

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

VALÉRIO URBANO DA SILVA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI COM FIBRA
VEGETAL DE CURAUÁ SEM TRATAMENTO QUÍMICO**

**MANAUS-AM
2021**

VALÉRIO URBANO DA SILVA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI COM FIBRA
VEGETAL DE CURAUÁ SEM TRATAMENTO QUÍMICO**

Trabalho de Curso apresentado como requisito
parcial à obtenção do título de bacharel em
Engenharia Mecânica da Universidade do
Estado do Amazonas (UEA)

Orientador: Prof. Dr. Gilberto García Del Pino

**MANAUS-AM
2021**

VALÉRIO URBANO DA SILVA NETO

**DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS DE RESINA EPÓXI COM FIBRA
VEGETAL DE CURAUÁ SEM TRATAMENTO QUÍMICO**

Este Trabalho de Curso foi considerado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e aprovado em sua forma final pela comissão examinadora.

Manaus, 18 de dezembro de 2021

Banca examinadora:



Prof. Dr. Gilberto García Del Pino



Prof. Dr. Aristides Rivera Torres



Prof. Me. Marcos Dantas dos Santos

Dedico este trabalho de curso primeiramente a Deus, aos meus amigos e em especial minha família. Enfim, a todos que contribuíram para esse momento.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus amigos, familiares e a minha namorada por todo o apoio ao longo do curso, aos meus professores pelos conhecimentos transmitidos e toda a coordenação do curso que sempre acolheu os alunos a fim de ajudar e dar suporte em quaisquer adversidades que nos encontrássemos.

“O seu pior adversário é você mesmo. A superação exige paciência, resistência, força de espírito e persistência. Não se deixe abater por pequenos insucessos e frustrações. Encare as suas limitações como obstáculos a serem ultrapassados e não como barreiras que forcem você a parar. Por isso, quando a vida desafiar você, não baixe a cabeça, não desista”

Rubens Junior

RESUMO

Hoje no mundo observa-se uma corrida na busca por materiais oriundos de fontes renováveis. O uso de fibras vegetais reforçando polímeros, por exemplo, representa uma alternativa na substituição de fibras de vidro ou de carbono em compósitos. O curauá é uma planta legitimamente brasileira, de fácil cultivo e processamento, que produz fibras de ótimo desempenho mecânico. Neste trabalho é feita uma avaliação de compósitos de matriz de resina epóxi e fibras vegetais, cuja fibra é extraída das folhas de uma planta da região amazônica chamada curauá (*Ananas erectifolius*). O objetivo do trabalho é estudar o comportamento mecânico em tração de compósitos poliméricos de matriz epóxi reforçados fibras contínuas e alinhadas. As fibras de curauá foram separadas e foi definido um processo simples para a limpeza (lavagem e secagem), separação por grupos e o corte das fibras *in natura*. Compósitos dematriz de resina epóxi e fibras vegetais curauá foram moldados em diferentes grupos com diferentes porcentagens de fibras em relação ao compósito. Depois disso, as placas com resina e fibra foram cortadas com um laser, segundo as dimensões definidas pela norma D638, produzindo os corpos de prova que seriam usados nos ensaios mecânicos de tração, sendo usinadas ranhuras finas paralelas longitudinais e transversais para colocar as fibras com precisão, e por fim alguns corpos foram avaliados no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) após a ruptura. Como resultado deste trabalho, é possível concluir que o uso das fibras, mesmo sem tratamento químico, é satisfatório afinal com apenas 30% de fibras é possível, praticamente, duplicar a resistência do material que saiu de aproximadamente 34 MPa (resina pura) para praticamente 65 MPa. As aplicações desses compósitos não serão ilimitadas, contudo, os compósitos com a fibra amazônica curauá podem substituir, em vários casos, os compósitos de fibras sintéticas, proporcionando um menor impacto ao meio ambiente, ajudando na sustentabilidade e podendo até gerar novas fontes de emprego para as populações mais pobres da Amazônia.

Palavras chaves: Compósitos, Curauá, Resina Epóxi.

ABSTRACT

Today in the world there is a race in the search for materials from renewable sources. The use of vegetable fibers reinforcing polymers, for example, represents an alternative to replacing glass or carbon fibers in composites. Curauá is a legitimately Brazilian plant, easy to grow and process, which produces fibers with excellent mechanical performance. In this work an evaluation of epoxy resin matrix composites and vegetable fibers is made, whose fiber is extracted from the leaves of a plant in the Amazon region called curauá (*Ananas erectifolius*). The aim of this work is to study the mechanical behavior in tensile strength of epoxy matrix composites reinforced with continuous and aligned fibers. The curauá fibers were separated and a simple process was defined for cleaning (washing and drying), separating into groups and cutting the fibers in natura. Epoxy resin matrix composites and curauá plant fibers were molded into different groups with different percentages of fibers in relation to the composite. After that, the resin and fiber plates were cut with a laser, according to the dimensions defined by the D638 standard, producing the specimens that would be used in the mechanical tensile tests, with thin parallel longitudinal and transversal grooves being machined to place the fibers with precision, and finally some bodies were evaluated in the Scanning Electron Microscope (SEM) after rupture. As a result of this work, it is possible to conclude that the use of fibers, even without chemical treatment, is satisfactory. After all, with only 30% of fibers it is possible to practically double the strength of the material, which went from approximately 34 MPa (pure resin) to practically 65 MPa. The applications of these composites will not be unlimited, however, composites with the Amazonian fiber curauá can replace, in several cases, the composites of synthetic fibers, providing a lower impact on the environment, helping sustainability and even generating new sources of employment for the poorest populations in the Amazon.

