



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

ELIZEU MORAES SOUSA
LEONEL PINHEIRO BARBOSA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO USO DE COMPÓSITO DE MATRIZ
EPÓXI E TECIDOS DE SISAL COMO REFORÇO ESTRUTURAL EM
MADEIRA**

Tucuruí – PA
2020

ELIZEU MORAES SOUSA
LEONEL PINHEIRO BARBOSA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO USO DE COMPÓSITO DE MATRIZ
EPÓXI E TECIDOS DE SISAL COMO REFORÇO ESTRUTURAL EM
MADEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof.^a Dr.^a. Carolina Coelho da Rosa.

FICHA CATALOGRÁFICA


ELIZEU MORAES SOUSA
LEONEL PINHEIRO BARBOSA

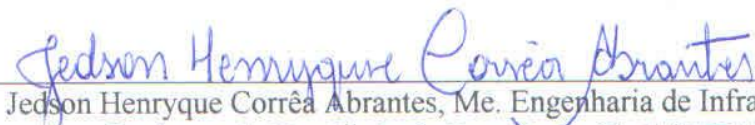
**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO USO DE COMPÓSITO DE MATRIZ
EPÓXI E TECIDOS DE SISAL COMO REFORÇO ESTRUTURAL EM
MADEIRA**

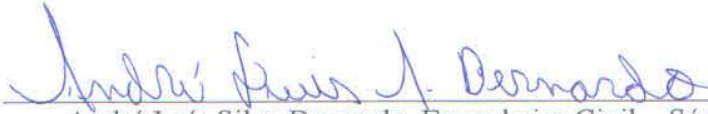
Trabalho de Conclusão de Curso como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenheiro Civil, na Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

Tucuruí, 05 de Fevereiro de 2020.

Aprovado por:


Carolina Coelho da Rosa, Dr.^a em Engenharia Civil (UFPA)
(Orientadora)


Jedson Henryque Corrêa Abrantes, Me. Engenharia de Infraestrutura
Professor da Faculdade de Engenharia Civil (UFPA)
(Examinador Interno)


André Luís Silva Bernardo, Engenheiro Civil – Sócio Diretor da MDX Engenharia.
(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

“Por que para Deus nada é impossível.” Lucas
1:37.

AGRADECIMENTOS

Nossos primeiros agradecimentos são apresentados ao nosso Deus, todo poderoso, pelo dom da vida e por derramar inúmeras bênçãos sobre nós.

A nossa professora e orientadora Carolina Coelho, pelo conhecimento transmitido, apoio, paciência e também pelos conselhos. Obrigado por nos orientar no desafio de elaborar este trabalho.

Aos nossos professores da academia, que de alguma forma colaboraram para o nosso crescimento pessoal e profissional, dos quais nos lembraremos durante nossos desafios lá fora.

Aos colaboradores do Laboratório de Engenharia Civil e do Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA, os quais nos auxiliaram nos desenvolvimentos dos ensaios experimentais, especialmente a Francirene Bonfim, Prof.º Jedson, Vinicius (Civil 2017), Pablo (Mec. 2016), Rodimilson (Laboratório de Mecânica) e ao Prof.º Douglas.

Ao meu amigo Sr. Manoel da Casa Bella, que nos apoiou fornecendo toda a madeira para os experimentos. Ao colaborador Bento que preparou com perfeição todos os corpos de prova.

Eu, Elizeu, agradeço primeiramente a Deus por sempre me abençoar, pois sem Ele não seria possível realizar mais esse sonho. Agradeço meus pais, Adeval Pinheiro Sousa e Dinalda Moraes Sousa, por todas as noites que estiveram orando por mim, pelo apoio e sustento durante todo período da graduação, não deixando faltar nada de essencial. Pela confiança que depositaram, investindo no meu futuro e acreditando sempre no meu potencial.

Agradeço aos meus irmãos, Claudia, Ezequiel, Jokebede, Noeme, Ivone e Davi, a minha cunhada Elane e meu cunhado Naldo e a todos os meus sobrinhos, que mesmo estando longe sempre estiveram me apoiando. Agradeço em especial ao meu irmão Eladio, mesmo sendo o meu irmão mais novo sempre me apoiou desde os tempos de cursinho, incentivando e não deixando faltar nada, sempre sendo um paizão.

Aos meus colegas, Lucas (Cj), Mateus (Taj), Bruno (Meiota) pela amizade e parceria formada durante esses cinco anos de graduação, pelos os dias e noites de estudo e claro pelas canas tomadas no famoso CT Taj Mahal, amizade essa que levarei para vida.

Ao meu amigo Leonel, pela parceria e amizade formada no período da faculdade, que levaram ao desenvolvimento deste trabalho, pelos conhecimentos que me repassou, não somente na área da engenharia, mas também como pessoa, sem dúvidas levarei essa amizade para vida toda.

Eu, Leonel, agradeço aos meus pais, Solange e José Gomes, os quais foram colunas de sustentação em todos os caminhos que trilhei. O apoio incondicional de vocês me fez chegar até aqui, e sem a confiança e o amor que me depositaram não teria conseguido. Agradeço do fundo meu coração aos amores da minha vida, Jucélia, minha esposa e Arthur, meu príncipe, vocês foram o meu combustível para vencer essa batalha. A minha irmã Loyane por sempre ter me incentivado seguir os meus sonhos. As minhas cunhadas (Lilian e Mara) e meu cunhado Júlio César que sempre acreditaram no meu potencial e estavam na torcida pra tudo dar certo. A todos os meus Tios, primos (em especial ao Leandro Pinheiro), Sogro e Sogra que mesmo estando longe também estavam na torcida.

Agradeço aos meus amigos da Empresa MK Engenharia, da qual fiz parte. Ao Eng^o Hiroshi que me apoiou desde os primeiros momentos na faculdade e foi um divisor de águas durante esses cinco anos de curso. Aos meus amigos Eng^o Werllem, Marivaldo e Wellington pelo apoio dispensado.

As minhas amigas Izabella, Isabelle, Brenda, Roberta, Dalyla, Naralice, Mikaele e os amigos Natan, Cleomar, Marcos Alencar, Matheus Rossi e Cia. Valeu povo abençoado.

Em especial agradecer ao meu amigo Elizeu (vulgo Sousa), pela amizade construída durante a faculdade. Obrigado por suportar as batalhas que passamos e por aguentar a cobrança e encheção de saco da minha pessoa.

RESUMO

As estruturas de madeira são aplicadas em diversos tipos de construções, das mais antigas às modernas. Entretanto, em sua vida útil, podem manifestar redução de sua capacidade de resistência, devido ao acréscimo de cargas não previstas em projeto e a ataques provenientes de diversos agentes deteriorantes, fazendo-se necessário a intervenção com técnicas de reforço. A aplicação das fibras naturais (lignocelulósicas) como reforço em materiais compósitos poliméricos (FRP) tem mostrado-se uma técnica em ascensão, isto por ser um material biodegradável e proveniente de fonte renovável. Assim, o objetivo deste trabalho foi produzir compósitos poliméricos utilizando como matriz a resina epóxi reforçada com fibras de sisal para aplicação como reforço de peças de madeira submetidas à esforços de tração. Com auxílio de um tear manual, foram confeccionados dois tipos de tecidos utilizando fibras de sisal, sem tratamento (*in natura*) e outro com as fibras tratadas em água destilada a 80 °C durante 1h, e seca em estufa. Os corpos de prova foram confeccionados conforme a ABNT NBR 7190:1997 e reforçados com resina e os tecidos produzidos, após o período de cura, os mesmos foram submetidos a ensaios destrutivos. Os resultados obtidos dos ensaios sobre algumas propriedades da madeira (Andiroba) apresentaram-se compatíveis com literaturas e pesquisas produzidas por outros autores. Para os ensaios de tração dos corpos de prova reforçados, estes apresentaram bons resultados, podendo estimar-se que os reforços propostos podem agregar em média aproximadamente 80% a capacidade resistência da estrutura. Observando os resultados encontrados pelos testes estatísticos, os quais mostram com 95% de confiança, que o tratamento das fibras não proporcionou efeito na resistência do reforço. Desta forma, pode-se através do estudo afirmar a viabilidade do uso de compósitos com fibras de sisal para aplicação de reforço em estruturas de madeira.

Palavras-Chave: Madeira. Reforço estrutural. Sisal/Epóxi. Compósitos. Tratamento térmico.

ABSTRACT

Wooden structures are used in several types of buildings, from the oldest to the modern. However, in its useful life, a reduction in its resistance capacity can be manifested, due to the increase of loads that are not applied in the project and to the attacks of several deteriorating agents, making intervention with reinforcement techniques necessary. The application of natural fibers (lignocellulosic) as reinforcement in polymeric composite materials (FRP) has shown a technique on the rise, that is, because it is a biodegradable material and proven by a renewable source. Thus, the objective of this work was to produce polymeric compounds that use as a matrix of epoxy resin reinforced with sisal fibers for application as reinforcement of pieces of wood submitted to use exercises. With the aid of a tearing manual, two types of fabrics were made using sisal fibers, without treatment (*in natura*) and another with fibers treated in distilled water at 80 ° C for 1h, and oven dried. The specimens were made according to ABNT NBR 7190: 1997 and were reformed with resin and the fabrics used, after the curing period, they were subjected to destructive tests. The results obtained in tests on some properties of wood (Andiroba) reported records of literature and research produced by other authors. For tests of tests of reinforced specimens, these good results can estimate whether the proposed setbacks can add on average approximately 80% of the structure's resistance capacity. Observing the results found by the statistical tests, which show 95% confidence, that fiber treatment does not offer reinforcement resistance effect. Thus, it can be done through study to demonstrate the feasibility of using compounds with sisal fibers for the application of reinforcement in wooden structures.

Keywords: Wood. Structural reinforcement. Sisal / Epoxy. Composites. Heat treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos compósitos.	8
Figura 2 – Configurações de fibras em compósitos.....	9
Figura 3 – Planta de sisal (Agave Sisalana).	12
Figura 4 – Processo de extração e beneficiamento do sisal.	13
Figura 5 – Modelo de tecido plano (plain).	15
Figura 6 – Geometria molecular – Epícloridrina e Bisfenol A.	19
Figura 7 – Fibras de sisal adquiridas para o estudo.	23
Figura 8 – Medição de umidade da madeira.	24
Figura 9 – Corpo de prova de tração.....	24
Figura 10 – Corpos de prova lacrados em sacos plásticos.	25
Figura 11 – Tratamento térmico nas fibras de sisal.	26
Figura 12 – Fibras de sisal pós-tratamento.....	26
Figura 13 – Processo de tecelagem do tecido de sisal.	27
Figura 14 – Tecido de sisal finalizado.	28
Figura 15 – Esquema de corte e reforço do corpo de prova.....	29
Figura 16 – Corte da região a ser reforçada.	29
Figura 17 – Laminação do compósito.....	30
Figura 18 – Pesagem dos corpos de prova.	31
Figura 19 – Balança utilizada nas medições.	32
Figura 20 – Medição com paquímetro manual.....	32
Figura 21 – Saturação dos corpos de prova.....	33
Figura 22 – Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira a compressão	34
Figura 23 – Ensaio de compressão paralela às fibras.	35

Figura 24 – Corpos de prova sendo ensaiados à tração.	36
Figura 25 – Gráfico de umidade relativa em Tucuruí no ano de 2019.	40
Figura 26 – Modo de ruptura dos corpos de prova de compressão.	42
Figura 27 – Ruptura dos CPs - SR.	45
Figura 28 – Ruptura dos CPs - RN.	46
Figura 29 – Ruptura dos CPs - RT.	46

LISTA DE TABELA

Tabela 1 – Resumo das atividades científicas publicadas pelo EBRAMEM até 2018.....	5
Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais.	11
Tabela 3 – Propriedades típicas das resinas epóxi curadas a frio.	20
Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas da andiroba.....	21
Tabela 5 – Especificações técnicas da resina epóxi.	22
Tabela 6 – Resultados de densidade básica.	37
Tabela 7 – Resultados de densidade aparente.	38
Tabela 8 – Resultados do teor de umidade.....	39
Tabela 9 – Resultados compressão paralela às fibras.	41
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração - sem reforço (SR).	42
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de tração - reforço natural (RN).	43
Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração - reforço tratado (RT).	44

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Resinas termorrígidas - características e limitações.	17
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ADS	Sistema de Aquisição de Dados
apud	Citação indireta
cm ³	Centímetro cúbico
CP	Corpos de prova
DGEB A	Diglicidil Éter de Bisfenol A
EBRAMEM	Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>et al.</i>	“e outros”
FIB	Fédération Internationale du Béton
FRP	Fiber Reinforced Polymers
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
kJ	Quilojoule
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
NBR	Norma Brasileira
RN	Reforço Natural
RT	Reforço Tratado
SR	Sem Reforço

