os resultados de Tg apresentados ao longo das quatro horas de aquecimento, os valores obtidos foram similares nas regiões central e superior, entretanto a temperatura ficou mais uniforme na superfície do corpo de prova. Apesar disso, para aplicações similares com um laminado de dimensões pequenas e parâmetros de operação e qualidade similares, o modo de operação não influenciou nos resultados de Tg.

Dentre os equipamentos de aquecimentos utilizados, levando em consideração o tempo para obtenção do Tg, o infrared apresentou uma redução de 3 horas se comparado com as mantas elétricas. Em ambos os testes, as temperaturas nas superfícies dos corpos de prova não foram homogêneas, entretanto, o monitoramento desse parâmetro com o dispositivo de aquecimento é mais fácil de ser realizado e automatizado. Adicionalmente, essa desigualdade de temperatura superficial pode ser corrigida de forma manual através de potenciômetros calibrados.

Dessa maneira, conclui-se que a utilização desse dispositivo possibilita ganhos de ciclo e otimização de resultados em empresas que trabalham com compósitos de fibra de vidro, como por exemplo, na indústria eólica. Entretanto, é necessário a realização de estudos para verificar a viabilidade econômica levando em consideração custo de operação, manutenção e adequação do protótipo para a aplicação industrial específica. Adicionalmente, é fundamental a realização de ensaios mecânicos para verificar as propriedades dos compósitos resultantes.

6 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Apesar de obter resultados promissores para a utilização dessa tecnologia no meio industrial, é necessário a realização de estudos que possibilitem a viabilidade desse tipo de equipamento. Portanto, para trabalhos futuros, propõe-se:

- Continuar o estudo da radiação infravermelha na cura de compósitos reforçados com fibras, realizando uma análise quantitativa do fluxo de calor e potência do equipamento;
- Investigar as propriedades mecânicas dos compósitos apresentados neste estudo, realizando ensaios de resistência a tração e a fadiga;
- Investigar a viabilidade econômica do protótipo comparando custo de operação, manutenção e adequabilidade a linha de produção, quando equiparado com mantas elétricas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M.M.S.P.; SHIGUE, C.Y.; OLIVEIRA, P. C.; ROBIN, A.L.M.; BALDAN, C.A.; FILHO, E.R. **Determinação dos estágios de gelificação e de vitrificação na cura de um sistema epóxi-amina por análises dielétricas e dinâmico-mecânica.** São Paulo, 2007.
- ALMEIDA, A.T.P.; SILVA, M.M. **Desenvolvimento e montagem de um gerador eólico com pás compósitas.** Brasília, 2011.
- ALMEIDA, M.U.A. **Comportamento estrutural de painéis sanduiche compósitos para aplicações na indústria da construção.** Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2009.
- AL-QURESHI, Hazim A. **Materiais Compostos: Análises e Fabricação.** [s.l.:s.d.], 2010.
- ASHWILL, T. D. **Materials and Innovations for Large Blade Structures.** 50th AIAA Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Palm Springs, Maio 2009.
- Associação Brasileira de Materiais Compósitos (ABMACO). **Compósitos 2: Tecnologia e Processos.** 2009
- AZEVEDO, D. A. S. **Sistema para determinação da temperatura de transição vítrea de adesivos.** Porto, 2014
- CALLISTER JUNIOR, W.D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução.** 7. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2008.
- CASTRO, Rui M. G. **Introdução a energia eólica.** Lisboa, 2008.
- COSTA, M.L.; REZENDE, M.C.; PARDINI, L.C. **Métodos de estudo da cinética de cura de resina epóxi.** São José dos Campos, 1999.
- DANIEL, I. M., ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Material.** New York: Oxford University Press, 2006
- DE, S. K., WHITE, J. R. **Short Fibre-Polymer Composites.** Woodhead. Publishing Limited England, p. 2-3; p. 64-65, 1996.
- DOMINGUES, Bianca. **Novos materiais compósitos desenvolvidos por meio da simulação molecular com biovia materials studio.** Edtecnologia, 2020. Disponível em: <<https://edtecnologia.com.br/novos-materiais-compositos-desenvolvidos-por-meio-da-simulacao-molecular-com-biovia-materials-studio/>> Acesso em 28 de Agosto de 2021.
- FRANCO, L. A. L. **Análise fractográfica de compósitos estruturais poliméricos.** Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003.
- GALVÃO, L. F. B. **A influência do processo de cura nas propriedades do compósito estrutural carbono/epóxi fabricado via VARTM: processamento e caracterização.** Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, São Paulo, 2012.

GOMES, Maurício Miranda. **Análise dinâmica de um modelo de pá de turbina eólica.** Brasília, 2016.