Key words: Composites, Curauafiber, EpoxiResin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01: Classificação dos materiais compósitos.....	16
Figura 02: Representação estrutural da fibra natural	18
Figura 03: Plantação de curauá	20
Figura 04: Fibras curauá.....	26
Figura 05: a) Resina epóxi 2001 e b) endurecedor 3154.....	27
Figura 06: Aditivo antibolha Siladit 53.....	28
Figura 07: Cera desmoldante Tecglaze [0,425 Kg].....	28
Figura 08: Estufa QUIMIS 0317M-72	30
Figura 09: Preenchimento do molde: a) Molde vazio, b) Molde com os grupos de fibras	32
Figura 10: a) Molde preenchido com os componentes misturados, b) Molde fechado	32
Figura 11: Abertura do molde: a) Deslocamento da tampa do molde, b) Liberação da placa inferior	33
Figura 12: Extração da chapa de resina do molde: a) chapa de resina curada, b) Extração da chapa de resin	33
Figura 13: Chapas de resina: a) Contendo os corpos de prova de 5 a 8, b) Contendo os corpos de prova de 9 a 12.....	33
Figura 14: Corpo de prova padronizado.....	34
Figura 15: Máquina Router laser CNC VS6040)	34
Figura 16: Corte dos corpos de prova a laser: a) Posicionamento da chapa na máquina, b) Início do corte dos corpos de prova	35
Figura 17: Corte dos corpos de prova a laser: a) Posicionamento da chapa na máquina, b) Corpos de prova depois de cortados	36
Figura 18: Corpo de prova com resina pura.....	37
Figura 19: Corpo de prova com pouca fibra curauá.....	37
Figura 20: Corpo de prova muita fibra curauá	38
Figura 21: Curva tensão-deformação dos corpos de prova	38
Figura 22: Gráficos de tração gerados pela máquina para os corpos de prova com 30% em Peso de fibra de Curauá (Compósitos de maior resistência).....	40
Figura 23: Gráficos de tração gerados pela máquina para corpos de prova com diferentes conteúdos de fibra de Curauá	40
Figura 24: Micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x250.....	41

Figura 25: Micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x150.....	42
Figura 26: Micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x750.....	43
Figura 27: Micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x750.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição e propriedades mecânicas de algumas fibras.....	17
Tabela 2: Propriedades mecânicas de compósitos com fibras de curauá.....	24
Tabela 3: Características dos componentes.....	27
Tabela 4: Propriedades do sistema não curado.....	27
Tabela 5: Características do aditivo antibolha Siladit 53.....	28
Tabela 6: Corpos de prova, peso e porcentagem de fibras.....	29
Tabela 7: Especificações técnicas da máquina Router laser CNC VS6040.....	35
Tabela 8: Valores de tensão, módulo de elasticidade e deformação dos corpos.....	39
Quadro 1 - Classificação das resinas epóxi e principais características.....	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FT-IR	A espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
XPS	A espectroscopia de fotoelétrons excitados por raios X ou XPS
SAXS	Espalhamento de raios-X a baixo ângulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO + HIPÓTESES	13
1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	13
1.3 JUSTIFICATIVA	13
1.4 OBJETIVOS	14
1.4.1 OBJETIVO GERAL	14
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 COMPÓSITOS	14
2.2 FIBRAS VEGETAIS	16
2.2.1 FIBRAS DE CURAUÁ	19
2.3 MATRIZES TERMORRÍGIDAS	21
2.3.1 RESINA EPÓXI	21
2.4 DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS COM FIBRAS CURAUÁ	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 MATERIAIS	26
3.2 MÉTODOS	29
3.2.1 Preparo das Fibras de Curauá	29
3.2.2 Fabricação dos corpos de prova	31
3.2.3 Ensaio de tração	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, em virtude das crescentes preocupações ambientais, está havendo uma renovação crescente do interesse em materiais compostos derivados de matéria-prima lignocelulósicas. Uma grande quantidade de pesquisas foi conduzida em vários tipos de fibras vegetais para identificar alguns substitutos promissores para o E-glass, reforço de compósito tradicional. Além da biodegradabilidade, disponibilidade e baixo custo, as fibras naturais podem trazer vantagens técnicas, como altas propriedades mecânicas específicas, amortecimento vibracional e isolamento acústico (GARCIA; et al., 2020, p. 399).

Devido ao grande avanço da tecnologia vem sendo necessário cada vez mais o uso de materiais com propriedades específicas, para que sejam utilizados nas mais diversas aplicações (CALLISTER, 2016). Dentro desse contexto, encontram-se os materiais compósitos, que podem ser produzidos a partir da combinação de dois ou mais materiais, resultando em um material com propriedades melhores que a de seus materiais separados (ASKELAND, 2014).

Os materiais compósitos são constituídos basicamente por duas fases: a primeira é a matriz que é a fase contínua e envolve a segunda fase conhecida como dispersa. Essas combinações de fases podem relacionar características únicas em cada material, formando a partir destes materiais com propriedades desejáveis para aplicações específicas (CALLISTER, 2016).

Callister (2016) classifica os materiais compósitos em três divisões principais: os compósitos reforçados por fibras, os compósitos reforçados por partículas e os compósitos estruturais. Os compósitos poliméricos reforçados com fibras, são formados por uma fase matriz que pode ser uma resina e a outra é a fase de fibra, as fibras podem ser sintéticas ou naturais (CANDIDO, 2014).