LISTA DE SIMBOLOS

\approx	Aproximadamente
ε	Deformação específica
ρ	Densidade
$\rho_{\text{básica}}$	Densidade Básica
ρ_{aparente}	Densidade Aparente
g	Gramma
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
GPa	Gigapascal
\pm	Mais ou menos
MPa	Megapascal
\leq	Menor ou igual
μ	Micro
mPa.s	Milipascal segundo
E	Módulo de elasticidade
E_{c0}	Módulo de elasticidade de compressão paralela às fibras
kg	Quilograma
f_v	Resistência ao cisalhamento
f_{c0}	Resistência a compressão paralela às fibras
$f_{c0,est}$	Resistência a compressão estimada
f_m	Resistência a flexão
f_{t90}	Resistência a tração normal às fibras
σ	Tensão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	2
1.1.1	Objetivo geral.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	2
1.2	JUSTIFICATIVA.....	2
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1	REFORÇO EM ESTRUTURAS DE MADEIRA.....	4
2.2	COMPÓSITOS.....	6
2.3	FIBRAS.....	9
2.3.1	Tecidos.....	14
2.3.2	Tratamento das Fibras.....	15
2.4	MATRIZES POLIMÉRICAS.....	16
2.4.1	Resinas Epóxi.....	18
3	METODOLOGIA.....	21
3.1	MATERIAIS EMPREGADOS.....	21
3.1.1	Madeira.....	21
3.1.2	Resina Epoxídica.....	22
3.1.3	Sisal.....	23
3.2	PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS.....	23
3.2.1	Produção dos corpos de prova.....	23
3.2.2	Tratamento térmico das fibras.....	25
3.2.3	Desenvolvimento dos tecidos.....	27
3.2.4	Reforço com Sisal/Epóxi.....	28

3.3	ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS	30
3.3.1	Propriedades Físicas.....	30
3.3.1.1	<i>Umidade</i>	30
3.3.1.2	<i>Densidade Aparente</i>	31
3.3.1.3	<i>Densidade Básica</i>	33
3.3.2	Propriedades Mecânicas.....	34
3.3.2.1	<i>Compressão paralela às fibras</i>	34
3.3.2.2	<i>Ensaio de tração paralela reforçadas com compósitos (Sisal/Epóxi)</i>	35
3.3.3	Análise estatística	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1	AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ESPÉCIE DE MADEIRA.....	37
4.1.1	Densidade Básica e Aparente	37
4.1.2	Teor de umidade	38
4.1.3	Compressão paralela às fibras	40
4.2	AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE REFORÇO TRATADOS E NÃO TRATADOS. ...	42
4.2.1	Modos de ruptura.....	45
4.2.2	Teste estatístico comparativo dos reforços.....	46
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
5.1	CONCLUSÕES	48
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

Com os avanços tecnológicos, surgem possibilidades novas e mais aprimoradas para a aplicação da madeira com finalidade estrutural, no entanto, as estruturas de madeira, no decorrer de sua vida útil, podem apresentar redução em seu desempenho devido à degradação proveniente de ataques de inúmeros agentes químicos, físicos e biológicos e também por falhas na concepção e execução de projeto. Segundo Brites (2011), apesar das novas construções apresentarem tendências arquitetônicas mais atuais, a reabilitação e a manutenção das construções mais antigas oferecem um elo entre a sociedade e a sua história, oportunizando as gerações mais jovens o conhecimento das práticas e dos costumes de seus antecessores.

Existem várias razões relacionadas à necessidade de se aplicar o reforço em estrutura de madeira como: ataques de agentes degradadores em ambientes agressivos, acréscimos de cargas não previstas no dimensionamento ou até mesmo erros na fase de execução do projeto (BRITO, J., 2014). A técnica de reforço pode ser empregada tanto para recuperar como para elevar a capacidade de resistência das estruturas, uma técnica bastante utilizada é realizada através da aplicação de compósitos poliméricos fibrosos, os quais podem ser reforçados tanto com fibras sintéticas como naturais.

Nas últimas décadas, o emprego de fibras naturais em compósitos poliméricos tem mostrado ser de grande interesse mundial, pois a aplicação dessas fibras estimula tanto interesses industriais como sociais. Primeiramente por possibilitar o desenvolvimento de produtos mais econômicos e com particularidades moldadas conforme a necessidade de aplicação e segundo por garantir a fixação e subsistência no homem no campo.

No Brasil, existe uma grande diversidade de fibras vegetais com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas. Dentre as diversas fibras naturais, a fibra de sisal é uma que vem sendo estudada por diversos autores como Correia (2011) e Milanese (2008) em pesquisas relacionadas à aplicação das fibras de sisal como reforço em materiais compósitos poliméricos, uma vez que, a fibra de sisal apresenta boas propriedades mecânicas, são de fácil acesso, por terem grandes áreas de cultivo, são provenientes de fonte renováveis, além de custo inferior quando comparada às fibras sintéticas comercializadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral analisar experimentalmente o desempenho mecânico de peças de madeira reforçadas por compósitos poliméricos de matriz epóxi e tecidos confeccionados com fibras de sisal.

1.1.2 Objetivos específicos

- Produção de tecido bidirecional com fibras de sisal;
- Conhecer previamente algumas propriedades da espécie de madeira utilizada;
- Verificar o comportamento mecânico dos tipos de reforços propostos;
- Identificar qual a influência do tratamento térmico das fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos e aplicar uma comparação estatística dos resultados.

1.2 JUSTIFICATIVA

Estudos comprovam que ainda há um número pequeno de pesquisas relacionado à reabilitação e recuperação de estruturas de madeiras, isto por que conhecimentos sobre técnicas de reabilitação e reforço em elementos estruturais de madeira ainda são pouco difundidos. O mesmo não acontece quando se trata de projetar estruturas de madeira, uma vez que os projetistas contam com Normas Técnicas, pesquisas científicas mais aprofundadas e vasta literatura.

Portanto, é evidente a importância de pesquisas científicas mais aprofundadas a respeito da técnica de reforçar estruturas de madeira através da aplicação de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais. Uma vez que, economicamente e ambientalmente é preferível reabilitar uma estrutura a proceder com sua demolição e reconstrução. Tal atitude proporcionaria redução no consumo de recursos naturais e menor geração de resíduos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em conteúdos teóricos e experimentais referentes ao tema em questão, com dados apresentados em tabelas e quadros, além da exposição de figuras, de modo a facilitar a compreensão do que foi desenvolvido.

No segundo capítulo são introduzidas algumas das causas que levam a aplicação de reforço e reabilitação das estruturas de madeira, bem como a utilização e características dos compósitos fibrosos como meio de reforço, apresentando às vantagens do uso das fibras naturais em compósitos poliméricos.

No terceiro capítulo são exibidos os aspectos do estudo experimental através da metodologia de ensaio. Expondo o processo de caracterização da espécie, produção do tecido, tratamento térmico das fibras, confecção dos corpos de prova e por seguinte o processo de aplicação dos reforços, finalizando com os ensaios destrutivos.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos das propriedades físicas (umidade e densidade) e mecânicas (compressão e tração), seguidos de algumas análises realizadas pelos autores, e comparando os valores teóricos com os encontrados experimentalmente.

Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões dos autores referentes ao assunto estudado e sugestões para trabalhos futuros a respeito do tema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 REFORÇO EM ESTRUTURAS DE MADEIRA

Brito, J. (2004) relata que a madeira é um dos materiais mais antigos empregado na construção civil, em conjunto com a terra crua, a pedra natural e as fibras vegetais. É um material cujas características e propriedades oferecem enorme potencialidade na construção, quando utilizados em edificações se projetado, construída e mantida de forma adequada.

Vários são os tipos de estruturas formadas por elementos em madeira: pontes, coberturas e outros, nos quais a satisfação quanto ao desempenho depende de variáveis como a concepção, uso da edificação, qualidade da madeira entre outros. A exemplo das construções históricas, que possuíam certa finalidade em determinada época, hoje, em muitos casos faz-se necessário o uso de reforço a fim de adequá-las as novas exigências de cargas acidentais (MOHAMAD; ACCORDI; ROCA, 2011).

Segundo Fiorelli (2002) a construção civil apresenta com grande frequência problemas relacionados à baixa eficiência de elementos estruturais de madeira, aumento de sobrecarga e degradação por envelhecimento. Tais patologias vêm motivando a busca por novas técnicas de reforço e recuperação para estruturas. Falhas de planejamento, edificações abaladas por sinistros de qualquer natureza, projeto, execução ou emprego de componentes ou materiais de qualidade baixa são casos de recuperação estrutural. Já o reforço proporciona através da combinação com outros materiais que tenham propriedades mecânicas iguais ou superiores um ganho de capacidade ao elemento estrutural.

Ainda segundo Mohamad, Accordi e Roca (2011), as estruturas de madeira sofrem com ataques provenientes de alguns agentes degradadores como: cupins do clima tropical brasileiro e ataque de fungos que comprometem as características físicas e mecânicas das peças. Além disso, a diminuição de massa, peso e resistência das peças estão relacionadas com a aplicação de sobrecargas (combinadas ou não com ataques biológicos) deformando as estruturas.

Desta forma, Carvalho, R. (2005) e Miotto e Dias (2006) entendem que para reabilitar elementos estruturais de madeira é admissível optar pela substituição de peças danificadas ou pela solidarização de elementos que complementem a capacidade mecânica

dos elementos estruturais comprometidos. Tais técnicas encontram limitações com a indisponibilidade dos elementos para substituição, altos custos financeiros e ambientais, escassez de materiais empregados ou, ainda, incompatibilidade em suas características físicas, o que tem incentivado a busca por novos materiais, surgindo nesse cenário os tecidos impregnados com resinas poliméricas.

A investigação na área de reforço estrutural de madeiras ganhou maior importância a partir do século XX. No início optava-se por utilizar o aço (chapas ou varões), por apresentar módulo de elasticidade e tensão de ruptura mais elevada que a madeira, porém a suscetibilidade a corrosão devido ao contato com o ar e a estética do conjunto não o tornavam bem aceito. A partir da década de 1980, começam a surgir os materiais compósitos como reforço em estruturas. Com fibras incorporadas em uma matriz polimérica, são designados como materiais compósitos de matriz polimérica reforçada por fibras – FRP (*Fiber Reinforced Polymers*), apresentando características que favorecem sua utilização, por exemplo, elevada tensão de ruptura, leveza, alto módulo de elasticidade, flexibilidade, resistência à corrosão e conservação do aspecto original, porém de ruptura frágil, o que pode comprometer sua utilização (CRUZ, 2015).

No entanto, apesar de estudos relacionados à investigação em reforço de estruturas de madeira ter ganhado maior relevância a partir do século XX, atualmente ainda é muito pequeno o número de pesquisas envolvendo temas como patologias, recuperação e durabilidade em estruturas de madeira, como mostrado pela coleta de dados do Encontro Brasileiro de Madeira e Estruturas de Madeira – EBRAMEM durante as suas dezesseis edições, realizado por Brito, L. (2014) e atualizado pelos autores, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo das atividades científicas publicadas pelo EBRAMEM até 2018.

(continua)

EBRAMEM	Ano	Áreas Temáticas	Número de artigos publicados	
			Publicações Gerais	Patologia, Recuperação de Estruturas e Durabilidade da Madeira.
I	1983	6	47	0
II	1986	7	60	1
III	1989	9	61	0

(conclusão)

EBRAMEM	Ano	Áreas Temáticas	Número de artigos publicados	
			Publicações Gerais	Patologia, Recuperação de Estruturas e Durabilidade da Madeira.
IV	1992	11	106	3
V	1995	10	100	0
VI	1998	9	144	1
VII	2000	9	140	2
VIII	2002	13	202	8
IX	2004	17	225	6
X	2006	14	223	11
XI	2008	4	245	5
XII	2010	20	420	9
XIII	2012	5	342	10
XIV	2014	11	322	18
XV	2016	8	216	13
XVI	2018	8	180	2
Total			3.033	89

Fonte: Brito, L. (2014), atualizado pelos autores (2020).

2.2 COMPÓSITOS

Os materiais compósitos são resultados da união de dois ou mais elementos heterogêneos, formado por uma fase dispersa e uma dispersante, os quais se diferenciam nas suas propriedades tanto físicas quanto químicas. De maneira geral, um compósito pode ser

considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as partes constituintes (CALLISTER Jr., 2016).

Com o avanço tecnológico e a introdução de novos materiais, tem-se buscado elaborar novos sistemas compósitos, devido o crescente emprego destes em substituição aos tradicionais. Uma vez que tais materiais substituídos, cujas características individuais não atendem as crescentes exigências de melhor desempenho, segurança, economia e durabilidade (VIEIRA, 2008). De modo que Isaia (2007) ressalta a elevada introdução nas últimas décadas de materiais compósitos na área da Engenharia Civil, para aplicação como reforços estruturais, em impermeabilização e vedação.

As fases dos materiais compósitos, como dispersante (matriz) podem ser de um material metálico, polimérico ou cerâmico, no que se referem à fase dispersa (reforço) eles podem ser de origem vegetal, polimérico, metálicos e cerâmicos (CALLISTER Jr., 2016).

A matriz tem por finalidade transmitir ao reforço as tensões provenientes das solicitações através da aderência, conectar os elementos de reforço e proteger contra as reações químicas com o ambiente (ISAIA, 2007). Segundo Carvalho, R. (2005), a escolha do reforço e da matriz deve considerar as condições de uso, as ações mecânicas atuantes, o ambiente e os agentes potencialmente degradadores, os custos e os benefícios durante a vida útil do material em uso.