JUNIOR, A.T. **Estudo comparativo de laminados em plástico reforçado com fibra de vidro obtido através dos processos de spray-up e hand lay-up.** Joinville, 2016

KERSTING, D.F. **Cura de compósitos de sistemas epóxi via irradiação de micro-ondas.** São Paulo, 2014.

KERSTING, D.F.; WIEBECK, H.; ESPER, F.J. **Processing and characterization of composites by microwave irradiation.** Macromol. Symp. 2016.

KOREEDA, T. **Caracterização termoanalítica e estudo de cura de compósito de resina epóxi e mica com propriedades elétricas isolantes aplicado em máquinas hidrogeradoras.** USP – Universidade de São Paulo – 2011

KUMAR, P.K.; RAGHAVENDRA, N.V.; SRIDHARA, B.K. **Effect of infrared cure parameters on the mechanical proprieties of polymer composite laminates.** Índia, 2011

KUMAR, P.K.; RAGHAVENDRA, N.V.; SRIDHARA, B.K. **Optimization of infrared radiation cure process parameters for glass fiber reinforced polymer composites.** Índia, 2010

Labeas GN, Watiti VB, Katsiropoulos ChV. **Thermomechanical simulation of infrared heating diaphragm forming process for thermoplastic parts.** Grécia, 2008

LEAL, A.S.C.; SILVA, N.J.; ARAÚJO, C.J.; SILVA, S.M.L. **Efeito do teor de agente de cura e do tratamento de pós-cura nas propriedades térmicas de resina epóxi para uso em nanocompósitos ativos.** Campina Grande, PB, 2009

LEITE, M.C.O. **Fabricação e caracterização de um compósito híbrido com resíduo lignocelulósico.** Natal, 2015.

LEVY, Flamínio N.; PARDINI, Luiz C. **Compósitos Estruturais.** São Paulo: Blucher, 2012.

MARTINEZ, C. B. **Estudo da influência do ciclo de cura nas propriedades mecânicas de compósitos fabricados pelo processo de infusão de resina.** São Carlos, 2011.

MAZUMDAR, Sanjay K. **Composites Manufacturing: Materials, Product and Process Engineering.** Florida: Crc Press Llc, 2002

MENDEIROS, Marco Antônio Rocha. **Propriedades mecânicas de compósitos de PVC reciclado reforçado com fibras de sisal e de nylon 6.** Salvador, 2006.

MORAIS, George Lopes. **Projeto aerodinâmico de pás de uma turbina eólica.** Caraúbas, RN. 2018

NASSEH, J. **Manual de Construção de Barcos.** 4. ed. Rio de Janeiro: Barracuda Advanced Composites, 2011.

NETO, Flaminio Levy; PARDINI, Luiz Cláudio. **Compósitos estruturais: Ciência e tecnologia**. 2ª ed. ampl – São Paulo: Blucher, 2018. P22

NUNES, Livia Mendeiros. **Cinética de degradação do sistema resina epóxi/fibra de carbono**. Guaratinguetá, 2013.

NUNES, G.S.S., VISWANADHAM, Y. **Cálculo da radiação infravermelha na atmosfera por um método numérico**. São José dos Campos, 1981.

PILATO, L. A., MICHNO, M. J. **Advanced Composite Materials**. New York, Springer-Verlag, 1994.

Rao RMVGK, Rao Sandhya, Sridhara BK. **Studies on tensile and interlaminar shear strength properties of thermally cured and microwave cured glass–epoxy composites**. Journal of Reinforced Plastics and composites. India, 2006

SANTOS, Bruna. **Efeito da taxa de aquecimento em reações de cura em um sistema epóxi**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

SILVA, K. C. A. **Caracterização de compósitos de matriz polimérica com ligas com memória de forma para a aplicação em microatuadores**. Recife, 2013.

SILVA, Leandro José. **Estudo experimental e numérico das propriedades mecânicas de compósitos poliméricos laminados com fibras vegetais**. Universidade Federal de São João Del-Rei, MG, 2011.

SILVA, R.V.; **Compósito de resina poliuretana derivada do óleo de mamona e fibras vegetais. Tese de doutorado**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

SOBRINHO, L. L. **Desenvolvimento de Matriz Polimérica para Material Compósito Visando o Reforço de Dutos de Aço**. UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.

SPIGOSSO, Iago Brusso. **Estudo da pós-cura no aprimoramento das características mecânicas de compósitos**. Joinville, 2017.

TAKEUCHI, Regina. **Calorímetro exploratório diferencial**. Icenp, 2018. Disponível em: <<http://www.icenp.ufu.br/agendamento/calorimetro-exploratorio-diferencial-dsc>> Acesso em 28 de Agosto de 2021.

VENTURA, A.M.F.M. **Os compósitos e sua aplicação na reabilitação de estruturas metálicas**. Portugal, 2009.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DA ESTRUTURA DO PROJETO