Com as combinações das propriedades de cada uma das fases dos compósitos reforçados por fibras, o novo material apresenta maiores limites de resistência, módulo de Young e resistência específica ao incorporar fibras mecanicamente resistentes, em uma matriz com menor massa específica e mais dúctil. O material da matriz transmite as tensões para as fibras, que por sua vez resistem a força aplicada. A matriz também age como proteção para o reforço impedindo a ação de agentes externos, que possam causar a degradação de suas propriedades mecânicas (ASKELAND, 2014).

As fibras naturais vêm sendo apontadas como ótimas alternativas na substituição das fibras de vidro por terem uma produção de baixo custo e por não requerer equipamentos sofisticados. Apresentando-se também condições de trabalho mais seguras em relação às fibras

de vidro. Os aspectos mais interessantes sobre as biofibras é que são oriundas de fontes renováveis, neutras em relação a emissão de dióxido de carbono quando compostadas ou sofrem combustão, são encontradas em grande quantidade e com facilidade, além de possuírem boas propriedades mecânicas (BARBOSA, 2011).

O curauá é uma planta nativa da região amazônica com ótimas propriedades mecânicas, de fácil cultivo e processamento e pode ser cultivado em consórcio com outras culturas, incluindo áreas de reflorestamento e produção de madeira, podendo ainda ser colocado como mais uma fonte de renda para pequenos agricultores. O incentivo ao cultivo do curauá pode se tornar uma importante fonte de emprego e renda em regiões carentes. Não somente a indústria automotiva e têxtil, mas também outros setores podem se beneficiar com a expansão desta cultura (SARTORI, 2010).

Os compósitos reforçados com fibras naturais possuem uma tendência mundial por serem materiais ambientalmente corretos pois são recicláveis, renováveis e biodegradáveis e também de baixo custo (NASCIMENTO, 2009).

Neste contexto, este estudo tem o intuito de mostrar as vantagens do uso da fibra vegetal curauá em compósitos epóxi e assim melhorar as propriedades mecânicas do mesmo. Não somente isso, mas também atentar as indústrias para a busca por produtos mais ecológicos para que quando utilizados ou descartados tenham um mínimo efeito poluente ou se possível, nenhum.

1.1 PROBLEMATIZAÇÃO + HIPÓTESES

Vale a pena a utilização das fibras vegetais curauá para aumentar a resistência mecânica de um compósito de resina epóxi?

HIPÓTESES:

H0: As fibras aumentam de forma significativa a resistência a tração.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO

Análise do uso da fibra vegetal curauá em compósitos de resina epóxi a fim de melhorar a resistência mecânica do compósito.

1.3 JUSTIFICATIVA

Realizar um estudo da influência da quantidade de fibras dentro de um compósito, verificar como o aumento da quantidade de fibras influencia na resistência mecânica do compósito, principalmente em relação à tração. Já se sabe que quando é utilizado tratamento químico, a fibra melhora a aderência a resina e é conseguido melhores propriedades mecânicas, contudo com o objetivo de simplificar a aplicação na indústria desses compósitos com fibra de curauá, este trabalho pretende avaliar as resistências mecânicas dos compósitos com resina epóxi sem tratamento químico. Caso essas resistências não fiquem tão baixas, as indústrias poderiam eliminar o processo de tratamento químico das fibras e assim ficaria mais econômico e menos agressivo ao meio ambiente devido a não utilização do hidróxido de sódio.

As fibras vegetais são mais eficientes, comparadas as fibras de vidro, pois têm baixo custo de produção e processamento, menor abrasividade que as fibras sintéticas, são leves, não estilhaçam em casos de acidentes, e principalmente porque são biodegradáveis. A fibra vegetal curauá em especial apresenta uma resistência maior comparada às outras. O interesse pelo curauá (*Ananas erectifolius*) originou-se da observação do uso desse material pelos índios na fabricação de cordas, redes de dormir e linhas de pesca, produtos que atestam as qualidades de resistência e de leveza. Os novos compósitos resultantes da fibra vegetal resumem-se, por enquanto, a poucos itens, porque a matéria-prima disponível ainda não dá conta da demanda.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo determinar as propriedades mecânicas de compósitos de matriz epóxi reforçadas com fibras contínuas e alinhadas de curauá.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar o comportamento mecânico em tração de compósitos poliméricos de matriz epóxi reforçados fibras contínuas e alinhadas.
- Análiseda região da fratura dos compósitos ensaiados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 COMPÓSITOS

O desenvolvimento de materiais compósitos e a combinação dos diversos tipos de materiais, segundo Callister (2016), possibilitam a ampliação de suas propriedades. É denominado um material composto ou apenas compósito, um material com duas ou mais fases, sendo essas de diferentes propriedades físicas e químicas, que apresenta uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem de modo que é obtido uma melhor combinação de propriedades. Sendo que estas fases que os constituem devem estar separadas por uma interface distinta e de escala microscópica (SARTORI, 2010).

As fases que formam um compósito são conhecidas como material tipo matriz que é aquele responsável por conferir a estrutura do compósito e material tipo reforço, também chamado de fase dispersa, é responsável por elevar alguma de suas propriedades desejadas. Dessa forma, a matriz preenche os espaços vazios que se estabelecem entre os materiais reforços e os mantém em suas posições relativas, enquanto o reforço irá garantir as propriedades químicas e físicas do compósito (CALLISTER, 2016).

Quando os compósitos possuem mais que um tipo de reforço ou de matriz, são considerados compósitos híbridos. O objetivo dessa combinação é aliar as propriedades presentes nos diferentes componentes para atender requisitos que um componente puro não atenderia (BARROS, 2006).