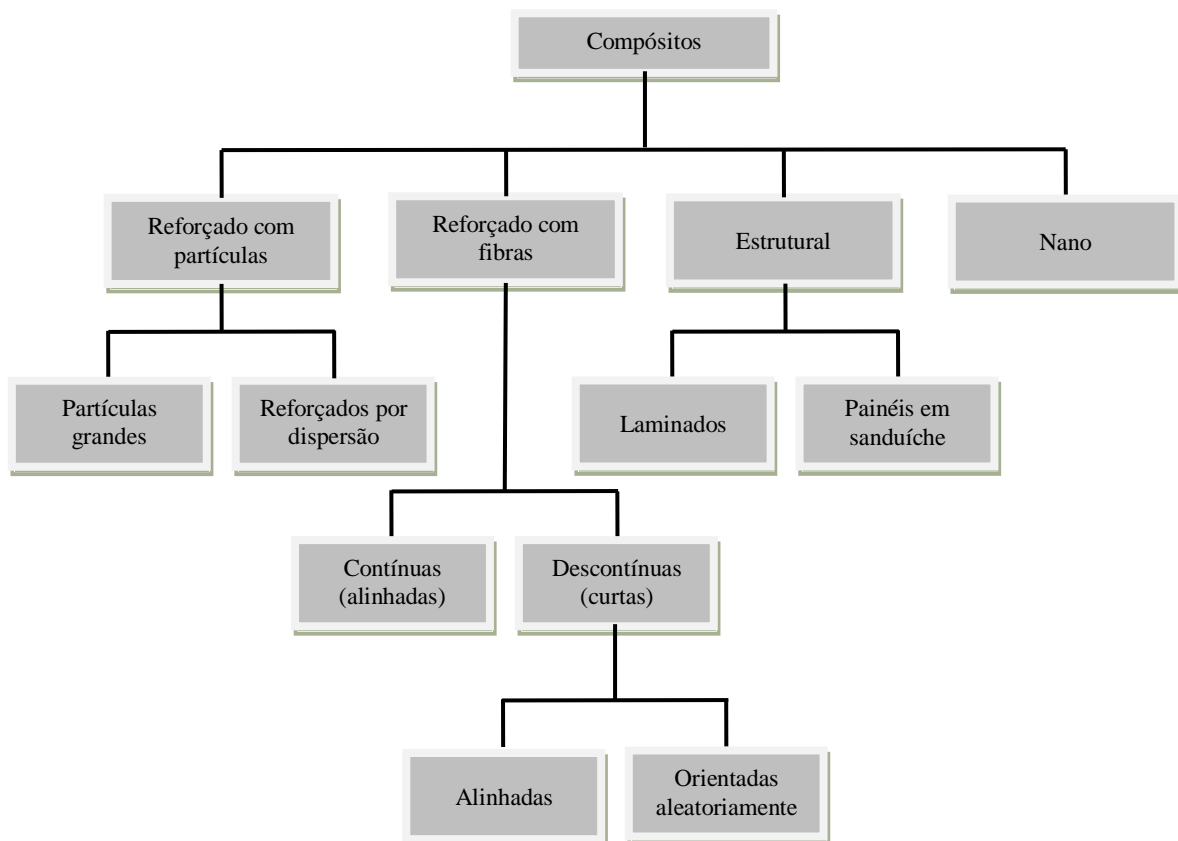
De acordo com Callister Jr. (2016), as propriedades dos compósitos são função das propriedades das fases constituintes, de sua quantidade relativa e da geometria da fase dispersa. A obtenção dessas propriedades necessita de adequadas proporções empregadas entre reforço e matriz, da forma e formato do reforço, do processo de produção e da adesão entre ambos. Como resultado das proporções adequadas e um bom processamento, é possível obter materiais compósitos com baixa massa específica, uma vez que, os materiais monolíticos são relativamente densos, além de apresentarem resistência à fadiga, estabilidade térmica, alta tenacidade, resistência mecânica e resistência à corrosão em condições ambientes e a altas temperaturas (KELLY, 2000; SCHWARTZ, 1997; apud NOGUEIRA, 2004).

Segundo Carvalho, R. (2005) vários são os motivos relacionados à economia, ao meio ambiente e ao meio técnico para a utilização dos compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras. Callister Jr. (2016) salienta que tecnologicamente compósitos

reforçados com fibras como fase dispersa são os mais importantes, pois apresentam com frequência, elevada resistência e rigidez em relação ao peso.

A classificação dos materiais compósitos é condicionada à função do tipo da matriz, à forma e à natureza do reforço. Callister Jr. (2016) expõe um esquema de classificação dos compósitos apresentado na Figura 1.

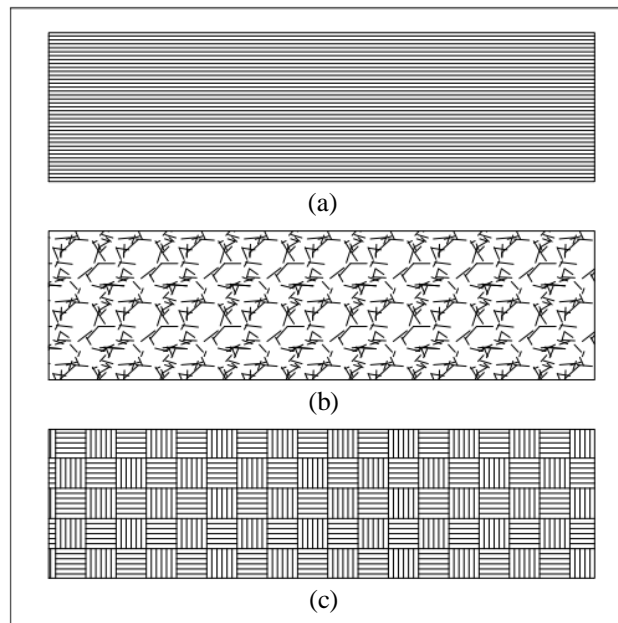
Figura 1 – Classificação dos compósitos.



Fonte: Callister Jr. (2016), adaptado pelos autores.

De acordo com Shackelford (2008) compósitos que utilizam como fase dispersa as fibras podem apresentar arranjos diferentes, sendo contínuo unidirecional, cortado aleatoriamente ou tramado em tecido que é laminado com a matriz. A distribuição das fibras é de extrema importância, pois influenciam no desempenho do elemento estrutural. As fibras compridas podem ser distribuídas tanto aleatórias como também orientadas, apresentadas em mantas arranjadas aleatoriamente, na forma de mechas, tecidos ou fios em arranjos orientados, e as fibras curtas apresentadas em arranjos aleatórios, como demonstrado na Figura 2.

Figura 2 – Configurações de fibras em compósitos.



Fonte: Shackelford (2008).

(a) fibras contínuas (b) fibras discretas ou curtas (c) tecido tramado

Conforme Silva, R. (2003) compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas apresentam melhor desempenho mecânico, maior resistência e rigidez em relação aos de fibras descontínuas, que apresentam características mecânicas ortotrópicas¹ e que podem ocasionar o mecanismo de falhas específicas. Milanese (2008) ressalta vantagens como fácil processamento e orientação das fibras longas contínuas em relação às fibras curtas, no entanto, as fibras curtas apresentam menor custo, são simples de lidar e oferecem mais rapidez nos procedimentos de produção.

2.3 FIBRAS

No geral, as fibras são fios que dispõem de diâmetros ínfimos em torno de 1 μm a 25 μm (MILANESE, 2008). Para Callister Jr. (2016) uma característica que propõe a utilização das fibras como meio de reforço é uma menor incidência de defeitos apresentados que em sua forma mássica, reduzindo, assim, a presença de imperfeições que possam ocasionar falhas, na medida que se tornam mais finos, além de os reforços fibrosos oferecerem valores elevados de resistência a tração.

¹ Ortotrópica é quando suas propriedades (mecânicas) são únicas e independentes nas três direções mutuamente perpendiculares.

Os materiais denominados de fibras podem ser amorfos ou policristalinos, geralmente os reforços fibrosos são de origem sintéticas (vidro, aramida, carbono), ou vegetais (sisal, curauá, algodão, juta). As seções das fibras sintéticas apresentam uniformidade o que não pode ser considerada nas fibras vegetais, pois elas exibem diferenças nas suas dimensões e forma, as variações dessas características relacionam-se a ocorrência de pouca homogeneidade durante seu processo de formação natural (CARVALHO, R., 2005).

O conceito de diâmetro equivalente é aplicado à variação nas dimensões e forma das fibras vegetais, o qual serve para avaliar o desempenho das fibras que dependem da secção transversal e também classificar as fibras entre curtas e longas, o diâmetro equivalente corresponde à circunferência de igual área da fibra de seção irregular, estando às fibras curtas definidas com um comprimento menor que 100 vezes o diâmetro equivalente (CARVALHO, R., 2005).

Uma das fibras mais utilizadas atualmente é a fibra de vidro, uma vez que apresentam boas características em relação a outros sintéticos como, alta resistência à tração, possui alta resistência específica e inércia química tornando-o útil em diversos ambientes corrosivos quando incorporado em uma matriz polimérica, é um material de fácil disponibilidade e de menor custo (CALLISTER Jr., 2016).

Para Marinelli (2008) o emprego de fibras sintéticas como reforço vem recebendo atenção especial a respeito da problemática ambiental, principalmente quando se trata da não biodegradabilidade e a difícil reciclagem desses materiais, o que proporciona um elevado volume de resíduos depositados nos lixões ou até mesmo descartados na própria natureza. Segundo Neira (2005) a busca crescente por alternativas tecnológicas que sejam menos nocivas ao meio ambiente tem motivado inúmeros pesquisadores a desenvolver produtos sustentáveis.

Como alternativa aos materiais sintéticos, gradativamente as fibras vegetais surgem como uma opção no emprego de reforço em compósitos poliméricos, pois apresentam inúmeras vantagens, são biodegradáveis, oriundas de fontes renováveis, são menos abrasivas, possuem baixa densidade e alta deformabilidade (MARINELLI, 2008). Outro fator a considerar é o fator econômico, uma vez que, as fibras vegetais como a de sisal apresentam um valor em média dez vezes menor que as fibras de vidro (CERCHIARO, 2010).

As fibras naturais podem ser oriundas de diversas partes do vegetal, podendo ser extraídas do fruto (coco), do caule (linho, juta), das folhas (sisal, curauá, piaçava) e da semente (algodão), fibras provenientes das folhas e do caule são conhecidas como as mais duras, portanto são as mais utilizadas como material de reforço em compósitos poliméricos (SILVA. R., 2003). De acordo com Carvalho, R. (2005) os principais componentes químicos das fibras vegetais são a celulose, lignina e hemicelulose, além de apresentarem pequenas partes de açúcares livres, proteínas, extrativos e produtos inorgânicos. Dentre o emprego de fibras vegetais para a utilização como reforço em materiais compósitos poliméricos, a fibra de sisal apresenta-se como uma das mais mencionadas nas literaturas nas últimas décadas (NETO; PARDINI, 2006).

A Tabela 2 expõe as propriedades de algumas fibras naturais mais conhecidas no Brasil.

Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais.

Tipo de fibra	σ_t (MPa)	E (GPa)	ε_t (%)	ρ (g/cm ³)
Sisal	126 – 800	3,80 – 62,0	2,8 – 10,0	1,27 – 1,50
Coco	95 – 149	2,80 – 13,7	3,3 – 5,1	1,18 – 1,45
Juta	320 – 500	12,0 – 100	1,3 – 2,8	1,50
Malva	160	17,4	5,2	1,41
Rami	393 – 900	7,30 – 25,0	1,8 – 5,3	1,51
Piaçava	143	5,60	5,9	1,05

Fonte: Neto e Pardini (2006), adaptado pelos autores.

O sisal é um vegetal de muita importância para fins comerciais, às fibras de sisal são extraídas das folhas da planta de nome científico *Agave sisalana*, seu cultivo está voltado para a indústria de cordoarias e artesanato, mas pode ter seu valor agregado multiplicado pelo uso como reforço na aplicação de materiais compósitos poliméricos. As fibras lignocelulósicas de sisal são leves, atóxicas apresentam elevado módulo e resistência específica, seu valor econômico é dez vezes menor quando comparado as fibras de vidro, diferentemente das fibras sintéticas causam menos danos por abrasão, seu cultivo é abundante no Brasil, é uma fibra biodegradável por ser proveniente de fonte natural, além de serem bons isolantes térmicos e acústicos (ANGRIZANI, 2006). As fibras de sisal, assim como, outras fibras vegetais

utilizadas como reforço de compósitos poliméricos apresentam algumas desvantagens, pois são de natureza polar e hidrofílica, além de serem propensas a ataques de fungos e bactérias (VIEIRA, 2008).