Os principais materiais utilizados nas matrizes dos compósitos são os metais, polímeros e cerâmicas. Dentre os materiais utilizados de reforço para compósitos estão as fibras de vidro, de carbono, de boro, de titânio, fibras orgânicas (nylon, poliéster), fibras cerâmicas, de carbono ou silício, alumina, de quartzo, metálicas, fibra de madeira (serradura), de aramida, grafite e fibra de basalto (CARVALHO, 2013).

Observa-se na Figura 01, uma classificação de compósitos proposta por Callister (2016). Tecnologicamente, os compósitos mais importantes são aqueles em que a fase dispersa encontra-se em forma de fibra. Rigidez e/ou resistência alta são buscadas frequentemente sendo denominadas como módulo específico e resistência mecânica. Grande parte dos compósitos são desenvolvidos a fim de conseguir melhores propriedades mecânicas, como rigidez, resistência, tenacidade e as vezes até altas temperaturas (SARTORI, 2010).

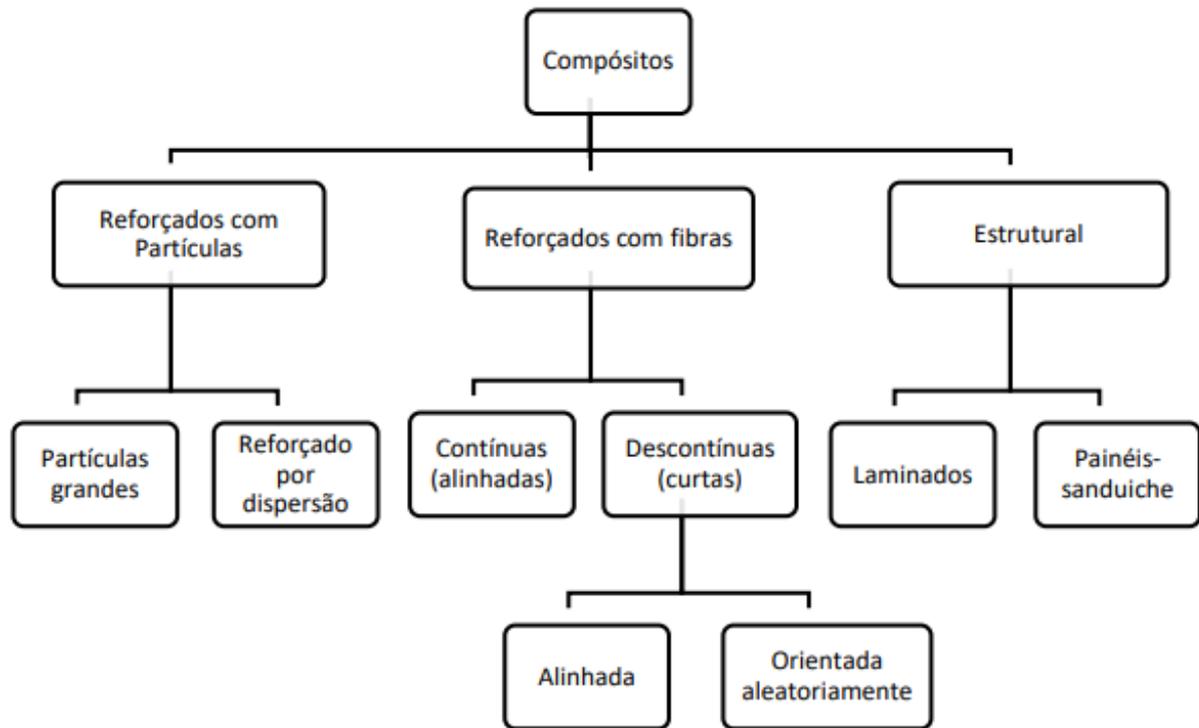


Figura 01: Classificação dos materiais compósitos (FONTE:Adaptado de Callister 2016)

Os compósitos possuem uma grande vantagem sobre outros materiais estruturais, pois moldes com formas complexas são facilmente adaptáveis aos processos em utilização. Os compósitos têm longevidade tradicional e também apresentam fáceis e simples técnicas de reparo e manutenção (MARGEM, 2013).

2.2 FIBRAS VEGETAIS

Fibras vegetais vêm sendo usadas por várias civilizações e nas mais diversas aplicações. Inúmeros artefatos são comercializados e manufaturados pelo mundo inteiro há centenas de anos, como cordas, bolsas, pincéis, mantas, redes, cestos, além de outros produtos. A pouco tempo, as fibras vegetais começaram a ser investigadas e utilizadas como reforço em materiais compósitos poliméricos, entre eles compósitos de matriz termorrígida (SINGH et al., 1994). São constituídas principalmente de celulose, hemicelulose e lignina. A Tabela 1 mostra a composição e propriedades mecânicas da maioria fibras populares encontradas na literatura.

Tabela 1: Composição e propriedades mecânicas de algumas fibras.

Fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Resistência à Tração(MPa)	Módulo de young(GPa)	Densidade (kg/m ³)	Módulo elástico (GPa/g.cm ⁻³)
Curauá	73.6	9.9	7.5	900	20–36	1100	18–33
Bagaço de cana de açúcar	55.2	16.8	25.3	350	25.3	1700	14.9
Kenaf	72	20.3	9	450	19	1500	12.7
Juta	61–71	14–20	12–13	393–773	26.5	1300	20.4
Sisal	65	12	9.9	511–635	9.4–22	1500	6.3–14.7
Abacá	56–63	20–25	7–9	212	18	1700	10.6
Cocô	36–46	0.15–0.25	41–45	131–175	4–13	1150	3.5–11.3
Algodão	82.7–90	3–5.7	0				–
Linho	64.5–75.3	12.9–26	4.7–7.4	345–850	27	1500	18
Rami	68.6–91	5–16.7	0.6–0.7	430–938	65	1600	40.6
Fibra de vidro	–	–	–	3033	69	2490	27.7

Fonte: Garcia, Bezaki, Boumediri, et al. (p. 2)

A celulose, maior fração das fibras lignocelulósicas, é um polissacarídeo semicristalino composto de títulos D-glicosídico. A hemicelulose está fortemente ligada à celulosefibrilas por conta da sua estrutura aberta contendo hidroxilae grupos acetil, ela é parcialmente solúvel em água com característica higroscópica. (Garcia, Bezaki, Boumediri, et al., 2020)

A lignina é a responsável pela rigidez das plantas, é um ligante amorfo, hidrofóbico e possui um alto grau de polimerização (LUZ, 2014). A hemicelulose está associada a flexibilidade e a elasticidade da planta, e está disposta de maneira intercalar nas microfibrilas (AGUIAR, 2010).

O maior teor de celulose contribui para que a fibra curauá tenha maior resistência à tração e módulo de Young. Além disso, ela se destaca pela menor densidade, o que leva a um maior módulo de elasticidade (18-33 GPa / g.cm⁻³) em comparação com a fibra de vidro (27,7 GPa / g.cm⁻³), conforme apresentado na Tabela 1. O curauá também apresenta maior resistência ao impacto e flexibilidade e seu uso leva a menores níveis de abrasão e consumo de energia durante o processamento. (GARCIA, BEZAKI, BOUMEDIRI, ET AL., 2020)

As fibras têm uma complexa estrutura, composta por parede primária, secundária e terciária. Na parede secundária existe uma subdivisão em outras três camadas que são onde as microfibrilas estão arranjas de forma helicoidal, o ângulo microfibrilar que é formado entre o eixo da fibra e as microfibrilas, e a razão entre a lignina e a hemicelulose, que irão variar de acordo com o tipo de fibra. Devido a isso, as fibras naturais apresentam diferentes propriedades mecânicas, que são determinadas pelos parâmetros estruturais de cada tipo de fibra (JOHN e THOMAS, 2008). A Figura 02 mostra uma representação da estrutura da fibra natural.

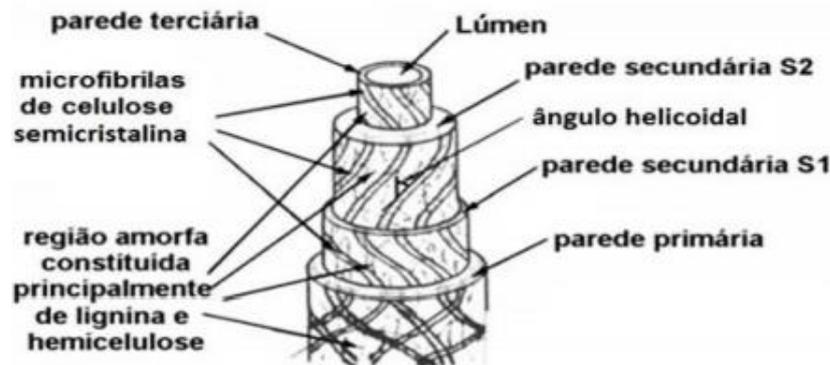


Figura 02: Representação estrutural da fibra natural (FONTE: Adaptado de John e Thomas 2008)

As propriedades das fibras dependem além disso, do teor de celulose, do grau de polimerização e do ângulo das fibrilas. Segundo Jayaraman (2003) fibras com maior conteúdo de celulose, alto grau de polimerização e um baixo ângulo microfibrilar, possuem alta resistência à tração e rigidez.

Segundo Marinelli et al. (2008) nos últimos anos, tem surgido um grande interesse mundial pelo desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a utilização de produtos mais ecológicos visando um menor impacto ambiental. Devido a isso, vem crescendo o número de pesquisas envolvendo materiais compósitos com fibras vegetais.

Marinelli et al. (2008) faz as seguintes observações sobre as fibras vegetais que:

- São materiais renováveis e sua disponibilidade pode ser considerada ilimitada.
- São materiais biodegradáveis, característica muito importante para componentes que após esgotar sua vida útil devem ser descartados.
- São mais baratos, comparado aos reforços atualmente empregados.
- Representam uma nova fonte de renda para a população rural, podendo evitar o grande fluxo do campo para a cidade, muito expressivo nas regiões Norte e Nordeste do país.
- São compósitos reforçados com fibras naturais, que também utilizam matrizes biodegradáveis, são considerados os materiais menos agressivos ao meio ambiente e podem ser compostados ao final de sua utilização.

Outros fatores podem alterar as propriedades das fibras lignocelulosicas, como o local de retirada do vegetal, ou ainda o local da plantação do vegetal. Diversos estudos estão sendo desenvolvidos com diferentes tipos de fibras lignocelulosicas, e que podem ser retiradas de diferentes partes do vegetal (CANDIDO, 2014).

No entanto, há também uma série de desvantagens associadas às fibras naturais incluindo: acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas, baixa temperatura de utilização, alta sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade), influência significativa das condições do solo à época da colheita e mesmo da localização relativa da fibra no corpo da planta, baixa estabilidade dimensional, além de seções transversais de geometria complexa e não uniforme e, possivelmente a mais limitante, propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais fibrosos sintéticos (LEVY NETO E PARDINI, 2006).