O sisal (*Agave sisalana*) é um vegetal que tem sua origem na península do Yucatã, no México. No Brasil, seu cultivo se concentra na região Nordeste, tendo como produtores os estados da Bahia (36 municípios), Paraíba (19 municípios), Rio Grande do Norte (4 municípios) e Ceará (1 município), com 95,8%, 3,5%, 0,3% e 0,4% da produção nacional respectivamente (EMBRAPA, 2019). A extração do sisal, geralmente, é realizada por áreas de pequenos produtores, tendo como predominância o trabalho familiar, servindo assim como uma importante fonte de renda e colaborando para a fixação do homem na região semiárida nordestina (SILVA, F., 2008). A planta que dá origem ao sisal é mostrada na Figura 3.

Figura 3 – Planta de sisal (*Agave Sisalana*).



Fonte: Embrapa (2011).

Segundo Milanese (2008) as fibras de sisal são agrupadas nas chamadas fibras estruturais, cuja função é proporcionar rigidez e sustentação as folhas. O período de modificação do sisal em fios naturais tem início aos 3 anos de vida da planta, em média as fibras representam cerca de 4 a 5% da massa bruta da folha, sua extração é realizada a cada 6 meses durante seu ciclo de vida cuja o período é de 6 a 7 anos (CORREIA, 2011).

De uma planta de sisal são produzidas cerca de 200 a 250 folhas e cada folha fornece cerca de 700 a 1400 fibras em média, com comprimento variando de 1,20 a 1,60 metros. O processo de obtenção das fibras de sisal, apresentado na Figura 4, ocorre a partir das seguintes etapas: corte (feito próximo ao tronco) (a), desfibramento (esmagamento das folhas realizado por máquinas com rotores) (b), lavagem (as fibras são imersas em tanques ao fim do dia e permanecendo durante a noite), secagem (as fibras são levadas pela manhã aos varais para secagem ao Sol) (c) e batimento (realizado para a remoção do parênquima que envolve as fibras através de bateadeiras) (d), por fim as fibras são classificadas para posteriormente serem acomodadas em fardos para transporte (e) (CARVALHO, R., 2005; VIEIRA, 2008; EMBRAPA, 2011).

Figura 4 – Processo de extração e beneficiamento do sisal.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Fonte: Embrapa (2011).

Após os processos de beneficiamento as fibras de sisal são destinadas a diversas finalidades, na indústria de cordoaria para produção de fios, para revestimento de paredes de automóveis em substituição as fibras de vidro, em materiais de estofamentos e produtos ornamentais como artesanatos (MILANESE, 2008).

2.3.1 Tecidos

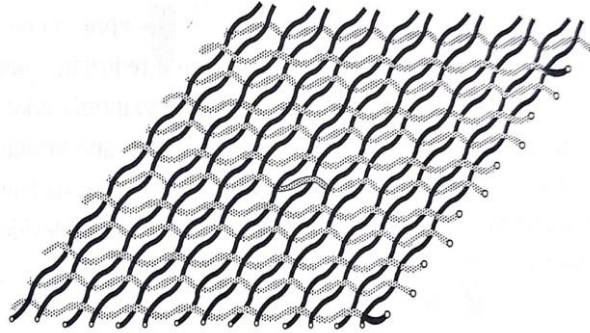
Segundo Carvalho, R. (2005) reforços fibrosos para fins estruturais, a disposição das fibras é de extrema importância, pois exerce grande influência nas propriedades dos compósitos, entretanto, é apropriado que as fibras estejam dispostas no sentido principal de atuação dos esforços nas estruturas, uma das formas de realizar o alinhamento das fibras é através dos tecidos.

Os tecidos são produzidos por teares automatizados ou manuais, os quais são constituídos basicamente por urdume, que se dispõe longitudinalmente da trama disposta transversalmente e de um dispositivo de compactação denominado de pente. Basicamente existem três tipos de telas que originam os tecidos, tecido tipo plano e suas variações (*basket*, *basket 2x2*, *oxford*, *leno* e *mock -leno*), cetim (*4 harness satin*, *12 harness satin*) e diagonal (NETO; PARDINI, 2006).

O tipo de tela plano e suas variações como o *basket* são a forma mais simples de todos os tecidos de reforço estrutural, o tecido *basket* é caracterizado pelos cabos entrelaçamento dos fios ou fibras nos sentidos do urdume e da trama de forma alternada em

cada coluna ou linha. A Figura 5 ilustra com detalhes o procedimento de criação do tecido (NETO; PARDINI, 2006).

Figura 5 – Modelo de tecido plano (*plain*).



Fonte: Neto e Pardini (2006).

2.3.2 Tratamento das Fibras

A boa interação entre fibra-matriz é significativa para a aplicação de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos. Uma das desvantagens do uso de fibras lignocelulósicas é a baixa adesão entre fibras e matrizes, pois as fibras vegetais são de natureza hidrofílica ao contrário dos polímeros comumente usados como matrizes que são de caráter hidrofóbico, a baixa conexão entre esses materiais, resulta em uma fraca interface fibra-matriz (D'ALMEIDA, 2005).

Diversos métodos de tratamentos químicos e físicos podem ser aplicados para promover uma melhor adesão entre a fibra e matriz e, portanto, promover melhor desempenho dos compósitos produzidos com fibras vegetais. Segundo Li *et al.* (2000 apud CARVALHO, R., 2005) os métodos de tratamentos usualmente aplicados em fibras são, introdução de agentes acoplantes como os silanos, gratificação com peróxidos, tratamentos com álcalis ou permanganatos e tratamentos térmicos.

De acordo com estudos realizados por Iozzi, Martins e Mattoso (2004) sobre a influência da fibra de sisal nas propriedades dos compósitos de borracha nitrílica foi observado que após o tratamento térmico das fibras de sisal, a aderência foi superior na matriz em comparação às fibras *in natura*, o processo de tratamento eliminou grande parte resíduos indesejáveis da superfície das fibras provenientes do beneficiamento, além de remover células do parênquima tornando as fibras mais rugosas, melhorando a aderência entre fibra-matriz.

2.4 MATRIZES POLIMÉRICAS

A matriz de um material compósito é o elemento principal de proteção das fibras contra o contato a agentes exteriores, como também o responsável pela distribuição de tensões entre as mesmas. Outras características altamente influenciadas pelas matrizes são os parâmetros de resistência dos compósitos, tais como a resistência à compressão, cisalhamento, bem como propriedades químicas e físicas. Nesse sentido, a escolha de uma matriz para um determinado compósito precisa levar em consideração o estudo de vários critérios e fatores relevantes (AGARWAL; BROUTMAN, 2006). Callister Jr. (2016) salienta a importância do módulo de elasticidade da fibra (reforço) ser muito maior do que a matriz.

As matrizes poliméricas são constituídas por dois tipos: termorrígidas e termoplásticas. Por apresentar grandes características como: resistência mecânica, química e a umidade, as termorrígidas são responsáveis pela maior demanda em matrizes para compósitos estruturais. Possui processo de cura irreversível por ter em seu estado endurecido uma estrutura tridimensional que é inalterável. Os polímeros termoplásticos tem se mantido como uma alternativa em aplicações estruturais, por apresentar propriedades diferenciadas dos termorrígidos como: maior tenacidade à fratura, maior resistência ao impacto e capacidade de tolerar danos. Entretanto as matrizes poliméricas termorrígidas ou termoplásticas ainda são restritas quando observadas as limitações de temperatura suportada em serviço (100 a 300 °C), e a baixa tenacidade à fratura (0,10 a 5 kJ/m²), sendo muito inferior quando comparados aos dos aços em geral (>50 kJ/m²) (NETO; PARDINI, 2006).

De acordo com Monteiro *et al.* (2012) a degradação dos compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais pode ser influenciada pela temperatura (estabilidade térmica), onde o ambiente de fabricação pode acarretar efeitos prejudiciais as fibras. No caso dos termorrígidos, a temperatura de cura é um fator limitante. Enquanto que para as matrizes termoplásticas, a temperatura de extrusão determina o limite.

De forma a esclarecer quaisquer equívocos, alguns sistemas de polímeros reforçados por fibras (FRP), a função do material adesivo é garantida a priori pelas matrizes (sistemas de impregnação *in-situ*), e tal utilização do termo adesivo, de um modo geral, aplica-se a materiais compósitos pré-fabricados (CARVALHO, T., 2010).

No Quadro 1 são apresentados as principais características e limitações das resinas termorrígidas mais comumente utilizadas, conforme Lopes (2011).

Quadro 1 – Resinas termorrígidas - características e limitações.

(continua)

Resinas	Características	Limitações
Epóxi	Excelente propriedade em compósitos	Longos ciclos de cura
	Muito boa resistência química e propriedades elétricas	
	Boas propriedades térmicas	Melhores propriedades obtidas em altas temperaturas de cura
	Baixa contração na cura	
Fenólica	Ótimas propriedades térmicas	Cor
	Boa resistência ao fogo	
	Boas propriedades elétricas	
Poliéster	Amplamente utilizada	Emissão de estireno
	Fácil uso	
	Cura a temperatura ambiente	Contração durante a cura
	Ótimas propriedades em compósitos	
	Boa resistência química	Inflamável
	Boas propriedades elétricas	
Poliamida	Excelentes propriedades térmicas	Cor
	Boas propriedades em compósitos	
	Boa resistência ao fogo	
	Boas propriedades elétricas	
Poliuretano	Boas propriedades em compósitos	Cor
	Muito boa resistência química	
	Alta dureza (resistência ao impacto)	Isocianetos como agentes de cura
	Boa resistência à abrasão	
Silicone	Ótimas propriedades térmicas	Adesão
	Excelente resistência química	
	Ótimas propriedades elétricas	Longos ciclos de cura
	Resistente à hidrólise e oxidação	
	Boa resistência ao fogo	Cura somente a altas temperaturas
	Não tóxico	

(conclusão)

Resinas	Características	Limitações
Vinil Éster	Boa resistência à fadiga	Emissão de estireno
	Excelentes propriedades em compósitos	Contração durante a cura
	Muito boa resistência química	Inflamável
	Boa dureza	

Fonte: Lopes (2011), adaptado pelos autores.

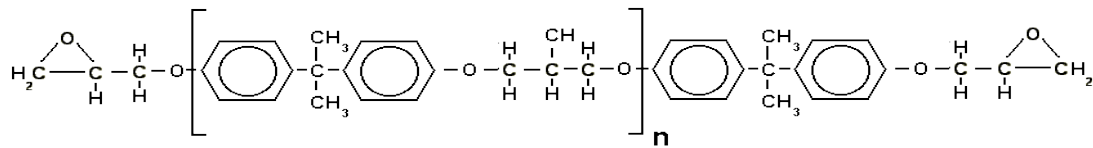
2.4.1 Resinas Epóxi

Carvalho, R. (2005) descreve as resinas epóxicas como polímeros comerciais derivados de petróleo capazes de formar ligações entre cadeias às poliméricas, lhe conferindo propriedades estruturais como alta resistência mecânica, resistência à umidade, estabilidade química, resistência a abrasão e ao impacto, permanecendo estável dimensionalmente no processo de polimerização e quando submetidos a ações de longa duração, além da capacidade de ser moldado a frio. Relata ainda que alguns estudos obtiveram excelentes resultados quanto à adesividade entre a resina e materiais celulósicos. Possui comportamento mecânico inalterado com temperaturas até 60 °C e em sistemas especiais podem ser manter as mesmas características a temperaturas até os 200 °C.

A American Society for Testing and Materials (ASTM) por meio da ASTM D1763-94 – Standard Specification for Epoxy Resins, classifica as resinas epóxi em seis tipos, das quais três tipos são comercialmente mais utilizados:

- 1) Resina Epóxi à base de Bisfenol A (DGEBA): são as mais utilizadas, pois são versáteis e de menor custo, provenientes da reação de Epiclorigrina e Bisfenol A, podendo ser líquidas, semissólidas ou sólidas, dependendo do peso molecular (SILAEX, 2019). A Figura 6 apresenta a geometria molecular da resina epóxi.

Figura 6 – Geometria molecular – Epicloridrina e Bisfenol A.



Fonte: Silaex (2019).

- 2) Resina Epóxi à base de Bisfenol F: a substituição do Bisfenol A pelo Bisfenol F propiciam as resinas epóxi maior numero de ligações cruzadas (*cross-link*) e melhor desempenho mecânico, químico e térmico, principalmente quando curado com aminas aromáticas ou anidridos (SILAEX, 2019).
- 3) Resina Epóxi Bromadas: são resinas à base de Epicloridrina, Bisfenol A e Tetrabromobisfenol A, com essas quatro moléculas adicionais de bromo, concede às resinas a característica de não propagação de chamas (SILAEX, 2019).

De acordo com a FIB (2001 apud CARRAZEDO, 2005) as resinas epóxicas apresentam diversas vantagens sobre outros polímeros para serem utilizadas como adesivo na engenharia civil:

- boa molhabilidade;
- alta atividade superficial;
- quando formuladas podem ter um longo tempo em aberto (*Pot life*);
- alta resistência coesiva;
- reduzida retração e adesão de grandes áreas reforçadas apenas com pressão de contato;
- baixa fluência e retenção de carregamento em longo prazo;
- características tixotropicas quando há necessidade de aplicação em superfícies verticais;
- podem acomodar irregularidades com espessuras consideráveis.

A Tabela 3 apresenta as propriedades típicas das resinas epóxi curadas a frio.

Tabela 3 – Propriedades típicas das resinas epóxi curadas a frio.

Propriedades a 20 °C	
Densidade (kg/m ³)	1100 – 1700
Módulo de Elasticidade (GPa)	0,50 – 20
Módulo de Cisalhamento (GPa)	0,2 a 8
Coefficiente de Poisson	0,3 a 0,4
Resistência à tração (MPa)	9 – 30
Resistência ao cisalhamento (MPa)	10 – 30
Resistência à compressão (MPa)	50 – 110
Deformação última de tração (%)	0,50 – 5
Energia de Fraturamento (J/m ²)	200 – 1000
Coefficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ /°C)	25 – 100
Absorção de Água aos 7 dias – 25°C (%w/w)	0,10 – 3
Temperatura de transição vítrea (°C)	45 – 80

Fonte: FIB (2001 apud CARRAZEDO, 2005).

3 METODOLOGIA

No presente capítulo são apresentados todos os métodos, materiais e processos de ensaios realizados para avaliação dos reforços propostos.

3.1 MATERIAIS EMPREGADOS

3.1.1 Madeira

A madeira utilizada nessa pesquisa é denominada comercialmente de Andiroba. Por apresentar boas características é recomendada para diversas aplicações como móveis e peças decorativas, na construção civil é largamente utilizada em elementos internos como portas, forros e rodapés, pode também ser aplicada na construção naval entre outros fins.

A classificação botânica da espécie a inclui entre as gimnospermas no grupo das dicotiledôneas e na família das Meliaceae, tendo como nome científico *Carapa guianensis* Aubl. A andiroba tem ocorrência principalmente no estado que compõem a floresta amazônica e algumas partes do nordeste (GONZAGA, 2006).

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2019) descreve no seu portal todas as propriedades físicas e mecânicas da espécie, as quais estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades físicas e mecânicas da andiroba.

Propriedades Físicas		
Densidade aparente	ρ_{ap} (15%)	720 kg/m ³
Densidade básica	$\rho_{básica}$	590 kg/m ³
Contração Radial	-	4,3%
Contração Tangencial	-	7,4%
Contração Volumétrica	-	13,4%
Propriedades Mecânicas		
Flexão	f_M (15%)	102,4 MPa
Compressão paralela às fibras	f_{c0} (15%)	54,10 MPa
Tração normal às fibras	f_t 90 (verde)	6,5 MPa
Cisalhamento	f_v (verde)	9,6 MPa
Módulo de elasticidade	E_{c0} (verde)	14190 MPa

Fonte: IPT (2019), adaptado pelos autores.

A madeira utilizada nesta pesquisa foi doada pela Casa Bella – Tucuruí e a produção dos corpos de prova foi realizada na marcenaria da mesma empresa.

3.1.2 Resina Epoxídica

Produzida pela Huntsman, a resina epóxi utilizada na preparação dos compósitos tem designação comercial de Araldite® GY 250, adquirida na Centerglass Indústria e Comércio Resina e Fibras de Vidro Ltda. De acordo o fabricante trata-se de uma Resina epóxi líquida não modificada baseada em Bisfenol A.

Ideal para ser aplicada em laminados com fibras especiais (fibra de carbono ou fibra de vidro), revestimentos de pisos industriais, artesanatos e aplicação de colas. Possui excelentes propriedades mecânicas e boa resistência química, modificáveis dentro de amplos limites com a seleção adequada de endurecedores e materiais auxiliares. Por ser muito versátil, é indicada para sistema de cura a temperatura ambiente ou a calor. Desenvolvida para misturas com proporção em 2:1 de resina e endurecedor respectivamente (HUNTSMAN; 2019).

A Tabela 5 mostra todas as informações técnicas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5 – Especificações técnicas da resina epóxi.

Araldite® GY 250 – Resina epóxi líquida não modificada baseada em Bisfenol A		
Estado Físico	-	Líquido Claro
Viscosidade a 25 °C (ISO 12058-1)	mPa.s	10.000 – 12.000
Equivalente Epóxi	g/Eq	183 - 189
Teor Epóxi	eq/Kg	5,30 – 5,45
Cor (Gardner)	-	≤ 2
Peso específico a 25 °C	g/cm ³	1,17

Fonte: Huntsman (2019), adaptado pelos autores.

3.1.3 Sisal

As fibras de sisal foram adquiridas da Sisalsul Fibras Naturais sem qualquer tipo de tratamento pós-extração (*in natura*). O comprimento das fibras apresentou variações entre 30 a 80 cm. A Figura 7 mostra as fibras em seu estado natural.

Figura 7 – Fibras de sisal adquiridas para o estudo.



Fonte: Autores (2019).

3.2 PROCESSAMENTO DOS MATERIAIS

3.2.1 Produção dos corpos de prova

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) por meio da ABNT NBR 7190:1997, que trata sobre Projeto de estruturas de madeira, prescreve todas as características que os corpos de prova devem obedecer quanto às dimensões, região a ser extraída e disposição das fibras conforme cada tipo de corpo de prova. Antes do corte da madeira, o teor de umidade foi verificado com auxílio do aparelho DL 2000 da Digisystem, o qual registrou um teor de umidade de 14,9%, conforme observado na Figura 8.

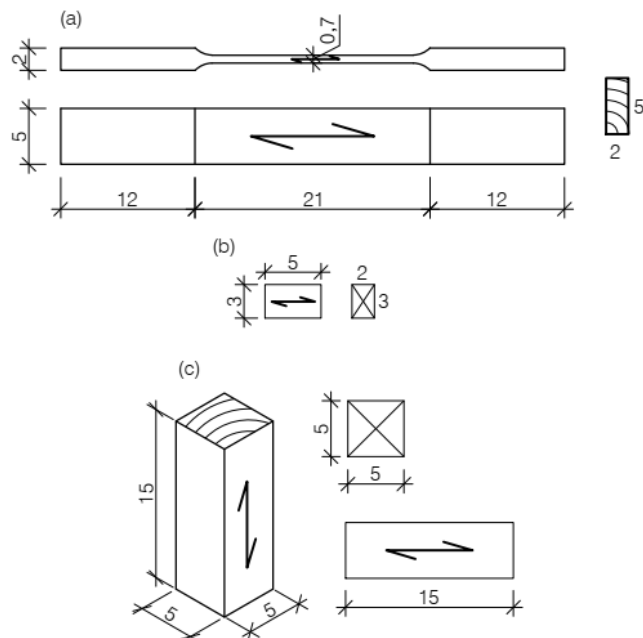
Figura 8 – Medição de umidade da madeira.



Fonte: Autores (2019).

No processo de corte dos corpos-de-prova foi utilizado uma serra circular de bancada para a extração e para o acabamento e estreitamento da seção transversal, uma plaina de mesa e uma tupa de bancada. A ABNT NBR 7190:1997 apresenta os formatos dos corpos de prova para cada tipo de ensaio, as quais são ilustradas na Figura 9.

Figura 9 – Corpo de prova de tração.



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997), adaptado pelos autores.

(a) Tração paralela às fibras (b) densidade e teor de umidade (c) compressão paralela às fibras

Para que o ensaio de teor de umidade apresentasse resultados satisfatórios, os corpos de prova foram acomodados em sacos plásticos, conforme Figura 10, evitando-se a perda de umidade para o meio.

Figura 10 – Corpos de prova lacrados em sacos plásticos.



Fonte: Autores (2019).

Os CPs foram separados para cada ensaio, conforme exigido no Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, sendo dezoito amostras para o ensaio de tração, sete de compressão, dezoito amostras para os respectivos ensaios: teor de umidade, densidade básica e densidade aparente.

3.2.2 Tratamento térmico das fibras

O tratamento em fibras vegetais pode agregar ao compósito e, conseqüentemente, ao sistema de reforço estrutural, melhores características mecânicas. Tal tratamento é difundido por várias pesquisas e resultados positivos já foram encontrados.

Nesse sentido, foi separada uma porção de fibras e lavadas em água destilada por 1h à temperatura de 80 ± 2 °C como mostrado nas Figuras 11 e 12, e em seguida secas em estufa durante 6h, a 60 °C.

Figura 11 – Tratamento térmico nas fibras de sisal.



Fonte: Autores (2019).

Figura 12 – Fibras de sisal pós-tratamento.



Fonte: Autores (2019).

3.2.3 Desenvolvimento dos tecidos

Observando literaturas que já desenvolveram trabalhos no mesmo sentido, alguns autores como os trabalhos de Carvalho, R. (2005) e Alves *et al.* (2014) utilizaram tecidos pré-fabricados nas fabricações dos compósitos a serem estudados. Segundo Cerchiaro (2010), tal prática possui algumas características que podem comprometer o desempenho do compósito, como o fato dos tecidos serem produzidos com fios torcidos e tratados com óleos e corantes, assim como não permitir a fabricação de laminados com espessura inferior a 4 mm e a dificuldade de absorção pelas fibras.

Desta forma, umas das alternativas é a fabricação de tecidos com teares manuais. Cerchiaro (2010), Francklin *et al.* (2019) e Silva, C. *et al.* (2009) utilizaram em seus estudos tecidos de sisal fabricados manualmente, os quais apresentaram melhor uniformidade e espessuras menores (até 1 mm).

Para a fabricação do tecido foram separados para cada mecha, que compõe as urdiduras² e as tramas, 20 fios de sisal, agrupados segundo os comprimentos dos fios. Vale ressaltar que foram executados tecidos de fibras com e sem tratamento. As Figuras 13 e 14 ilustram o processo para obtenção dos tecidos.

Figura 13 – Processo de tecelagem do tecido de sisal.



Fonte: Autores (2019).

² Urdiduras é o conjunto de fios dispostos longitudinalmente no tear e pelos quais passa o fio da trama.

Figura 14 – Tecido de sisal finalizado.



Fonte: Autores (2019).

3.2.4 Reforço com Sisal/Epóxi.

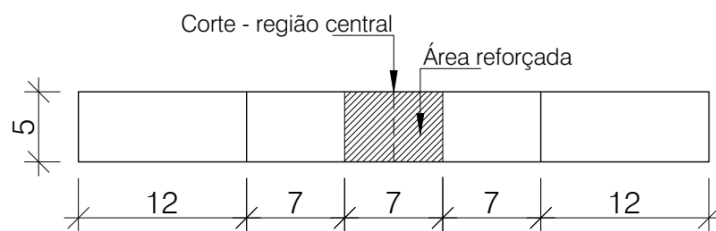
Com o objetivo principal de avaliar a eficiência do compósito (sisal/epóxi) como elemento de reforço em estruturas de madeira, procurou-se elaborar um sistema que pudesse simular tal eficiência, com bom comportamento mecânico quando submetido a carregamentos.

Ao pesquisar trabalhos produzidos que colaborassem para uma metodologia mais apropriada, foram encontrados os estudos de Mohamad, Accordi e Roca (2011) e Rosa (2017) os quais apresentavam formulações diferentes quanto ao formato de reforço e o material a ser reforçado. Os resultados obtidos nos ensaios consultados também foram decisivos para a escolha de qual metodologia seguir. Por ter apresentado resultados mais satisfatórios, neste trabalho tomou-se como base o formato aplicado por Mohamad; Accordi e Roca (2011), onde há a separação na região central dos corpos de prova.

O processo de aplicação do reforço nos corpos-de-prova de tração foi dividido em duas fases: a) os corpos de prova a serem reforçados foram cortados na região central e a

ligação entre as duas partes do mesmo corpo de prova foi feita por meio do tecido/resina com comprimento e largura de 7 x 5 cm, apresentado nas Figuras 15 e 16, proposto por Fiorelli (2002) e seguido por Mohamad, Accordi e Roca (2011), b) consolidação simultânea (Figura 17), enquanto a resina passa pelo processo de cura o compósito é consolidado sobre a madeira. A vantagem deste procedimento é a redução do número de operações necessárias (CARVALHO, R., 2005).

Figura 15 – Esquema de corte e reforço do corpo de prova.



Fonte: Autores (2019).

Figura 16 – Corte da região a ser reforçada.



Fonte: Autores (2019).

Figura 17 – Laminação do compósito.



Fonte: Autores (2019).

Após a preparação dos reforços, as amostras foram armazenadas em local com temperatura ambiente ($\approx 28\text{ }^{\circ}\text{C}$) sem influência de umidade, aguardando no mínimo sete dias de cura até os ensaios mecânicos.

3.3 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS

3.3.1 Propriedades Físicas

3.3.1.1 Umidade

Com o intuito de averiguar as condições de umidade do lote de madeira a ser utilizado no estudo, procedeu-se com determinação do teor de umidade da madeira, conforme descrito no Anexo B da ABNT NBR 7190:1997.

A determinação do teor de umidade é dada pela razão entre a massa de água contida na madeira e sua massa seca, dada pela equação (ABNT NBR 7190:1997):

$$U (\%) = \frac{M_i - M_s}{M_s} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

U é o teor de umidade, em porcentagem;

M_i é a massa inicial da madeira, em gramas;

M_s é a massa seca da madeira, em gramas.