Satyanarayana et al. (2007) descrevem a respeito da disponibilidade de algumas fibras lignocelulósicas brasileiras, seus mercados, morfologia, métodos de extração, propriedades e aplicações atuais. Também são apresentadas algumas perspectivas para estas fibras, considerando sua crescente importância e todo espectro de oportunidades promissoras e desafios para o Brasil e outros países em desenvolvimento.

2.2.1 FIBRAS DE CURAUÁ

O curauá (*Ananas erectifolius*) é uma planta da região do Pará, na Amazônia brasileira, encontrada em quatro variedades: branco, roxo, vermelho e branco brilhoso (CORRÊA et al, 2010). Os mais comuns são o curauá roxo, com folhas roxoavermelhadas, e o curauá branco com folhas levemente verdes, menor em tamanho quando comparado ao curauá roxo, como pode ser visto na Figura 03. A folha da planta mede de 1,5 a 1,7 metros de comprimento, tem 4 a 5 centímetros de largura, é rígida, lisa e ereta. Muito macia ao tato, tem como principal característica uma grande resistência mecânica que lhe dá, mesmo com uma espessura reduzida, capacidade de suportar tensões elevadas. Essa propriedade faz dela uma substituta natural da fibra de vidro.

Diferentemente de outras fibras vegetais, a fibra é o objetivo principal do plantio, seja para seu uso em artesanato, seja para aplicações em materiais de engenharia ou industriais, como compósitos de matriz polimérica (SILVA E AQUINO, 2008).



Figura 03: Plantação de curauá (FONTE: Adaptado de Márcio Gallo 2019)

A fibra curauá está entre as fibras lignocelulósicas de maior resistência, tendo uma resistência a tração média em torno de 400 MPa. Contudo, devido a sua característica heterogênea, comum nas fibras naturais, existe uma larga dispersão nessa propriedade podendo então ser encontradas fibras individuais com resistência à tração superior a 700 MPa ou inferior a 200 MPa (MONTEIRO et al., 2008). As fibras de curauá são utilizadas como materiais industriais e de engenharia devido à sua baixa densidade ($1,4 \text{ g.cm}^{-3}$), quando comparadas às fibras de vidro ($2,55 \text{ g.cm}^{-3}$). E também apresentam resistência mecânica específica ($820 \text{ MPa}/(\text{g.cm}^{-3})$) próxima à fibra de vidro E ($1000 \text{ MPa}/(\text{g.cm}^{-3})$) e módulo de elasticidade de 11,8 GPa (ZAH et al., 2007). Segundo Morais et al. (2016) a aplicação de fibras de curauá como reforço em compósitos de matriz polimérica está sendo muito estudada hoje e corresponde a uma das principais aplicações desse tipo de fibra.

Segundo YUE et al. (2015) a fibra de curauá não necessita de tratamentos químicos severos a fim de melhorar a interface da fibra para a fabricação de compósitos reforçados com a fibra. As propriedades mecânicas da fibra de curauá são superiores quando comparadas a outras fibras naturais, como sisal e juta, e, por vezes, comparáveis às fibras sintéticas, como a fibra de vidro E. Por possuir uma grande quantidade de celulose em sua composição, a fibra de curauá apresenta resistência mecânica superior a muitas fibras naturais, devido às ligações intermoleculares que formam as fibrilas de celulose da estrutura. A composição química típica da fibra foi relatada como sendo celulose (66,4%), lignina (7,5%), xilaxa (11,6%), mannan (0,1%), galactan (0,5%) e arabinan (0,5%). Para que haja boa compatibilização entre a fibra,

tratada quimicamente ou não, e a matriz polimérica é interessante que o polímero tenha características semelhantes no que diz respeito à polaridade das estruturas químicas.

2.3 MATRIZES TERMORRÍGIDAS

As termorrígidas são as mais utilizadas, dentre as resinas poliméricas, no processamento de compósitos poliméricos porque são fáceis de processar, promovendo uma excelente molhabilidade dos reforços, e apresentarem um bom balanço de propriedades, e também estarem disponíveis em uma ampla variedade de *grades* a um custo relativamente baixo (SARTORI, 2010).

As resinas termorrígidas são obtidas a partir de oligômeros de baixo peso molecular e geralmente se apresentam na forma líquida de baixa a média viscosidade. A reação de reticulação se dá pela adição de um agente de cura (e.g. iniciador ou endurecedor) ou pelo aumento de temperatura. O processo de pós-cura é apontado para que se obtenha o máximo de propriedades mecânicas. O sistema rígido resultante é uma rede macromolecular altamente reticulada, infusível e insolúvel, exibindo alta resistência/rigidez mecânica com um mínimo de tenacidade e alta estabilidade térmica (ROSATO, 2004).

As fibras naturais têm baixa compatibilidade com matrizes poliméricas não polares e absorção relativamente elevada de umidade. Esses fatores podem afetar a ligação da fibra com a matriz e diminuir as propriedades mecânicas dos compósitos (GARCIA, BEZAKI, BOUMEDIRI, ET AL., 2020).

2.3.1 RESINA EPÓXI

As Resinas Epóxi são um sistema termoendurecível largamente utilizados na indústria por conta de seu baixo custo e adaptabilidade a serem transformadas em grandes estruturas compostas. O reforço mais utilizado nesse sistema são as fibras de vidro que são fornecidas como tecidos de várias orientações, formas e densidades (BALEY et al., 2016).