O procedimento consistiu em medir a massa dos corpos de prova, como ilustrado na Figura 18, que até o momento do ensaio estavam lacrados em um saco plástico. Logo em seguida todas as amostras foram colocadas na estufa com temperatura de $103\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

Figura 18 – Pesagem dos corpos de prova.



Fonte: Autores (2019).

Conforme determina a ABNT NBR 7190:1997, foram feitas medições de massa a cada 6 horas, pesadas em balança eletrônica com precisão de 0,01g, até que ocorresse variação entre duas medidas consecutivas, menor ou igual a 0,5% da última medida. Seguindo as orientações, foram calculadas as umidades das amostras e posterior obtenção da média delas.

3.3.1.2 Densidade Aparente

Os procedimentos adotados para determinação da densidade aparente das amostras retiradas da madeira obedecem aos requisitos apresentados no anexo B da ABNT NBR 7190:1997. A mesma define como uma massa específica convencional, expressada pela razão entre a massa e o volume do corpo de prova com teor de umidade de 12% é dada pela Equação 2:

$$\rho_{ap} = \frac{M_{12}}{V_{12}} \quad (2)$$

Onde:

ρ_{ap} é a densidade aparente;

M_{12} é a massa da madeira a 12% de umidade, em quilogramas;

V_{12} é o volume da madeira a 12% de umidade, em metros cúbicos.

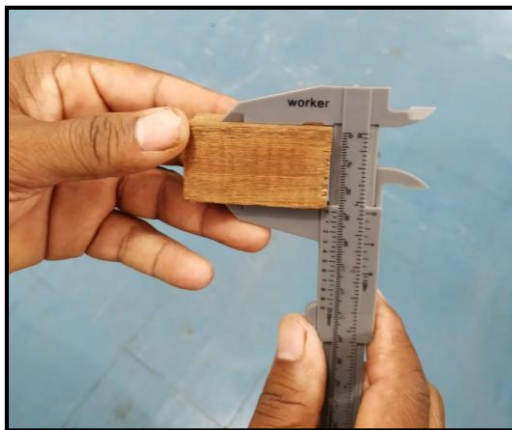
Por ter havido limitações para executar as medições de massa e volume com teor de umidade de 12%, os corpos de prova foram medidos com o teor aproximado de 15% e calculados as densidades de cada amostra e posterior obtenção da média. Para efetuar tais medições utilizou-se uma balança eletrônica com precisão de 0,01g e paquímetro manual universal com precisão 0,1mm, conforme apresentado nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Balança utilizada nas medições.



Fonte: Autores (2019).

Figura 20 – Medição com paquímetro manual.



Fonte: Autores (2019).

3.3.1.3 Densidade Básica

Ainda conforme a ABNT NBR 7190:1997 em seu anexo B, como uma massa específica convencional, dada pela razão entre a massa seca e o volume saturado é obtida pela Equação 3:

$$\rho_{\text{básica}} = \frac{M_s}{V_{\text{sat}}} \quad (3)$$

Onde:

$\rho_{\text{básica}}$ é a densidade básica;

M_s é a massa seca da madeira, em quilogramas;

V_{sat} é o volume da madeira saturada, em metros cúbicos.

Seguindo o procedimento apresentado na norma, os corpos de prova separados para o referido ensaio foram secos em estufa, conforme procedimento já descrito anteriormente, com intuito de determinar a massa seca. Logo em seguida os mesmos foram submerso em água dentro de um recipiente de plástico, conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Saturação dos corpos de prova.



Fonte: Autores (2019).

O volume saturado foi obtido através das dimensões finais dos corpos de prova após medições de massa a cada 6h até que a massa não se alterasse ou apresentasse variação

inferior ou igual a 0,5% em relação a anterior. As medidas foram efetuadas com auxílio de um paquímetro manual universal com precisão 0,1mm.

3.3.2 Propriedades Mecânicas

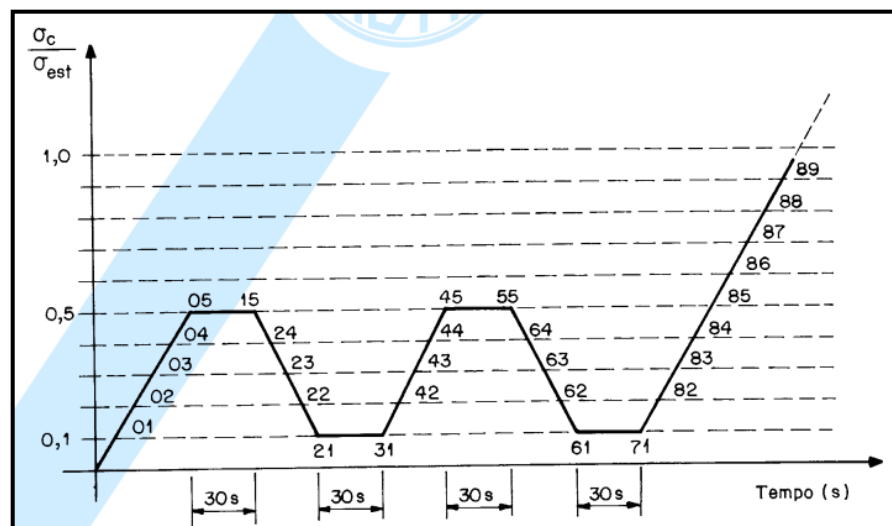
3.3.2.1 Compressão paralela às fibras

A metodologia para o ensaio seguiu o previsto na ABNT NBR 7190:1997 que especifica todo procedimento para determinação da resistência a compressão paralela às fibras e do módulo de elasticidade.

Separados os corpos de prova para o ensaio, todos isentos de defeitos, como indicado na norma, procederam-se inicialmente com o ensaio destrutivo de uma amostra com o intuito de conhecer a resistência à compressão estimada ($f_{c0,est}$).

Conhecida a resistência estimada da amostra, a norma estabelece que seja aplicado uma carga monotônica de 10 MPa/min, em dois ciclos de carga e descarga, conforme ilustrado na Figura 22. A prensa utilizada no referido ensaio é do modelo 300 D 74 - Wolpert.

Figura 22 – Diagrama de carregamento para determinação da rigidez da madeira a compressão



Fonte: ABNT NBR 7190 (1997).

Para determinação do módulo de elasticidade foram utilizados potenciômetros interligados ao leitor ADS 2002 – Lynix, no qual foram registradas todas as leituras para

posterior tratamento. Tais leituras são prescritas na norma, na qual se devem registrar no último ciclo de carga tensões e deformações nos trechos referentes a 10% e 50%.

A Figura 23 demonstra o procedimento de ensaio dos corpos de prova para determinação das propriedades de rigidez e resistência a compressão paralela às fibras.

Figura 23 – Ensaio de compressão paralela às fibras.

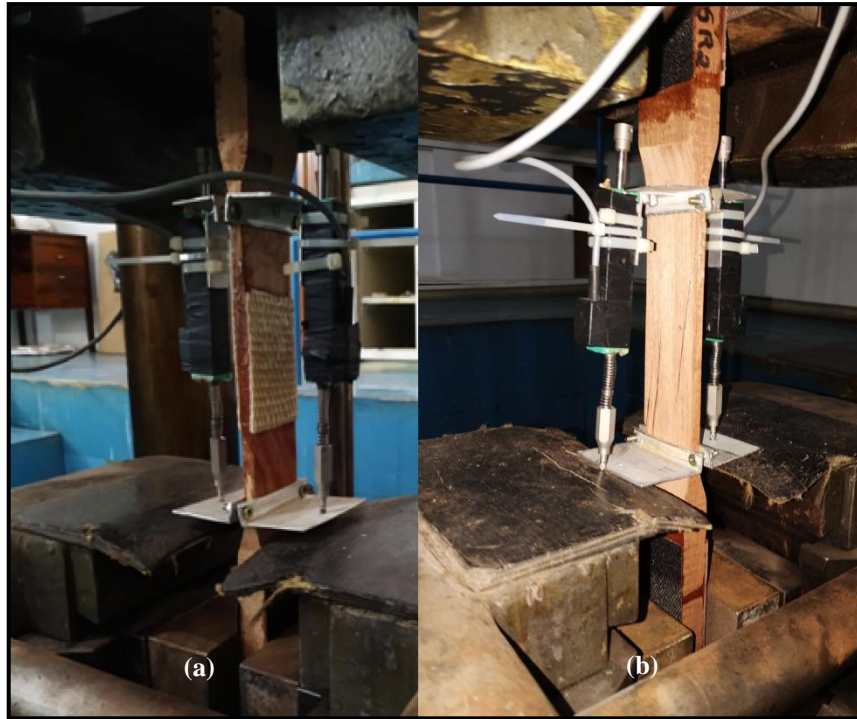


Fonte: Autores (2019).

3.3.2.2 Ensaio de tração paralela reforçadas com compósitos (Sisal/Epóxi)

Os corpos de prova foram submetidos a ensaios destrutivos com utilização da prensa de tração do modelo 100 TUZ 643 - Wolpert, com carga compatível a deformação constante de 2 mm/min (ASTM D3039/D3039M, 2000), conforme procedimento adotado por Fiorelli (2002) e Mohamad, Accordi e Roca (2011). As deformações foram registradas com auxílio de potenciômetros e monitoradas com ADS 2002 – Lynix. A Figura 24 apresenta o ensaio de tração em corpos de prova sem reforço e reforçados com compósitos.

Figura 24 – Corpos de prova sendo ensaiados à tração.



Fonte: Autores (2019).

(a) ensaio com reforço (b) ensaio sem reforço

Durante a realização dos testes iniciais, foram observadas algumas deficiências na aderência dos corpos de prova com as garras da prensa. Para diminuir ou até eliminar os efeitos de deslizamento durante o ensaio, foram coladas lixas nos contatos dos corpos de prova e as garras.

3.3.3 Análise estatística

Os tratamentos estatísticos foram aplicados apenas às amostras com reforço utilizando compósitos com fibras naturais e tratadas termicamente. Para a análise estatística tomou-se como base as avaliações os testes de ANOVA para verificar a igualdade dos resultados e o teste de Bartlett com intuito de comparar as variâncias (MONTGOMERY; RUNGER, 2003). Todos os testes tiveram como objetivo analisar a influência do tratamento térmico na resistência mecânica. Como a amostra era muito pequena não foi possível analisar a normalidade dos resultados em grupos baseado no teste de Anderson-Darling, apenas dos resíduos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais e discussões referentes às propriedades da espécie de madeira utilizada e os reforços estruturais com compósitos com tecido de sisal e resina epóxi, sendo seis corpos de prova de referência (sem reforço - SR), seis reforçados com compósitos elaborados com fibras naturais (reforço natural - RN) e seis reforçados com fibras submetidas a tratamento térmico (reforço tratado - RT). Ao final, os dados obtidos no programa experimental serão testados estatisticamente, para comparação de resultados.

4.1 AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA ESPÉCIE DE MADEIRA

4.1.1 Densidade Básica e Aparente

Os dados referentes às massas e volumes dos corpos-de-prova foram coletados cuidadosamente, conforme requerido pela norma brasileira. As Tabelas 6 e 7 descrevem todos os resultados calculados relativos às densidades básica e aparente respectivamente.

Tabela 6 – Resultados de densidade básica.

CP	Volume Saturado (cm ³)	Massa Seca (g)	$\rho_{\text{básica}}$ (g/cm ³)
CP1-B	30,452	18,12	0,595
CP2-B	30,250	17,97	0,594
CP3-B	31,347	18,71	0,597
CP4-B	30,416	19,79	0,651
CP5-B	31,441	18,76	0,597
CP6-B	30,742	18,48	0,601
Média			0,606
Desvio Padrão			0,022
Coeficiente de variação (%)			3,65

Fonte: Autores (2019).

Tabela 7 – Resultados de densidade aparente.

CP	Volume – 15% (cm ³)	Massa – 15% (g)	ρ_{Aparente} (g/cm ³)
CP1-A	29,940	21,24	0,709
CP2-A	29,659	21,84	0,736
CP3-A	30,239	21,00	0,694
CP4-A	30,150	22,37	0,742
CP5-A	29,836	21,14	0,709
CP6-A	28,675	20,69	0,722
Média			0,719
Desvio Padrão			0,018
Coeficiente de variação (%)			2,52

Fonte: Autores (2019).

Observando os dados, as densidades possuem valores coerentes e bem aproximadas aos disponibilizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2019), onde a densidade aparente é de 0,72 g/cm³ e 0,59 g/cm³ para densidade básica. Martins *et al.* (2017) em estudo no Sudeste Paraense (Paragominas), obteve em seu ensaio de densidade básica o valor de 0,54 g/cm³. Tal diferença pode estar correlacionado a região onde as espécies foram estudadas e condições dos lotes de madeira. É possível notar também a homogeneidade nos resultados obtidos, visto que os mesmos apresentaram desvio padrão muito baixo e consequentemente um coeficiente de variação pequeno.

4.1.2 Teor de umidade

Todas as amostras permaneceram lacradas em saco plástico até serem submetidas ao processo de secagem em estufa. Na Tabela 8 estão apresentadas as leituras de massas para obtenção dos respectivos teores de umidade.

Tabela 8 – Resultados do teor de umidade.

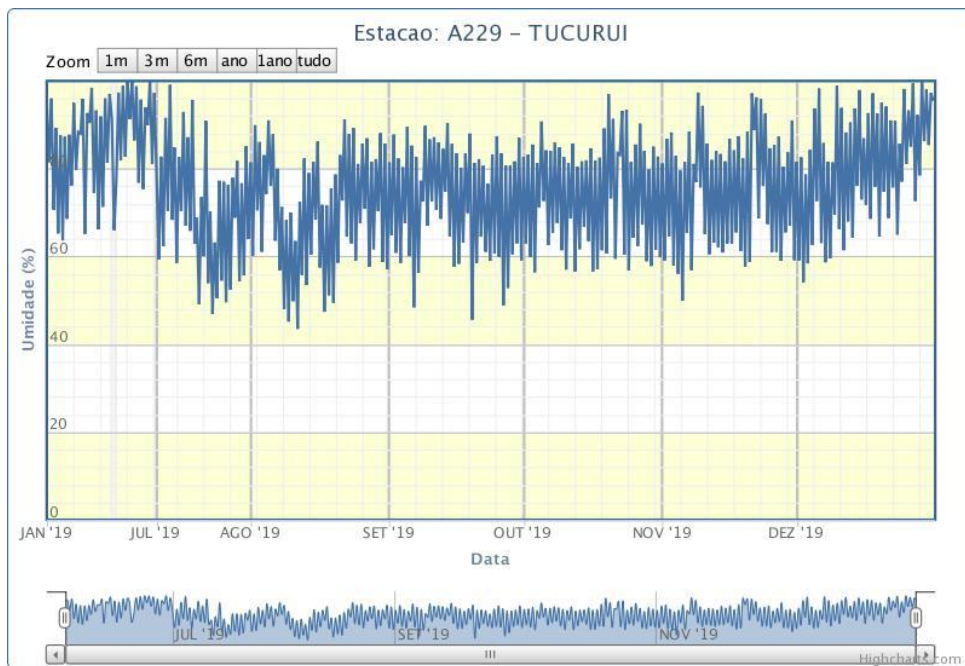
CP	Massa Inicial (g)	Massa Seca (g)	U (%)
CP1-U	24,23	21,02	15,27
CP2-U	22,25	19,28	15,40
CP3-U	23,59	20,41	15,58
CP4-U	23,43	20,28	15,53
CP5-U	23,59	20,46	15,30
CP6-U	23,71	20,58	15,21
Média			15,38
Desvio Padrão			0,150
Coeficiente de variação (%)			0,97

Fonte: Autores (2019).

Analisando os teores de umidade encontrados, é possível notar que há uma aproximação com a de condição padrão estabelecidos por norma, que é de $U=12\%$. Entretanto fazem-se necessárias correções na caracterização de propriedades de resistência assim como de rigidez quando as mesmas não se encontram na umidade padrão e estão contidas num intervalo de 10% a 20% (ABNT NBR 7190:1997).

Para condições regionais a que estamos sujeitos, com umidade relativa que varia acima 60% e podem chegar até 100% na maior parte do ano, os teores de umidade são aceitáveis, isto porque a ABNT NBR 7190:1997 estipula a umidade de equilíbrio da madeira em função das condições onde as estruturas permanecerão, que no caso em estudo podem está entre 15% e 18%. O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020) disponibiliza dados da estação meteorológica de Tucuruí que corroboram com as informações já citadas. A Figura 27 ilustra todas as variações de umidades registradas no ano de 2019.

Figura 25 – Gráfico de umidade relativa em Tucuruí no ano de 2019.



Fonte: INMET (2020).

4.1.3 Compressão paralela às fibras

Importante parâmetro para avaliação, o ensaio de compressão pode auxiliar na compreensão de agentes influenciadores nas propriedades mecânicas e físicas da madeira. Araújo (2007) entende que ao menos duas particularidades são fundamentais para compreensão em relação às propriedades físicas e mecânicas das madeiras: massa específica e a umidade relativa do ar. A primeira possui íntima ligação, configurando-se o melhor indicativo de resistência a forças mecânicas, a segunda como não é um fator controlável pode alterar com frequência a umidade de equilíbrio da madeira e potencialmente modificar suas propriedades.

Na Tabela 9 estão apontados todos os valores de resistência e respectivos módulos de elasticidade do ensaio realizado.

Tabela 9 – Resultados compressão paralela às fibras.

CP	Área (mm ²)	Carga de ruptura (N)	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
CP1	2.500	140730	56,29	*
CP2	2.500	151260	60,50	5916,12
CP3	2.500	146150	58,46	8229,11
CP4	2.500	157320	62,93	9719,52
CP5	2.500	146310	58,52	9311,10
CP6	2.500	142010	56,80	8565,96
Média			58,92	8348,36
Característico ($f_{c0,k}$)			61,85	-
Desvio Padrão			2,46	1481,92
Coeficiente de variação (%)			4,18	17,75

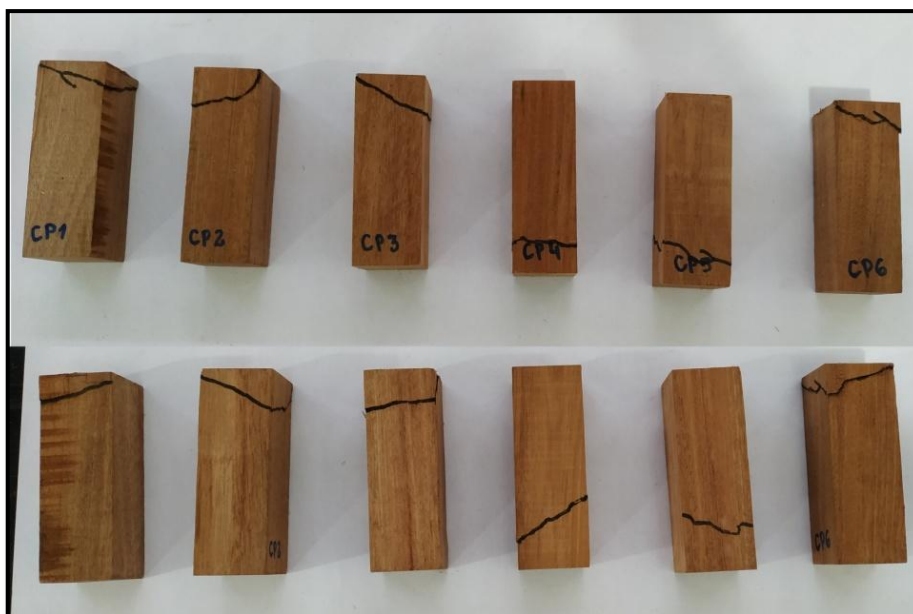
Fonte: Autores (2019).

Nota: * Falha na leitura das deformações.

Os resultados obtidos demonstraram certa regularidade no desempenho mecânico das amostras. Com variações pequenas, comparando-se com a média e o característico, é possível afirmar a homogeneidade nos valores encontrados. O IPT (2019) e IBAMA (1997 apud ARAÚJO, 2007) em estudos produzidos indicam valores de resistência à compressão (f_{c0}) de 54,1 MPa e 59,72 MPa respectivamente, constatando-se uma pequena diferença em relação a média de 58,92 MPa encontrada nos ensaios. Quando corrigida para o teor de umidade de 12%, a resistência é de 64,89 MPa, tornando a diferença um pouco maior. Existem várias justificativas que podemos tomar como base para embasar as variações nas resistências, sendo a mais plausível a da umidade do ambiente na qual as espécies estudadas estavam submetidas.

A Figura 26 apresenta as rupturas dos corpos de prova. É perceptível com a delimitação dos CPs o comportamento da flambagem nos elementos. Os CP2, CP3 CP4 possuem similaridade por apresentarem rupturas mais anguladas. Com ângulos menos acentuados os CPs 1 e 6 possuem características peculiares com a flambagem direcionada apenas uma das arestas do corpo de prova e na parte superior. Por fim o CP5 apresenta característica diferenciada, onde a ruptura define-se mais horizontal, em torno da seção transversal.

Figura 26 – Modo de ruptura dos corpos de prova de compressão.



Fonte: Autores (2019).

4.2 AVALIAÇÃO DO SISTEMA DE REFORÇO TRATADOS E NÃO TRATADOS.

No ensaio de tração dos corpos de prova sem reforço (referência), os resultados não tiveram um agrupamento significativo. A Tabela 10 traz todos os valores encontrados nos ensaios, onde as resistências de SR1 e SR3 dispersam dos demais. Os módulos de elasticidade (E) foram os que demonstram maiores disparidades quando comparamos com suas respectivas resistência. Durante a execução dos ensaios, foi possível notar que as leituras das deformações podem ter sido prejudicadas pelo sistema de fixação dos potenciômetros. Desta forma não tomaremos os módulos como referência nas análises.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de tração - sem reforço (SR).

(continua)

CP	Área (mm ²)	Carga de ruptura (N)	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
SR1	350	36579	104,51	18050,89
SR2	350	32836	93,82	21541,66
SR3	350	22228	63,51	7777,80
SR4	350	31978	91,37	25977,86
SR5	350	33459	95,60	23125,31
SR6	350	29404	84,01	15477,51
	Média		88,80	18658,51

		(conclusão)
Característico ($f_{t_0,k}$)	61,77	-
Desvio Padrão	14,05	6491,77
Coefficiente de variação (%)	15,18	32,79

Fonte: Autores (2019).

Ao avaliar os resultados obtidos nos ensaios com os corpos de prova reforçados, perceber-se que os ganhos de resistência tem certa proximidade com os de referência (SR). É importante salientar que estes ganhos de resistência não podem ser conferidos exclusivamente aos compósitos, pelo fato de que no processo de laminação, as duas faces cortadas acabam sendo coladas no momento de impregnação do tecido com a resina epóxi, contribuindo com o sistema num todo. As Tabelas 11 e 12 relacionam todas as áreas da seção transversal dos compósitos e suas respectivas resistências. As variações nas áreas são decorrentes da dificuldade de controle no momento do pincelamento com resina sobre o tecido e a eliminação de microbolhas formadas no processo.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de tração - reforço natural (RN).

CP	Área (mm ²)	Carga de ruptura (N)	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
RN1	224	15599	69,64	15544,92
RN2	227	16535	72,84	14519,60
RN3	188	16379	87,12	17970,74
RN4	224	15131	67,55	10359,05
RN5	224,5	13181	58,71	*
RN6	224,5	15443	68,79	9527,23
Média			70,78	14519,60
Desvio Padrão			9,30	3564,47
Coefficiente de variação (%)			13,44	24,55

Fonte: Autores (2019).

Nota: * Falha na leitura das deformações.

Tabela 12 – Resultados dos ensaios de tração - reforço tratado (RT).

CP	Área (mm ²)	Carga de ruptura (N)	Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
RT1	224	16145	72,08	12990,82
RT2	210,5	14819	70,40	10484,65
RT3	182,5	15053	82,48	14676,81
RT4	222	14039	63,24	15687,01
RT5	196	16457	83,75	14114,25
RT6	176	14897	84,64	13282,70
Média			76,10	13698,48
Desvio Padrão			8,79	1785,20
Coeficiente de variação (%)			11,37	13,03

Fonte: Autores (2019).

Comparando-se os resultados, onde os reforços tratados obtiveram uma média de 76,10 MPa em resistência e os reforços naturais de 70,78 MPa, constata-se que o tratamento térmico nas fibras colaborou apresentando resistências superiores aos reforços com fibras naturais. Analiticamente pode-se concluir que a modificação das fibras com tratamento demonstra ser uma técnica que pode trazer resultados positivos.

Em estudo de reforço similar utilizando resina epóxi com fibras de vidro e de carbono, Mohamad, Accordi e Roca (2011) obtiveram valores significativos em resistência à tração, com média de 38,06 MPa com coeficiente de variação de 25,68% para fibra de vidro e 62,33 MPa para a fibra de carbono com coeficiente de variação de 23,67%. Ao comparar os sistemas de reforço epóxi/sisal e epóxi/vidro percebemos que o reforço com fibras de sisal mostrou-se superior. Fazendo a mesma comparação com a fibra de carbono, os resultados da pesquisa de referência afirmaram que a resina epóxi promoveu boa aderência, ao ponto dos modos rupturas ocorrerem uma parte na camada do substrato e outra na seção transversal do corpo de prova. Deve-se pontuar que o tipo de madeira utilizada no ensaio é da espécie *Eucalyptus grandis* e segundo a ABNT NBR 7190:1997 possui 7 MPa de resistência ao cisalhamento, podendo ter colaborado para que ocorresse o modo de ruptura apresentado. Desta forma não é possível afirmar que o sistema epóxi/sisal, mesmo obtendo resistência superior, apresenta-se mais eficiente.

4.2.1 Modos de ruptura

As Figuras 27, 28 e 29 ilustram as formas de rupturas nos ensaios de tração dos corpos de prova SR, RN e RT respectivamente. As rupturas dos corpos de prova de referência demonstraram uma similaridade no formato de rompimento, exceto no SR3 que apresentou ruptura mais horizontal e próxima da região de transição das seções transversais. Tal característica pode ter sido ocasionada por alguma falha do corpo de prova, não visível, o que diminuiu sua resistência.