Os epóxios representam uma das classes mais versáteis dos polímeros termofixos, são obtidos pela reação de epícloridrina com bisfenol e apresentam na sua molécula grupos terminais formados pela ligação de um átomo de oxigênio com dois átomos de carbono, chamados de grupos etoxilínicos (MARINUCCI, 2011). A resina epóxi é um polímero de grande importância podendo ser usado para aplicações estruturais, pois possuem alta força de

tensão e módulo, e de fácil processamento, além de possuir boa resistência química e térmica (NASCIMENTO, 2009).

Segundo AQUINO (2003) a resina epóxi tem como principais vantagens: Excelente propriedade em compósitos, muito boa resistência química e propriedades elétricas, boas propriedades térmicas e baixa contração na cura. No processo de cura deste tipo de resina podem ser utilizados vários endurecedores e aceleradores, com uso ou não de calor, resultando em polímeros termofixos que possuem um elevado teor de ligações cruzadas. Para que ocorra o processo de cura, é necessário que haja uma reação dos grupos de epóxi da resina com quantidades estequiométricas de agentes de cura, que geralmente são produtos à base de amina (MARINUCCI, 2009).

As reações químicas envolvidas neste processo provocam mudança de estado físico, passa de um estado líquido viscoso, para um gel, e ao final se transforma em um estado sólido vitrificado. As principais características da resina epóxi, destacam a mesma quando comparada com outras resinas do tipo termorrígidas, podendo se criar uma demanda de novas aplicações comerciais, a partir dos esforços para melhorar o desempenho dos produtos existentes e através de modificadores de impacto termoplásticos (NASCIMENTO, 2009).

As resinas epóxi tem diversos gêneros, cada um de acordo com a produção de um tipo de substância epóxi, estão classificadas no quadro 1.

Quadro 1 - Classificação das resinas epóxi e principais características.

Epóxi	Características
Novalocas	<ul style="list-style-type: none"> - Produção realizada pela polimerização de condensação dos grupos de hidroxila de uma resina de feno-formaldeído com epícloridrina - Devido ao alto índice de cross-linking, possui mais resistência térmica, química e elevada dureza
Cíclicas alifáticas:	<ul style="list-style-type: none"> - Surge através da reação das substâncias dióxido de vinil-ciclo-hexano e o dióxido de dicitlopentadieno - Possui resistência a ação do UV
Bromadas	<ul style="list-style-type: none"> - São obtidas através da reação do tetrabromo bisfenol A com epícloridrina - Utilizado em sistemas que necessitam de características de retardação de chamas

Fenóxi:	- Produto com excelente resistência anticorrosiva e abrasiva, além de ter resistência química

Fonte: Site Plástico Virtual, (2018)

2.4 DESENVOLVIMENTO DE COMPÓSITOS COM FIBRAS CURAUÁ

Segundo Silva (2003), o uso de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais não é de agora, as primeiras patentes apareceram na década de 60. Desde a década de 90, uma visão mais realística e ecológica do processo industrial fez ressurgir o interesse em materiais renováveis, tais como as fibras e os óleos vegetais, principalmente na indústria automotiva. Estes compósitos vêm sendo indicados como alternativas com potencial econômico para a fixação de carbono na natureza reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera durante seu ciclo de produção, processamento e utilização.

Os compósitos reforçados com fibras são subclassificados em relação a orientação das fibras e ao seu comprimento na matriz. De acordo com Callister (2016), com base na orientação e no comprimento das fibras, são possíveis três tipos de compósitos reforçados com fibras:

- Fibras contínuas e alinhadas: que possuem propriedades mecânicas altamente anisotrópicas, assumem um caráter direcional, onde o reforço e a resistência são máximos na direção do alinhamento, geralmente na direção longitudinal.
- Fibras descontínuas e alinhadas: na direção longitudinal são possíveis resistências e rigidez significativas.
- Fibras descontínuas e com orientação aleatória: possui propriedades isotrópicas, apesar de algumas limitações na eficiência do reforço.

Em seu estudo Giacomini et al. (2000) realizou a moldagem por compressão e a caracterização de compósitos de matriz poliéster insaturada (ortoftálica) reforçados por fibras de curauá. Após realização de ensaios mecânicos concluíram que as propriedades mecânicas não atenderam as especificações exigidas pela Mercedes-Benz. No entanto, foram sugeridas alternativas para solucionar as dificuldades, como a modificação das características dos equipamentos, a formulação da resina e a necessidade de incorporar maior teor de fibras ou mudar o tipo de reforço. Alguns resultados obtidos estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 2: Propriedades mecânicas de compósitos com fibras de curauá

Teor de fibras (w/w)	Resistência à tração (MPa)	Resistência ao impacto (kJ/m ²)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo de Young (MPa)
22,2	34,7	13,9	62,3	4042
28,4	53,1	26,0	85,3	4998
29,4	40	22,5	54,4	3636

Fonte: Giacomini et al. (2000)

Em outro estudo Monteiro et al. (2006), investigaram as propriedades mecânicas de compósitos de matriz poliéster ortoftálica reforçada com até 30% em peso de fibras contínuas e alinhadas de curauá. Realizou-se ensaios de flexão e a superfície fraturada foi observada por MEV. Segundo os autores, os resultados mostraram resistência superior à obtida por outros pesquisadores em compósitos com fibras curtas e não-orientadas, como esperado.

Também foi desenvolvido um compósito “verde”, feito com resina biodegradável termoplástica, uma blenda à base de amido de milho e poliácido láctico, reforçado por fibras curauá. O compósito atingiu uma resistência à tração de 10,6 Mpa, densidade de 1,16 mg/m³ e deformação de ruptura de 6,5% (GOMES et al., 2007).