Percebe-se nitidamente, ao serem observadas as rupturas dos CPs reforçados, que as formas de ruptura em todos os casos ocorreram diretamente no sistema de reforço, de forma horizontal. Fiorelli (2002) realizou testes com três tipos de resinas (mamona, cascophen e epóxi) com intuito de avaliar a eficiência junto a madeira, observando que a resina epóxi mostrou-se superior as demais, no que se refere à aderência, chegando a alcançar 13,97 MPa para madeira eucalipto. Dessa forma podemos concluir que as rupturas ocorreram nos reforços devido à alta resistência de adesividade do compósito.

Figura 27 – Ruptura dos CPs - SR.



Fonte: Autores (2019).

Figura 28 – Ruptura dos CPs - RN.



Fonte: Autores (2019).

Figura 29 – Ruptura dos CPs - RT.



Fonte: Autores (2019).

4.2.2 Teste estatístico comparativo dos reforços

Considerando os testes estatísticos propostos para o estudo, os resultados apresentaram respostas significativas. Os grupos apresentam variâncias são consideradas iguais e quanto aos resíduos, conforme teste de Anderson-Darling, possuem normalidade,

todos com 95% de confiança. Ao analisar a eficiência do tratamento nas propriedades mecânicas dos compósitos, o teste de ANOVA afirma, com 95% de confiança, que os resultados são estatisticamente iguais e o tratamento das fibras não surtiu nenhum efeito na resistência do reforço.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

Reforçar estruturas de madeira é um assunto que se precisa discutir mais ativamente. Preservar a identidade histórica de uma edificação acaba tornando-se necessário e por vezes as dificuldades encontradas nas soluções, torna tal preocupação inviável. Optar por técnicas menos invasivas e que garanta a integridade da estrutura existente não é uma das atividades mais fáceis. O trabalho desenvolvido mostrou-se proveitoso, onde se procurou estudar as propriedades que a fibras vegetais associadas aos compósitos poliméricos, como alternativa de reforço estrutural.

O programa experimental teve como objetivo através de várias etapas, conhecer quais benefícios às estruturas de madeira podem ter ao serem reforçados com tecidos de sisal produzidos manualmente utilizando resina epóxi. Duas diferentes configurações para o tecido foram testadas, tratadas termicamente e natural, a fim de corroborar com estudos já existentes.

Os tecidos confeccionados com tear manual apresentaram resultados finais satisfatórios quanto à qualidade e uniformidade. Faz-se necessário pontuar a dificuldade no processo produtivo, ressaltando que tal técnica consome mão de obra elevada, mostrando se inviável para proporções e demandas maiores.

Em relação ao conhecimento prévio das propriedades físicas e mecânicas da madeira a ser reforçada, os resultados obtidos na caracterização mostram-se compatíveis com as informações fornecidas por outras literaturas. As variações nos valores não afetam significativamente a amostra, visto que existem inúmeras variáveis que podem influenciar as propriedades, sendo as condições regionais da espécie um fator de grande diferencial.

Os comportamentos mecânicos dos reforços mostraram-se eficiente quando comparados com a capacidade resistente dos corpos de prova de referência. Pode-se estimar que os reforços possam contribuir em média com aproximadamente 80% a capacidade resistente da estrutura. O aumento de resistência à tração, quando relacionamos os dois reforços (RN e RT) não se consegue visualizar uma variação expressiva, chegando apenas um acréscimo de 7,54% quando as fibras receberam tratamento. Há ainda que mencionar a respeito do papel exercido pela resina epóxi no momento da laminação do compósito, onde

parte da resistência de ruptura do compósito pode ter sido absorvida, na região central, no ponto de ligação do reforço.

Sobre o tratamento térmico, os efeitos não foram significativos, visto que se esperava um ganho maior. Sabe-se que tal prática não possui normatização e os estudos sobre o tema ainda são poucos.

As análises estatísticas apontaram com 95% de confiança que os grupos são estatisticamente iguais quanto aos resultados e suas variâncias, possuem normalidade quanto à análise dos resíduos e afirma que o tratamento térmico não provocou efeito substancial nas amostras tratadas que o diferenciasse do reforço sem tratamento.

Desta forma, os estudos teóricos e experimentais pode-se concluir que há viabilidade na utilização de fibras naturais, nesse caso o sisal, como componente em matrizes poliméricas, em especial as epoxídicas, na aplicação como reforço de estrutura de madeira.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há um grande potencial econômico e sustentável na utilização de fibras naturais que podem ser explorados e até mesmo revolucionar a área de reparos estruturais, especialmente na área das estruturas de madeira. Nesse sentido faz-se necessário o aprofundamento em estudos acerca do uso de compósitos reforçados por fibras naturais, assim como desenvolvimento de técnicas que possam melhorar suas propriedades. Por fim, seguem listadas algumas propostas para trabalhos futuros nessa área:

- Elaboração de tecidos híbridos, mesclando fibras naturais e fibras sintéticas;
- Testar a efetividade de compósitos com fibras naturais pré-fabricados;
- Avaliar a eficiência da aderência na região de interface do compósito/madeira;
- Realizar um projeto de reforço em condições reais, apresentando os custos estimados para execução, considerando configurações diferenciadas e melhores cenários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGARWAL, Bhagwan D.; BROUTMAN, Lawrence J., **Analysis and Performance of Fiber Composites**, John Wiley & Sons, NY, 3rd, ed. 2006.

ALVES, Â. M. G.; SALES, B. D. C.; CUNHA, B. C.; MULINARI, D. R. Compósitos de poliuretano reforçados com fibra de sisal. **Caderno UniFOA**. Edição especial engenharia de produção. v. 9, n. 1 (Esp), p. 65-71, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D 3039/D 3039M: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2002.

_____. **D 1763 - 94: Standard Specification for Epoxy Resins**. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 1994.

ANGRIZANI, C. A.; VIEIRA, C. A. B.; ZATTERA, A. J.; FREIRE, E.; SANTANA, R. M. C.; AMICO, S. C. Influência do Comprimento da Fibra de Sisal e do Seu Tratamento Químico nas Propriedades de Compósitos com Poliéster. **17º CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, Foz do Iguaçu 15 a 19 de novembro de 2006.

ARAÚJO, Henrique José Borges de. Relações funcionais entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras tropicais brasileiras. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 37, n. 3, p. 339-416, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 107 p.

BRITES, Ricardo José Delgado Sousa. **Avaliação de segurança das Estruturas antigas de madeira**. 2011. 307 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2011.

BRITO, Jorge. **Apontamentos da cadeira de inspeção, patologia e reabilitação de edifícios: Diagnóstico, Patologia, e reabilitação de construção de madeira**. 2004. 66 p. Apostila.

BRITO, Leandro Dussarrat. **Patologia em estruturas de madeira: Metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação**. 2014. 483 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estrutura) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CALLISTER, William D. Junior, **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARRAZEDO, Ricardo. **Mecanismo de confinamento em pilares de concreto encamisados com polímeros reforçados com fibras submetidos à flexo-compressão**. 2005.

267 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CARVALHO, Ricardo Fernandes. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estrutura de madeira.** 2005. 133 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CARVALHO, Tiago Silva. **Reforço à flexão de vigas de betão armado com compósitos de CFRP.** 2010. 185 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Geotecnia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

CERCHIARO, Jorge Ruben. **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual.** 2010. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Stricto-sensu) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

CORREIA, Edvaldo Amaro Santos. **Compósitos de matriz geopolimérica reforçados com fibras vegetais de abacaxi e de sisal.** 2011. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2011.

CRUZ, David Miguel Reis. **Reforço de elementos estruturais de madeira com materiais compósitos de matriz polimérica.** 2015. 183 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2015.

D' ALMEIDA, A. L. F. S.; CALADO, V.; BARRETO, D. W.; D' ALMEIDA, J. R. M. Acetilação da fibra de bucha (*luffa cylindrica*). **Polímeros.** Ciência e Tecnologia, São Carlos, v. 15, n. 1, p 59-62, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sisal.** Cadeia produtiva do sisal no nordeste brasileiro. 2014. Disponível em <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducaolf6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p>. Acesso em 12 de out. 2019.

FRANCKLIN, H. M.; MOTTA, L. A. C.; CUNHA, J.; SANTOS, A. C.; LANDIM, M. A. Estudo da viabilidade da utilização de compósitos epóxi e fibras de sisal como reforço de estruturas de concreto armado. **IBRACON (Instituto Brasileiro de Concreto)**, Estruturas e Materiais, v. 12, p. 255-287, 2019.

FIORELLI, Juliano. **Utilização de fibras de carbono e de fibras de vidro para reforço de vigas de madeira.** 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

GONZAGA, Armando Luiz. Madeira. **Uso e conservação.** Brasília. v, 6. p, 247 f. 2006.

HUNTSMAN (São Paulo). **Advanced Materials: High Performance Components.** Disponível em: <https://www.huntsman.com/advanced_materials/Media%20Library/global/files/SA%20High%20Performance%20Component%20Selector%20Guide.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2019.

IOZZI, M. A.; MARTINS, M. A.; MATTOSO, L. H. C. Propriedade de compósitos híbridos de borracha nitrílica fibras de sisal e carbonato de cálcio. **Polímeros**. Ciência e Tecnologia, São Carlos, v. 14, n. 2, p. 93-98, 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Estações automáticas**

Gráficos: Umidade relativa em Tucuruí-Pa. 2020. Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf>.

Acesso em: 19 jan. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNÓLOGICAS (São Paulo). **Informações sobre**

madeiras: Andiroba. [2019]. Disponível em:

<https://www.ipt.br/informacoes_madeiras3.php?madeira=26>. Acesso em: 10 nov. 2019.

ISAIA, Geraldo C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

LOPES, Felipe Perissé Duarte. **Estudos adicionais dos compósitos poliméricos reforçados por fibras de curauá**. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2011.

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D.; BRANCIFORTI, M. C.; KOBAYASHI, M.; NOBRE, A. D. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros**. Ciência e Tecnologia, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 92-99, 2008

MARTINS, C. S.; ABREU, J. J. C.; PEREIRA, D. T. O.; SANTOS, D. Q.; MELO, V. L. M.; NOBRE, J. R. C.; SOUSA, M. A. R.; FIGUEIREDO, M. F. Propriedades físicas de três espécies de madeira comercializadas no sudeste do Pará. **CBCTEM (Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira)**. Florianópolis, 2017.

MILANESE, Andressa. Cecília. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras de sisal e de vidro**. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado em Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

MIOTTO, José Luís; DIAS, Antônio Alves. Reinforcement and recovery of timber structures (reforço e recuperação de estruturas de madeira). **Semina**. Ciência Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 27, n. 2, p. 163-174, 2006.

MOHAMAD, G.; ACCORDI, J.; ROCA, L. E. Avaliação da associação de compósitos de fibras de vidro e carbono no reforço de madeira de Eucalyptus in natura e autoclavada. **Materiais**. v. 16, n.1, p 621-637, 2011.

MONTEIRO, S. N.; CALADO, V.; RODRIGUEZ, R. J. S.; MARGEM, F. M. Thermogravimetric stability of Polymer Composites reinforced with less common lignocellulosic fibers – an overview. **J. Mater. Res. Technol.** p. 117-126. 2012.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. **Applied statistics and probability for engineers**. 3rd edition. Wiley, New York, 2003. 450p.

NEIRA, Dorivalda Santos Medeiros. **Fibra de sisal (*Agave sisalana*) como isolante térmico de tubulações.** 2005. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2005.

NETO, Flamínio Levi; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 336 p.

NOGUEIRA, Clara Leal. **Obtenção e caracterização de compósitos termoplásticos avançados à base de matrizes de poli(propileno) reforçadas com fibra de carbono,** 2004. 256 f. Tese (Doutorado em Física e Química de Materiais Aeroespaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2004.

ROSA, Talitha Oliveira. **Vigas de madeira laminada colada de paricá (*Schizolobium parahyba var. amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby) reforçadas com fibras sintéticas.** 2017. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages - SC, 2017.

SHACKELFORD, James F. **Ciência dos materiais.** 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SILAEX. **Resina Epóxi:** informações técnicas. 2019. Disponível em: <<https://www.silaex.ind.br/epoxi>>. Acesso em: 15 nov. 2019.

SILVA, C. C.; CUNHA, R. A. D.; FELIPE, R. C. T. S. FELIPE, R. N. B. Desenvolvimento de tecidos de sisal para utilização em compósitos poliméricos. **Holos.** Rio Grande do Norte, v. 4, n. 8, p. 12-19, 2009.

SILVA, O. R. R. F. **Embrapa – Cultivo do sisal no nordeste brasileiro.** Campina Grande, PB: EMBRAPA, 2008. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/278171/cultivo-do-sisal-no-nordeste-brasileiro>> Acesso em: 10 out. 2019.

SILVA, Rosana Vilarim. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais.** 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

VIEIRA, Cristiane Aurélio Borges. **Avaliação de métodos de fabricação de mantas híbridas de fibras curtas de vidro e sisal em compósitos poliméricos.** 2008. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2008.