Monteiro et al. (2008) investigaram os aspectos microestruturais das fibras curauá relacionados ao desempenho em testes de *pull-out*, realizados para caracterizar a resistência interfacial das fibras com uma matriz de poliéster. De acordo com os autores, em uma escala microestrutura, a adesão natural entre os filamentos que constituem a fibra origina vazios interespaçiais entre esses filamentos. Estes vazios permitem a penetração da matriz ainda líquida podendo auxiliar na adesão à matriz polimérica, resultando em um esforço efetivo para compósitos reforçados com fibra curauá.

No trabalho de Araújo et al. (2008), foram preparados compósitos com fibras de curauá e polietileno de alta densidade (PEAD) por extrusão com dois diferentes agentes de acoplamento. Os resultados mostraram que o polietileno graftizado com anidrido maleico afetou a estabilidade do compósito mais acentuadamente do que o polietileno graftizado com co-vinil acetato. E também indicaram que uma forte interação fibra-matriz se opõe ao aumento de cristalinidade causado pela fibra.

Em outro estudo Mothe et al. (2009), avaliaram a influência das fibras de curauá no comportamento térmico e na coesividade polimérica do poliuretano (PU) por análise termodinâmico-mecânica e calorimetria exploratória diferencial. A interação específica entre as fibras e o segmento rígido do poliuretano influenciou o módulo de armazenamento (E') e o módulo de perda (E'').

Souza et al. (2009), modificaram a superfície das fibras curauá com nanopartículas de polianilina (PANI), o que resultou em um aumento expressivo da condutividade elétrica das fibras (em aproximadamente 2500 vezes). O material modificado também foi caracterizado por FT-IR, XPS E SAXS, e os resultados obtidos foram utilizados para explicar algumas das características observadas no material, como a condutividade elétrica.

Compósitos de polipropileno e polietileno de alta densidade, reforçados com 20 wt% de fibras curauá foram preparados numa extrusora de dupla rosca. Foram estudados os efeitos da velocidade de rotação, as propriedades mecânicas dos compósitos, a morfologia e as dimensões das fibras. Os resultados mostraram que o aumento na velocidade de rotação causa a redução do comprimento, do diâmetro e da razão de aspecto das fibras nos dois tipos de compósitos. A diminuição do efeito de reforço das fibras fica evidenciado pelas propriedades mecânicas de flexão e tração dos compósitos (MANO et al., 2010).

A necessidade do desenvolvimento de novos materiais capazes de combinar melhores propriedades e adequação ao meio ambiente vem despertando um grande interesse atualmente. As propriedades mecânicas dos produtos utilizando as fibras curauá são próximas dos que utilizam as fibras de vidro, estes compósitos abrem muitas portas não apenas na indústria automotiva, mas também em várias aplicações industriais onde há necessidade por compósitos “verdes”.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados nos compósitos poliméricos desenvolvidos nesta dissertação foram:

a) As fibras de curauá utilizadas nessa pesquisa são oriundas da cidade de Santarém, Estado Pará, Brasil, e foram recebidas do SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) de Santarém *in natura* (Figura.4).



Figura 04: Fibras curauá (FONTE: Própria)

b) Duas resinas epóxi transparente 2001 (0,670 Kg) com dois endurecedores epóxi 3154 (0,330 Kg), especificados nas tabelas 4 e 5.

A resina epóxi, base do sistema, é um produto líquido resultante da reação da epicloriglicina com o bisfenol A e o endurecedor é a base de poliamida modificada que promove uma melhor adesão com boa resistência térmica, química e mecânica.

Esse sistema epóxi possui excelente transparência e boa retenção de cores, boa fluidez, facilidade de processamento, contração mínima, não libera subprodutos, excelentes

propriedades dielétricas com alta isolamento, resistência química elevada, estabilidade aos ciclos térmicos, impactos e ações mecânicas, boa adesão, resistência mecânica e fácil impregnação na aplicação em laminação.

Tabela 3: Características dos componentes (FONTE: site Redelease, 2021)

	Resina SQ 2001	Endurecedor SQ 3154
Aparência	Líquido incolor viscoso	Líquido levemente amarelado
Viscosidade, 25 °C, cPs	10.000 a 14.000	200 máx.
Peso Específico, 25 °C, g/cm ³	1,16 +/- 0,01	1,005 +/- 0,015

Tabela 4: Propriedades do sistema não curado (FONTE: site Redelease, 2021)

Proporção de mistura (Resina: Endurecedor)	100:50 partes em peso
Temperatura de manipulação (°C)	18 - 30
Tempo de utilização da mistura 100 g (gel time) a 20° C	20 a 30 min
Tempo de endurecimento da mistura (100 g em película, 20° C)	3 a 4 horas
Cura total a 20° C	7 dias



Figura 05: a) Resina epóxi 2001 e b) endurecedor 3154 (FONTE: Própria)

c) Um aditivo antibolhas Siladit 53 para resinas epóxi [100 g], especificado na tabela 6.

O Siladit 53 é uma solução de polímeros de silicone em hidrocarbonetos com uma importante propriedade de reduzir bolhas e a formação de espuma em sistemas não aquosos.

Tabela 5: Características do aditivo antibolhas Siladit 53 (FONTE: site Redelease, 2021)

Aspecto	líquido incolor
Não voláteis	5 %
Peso específico	0,78 + 0,02 g/l (25°C)
Viscosidade	2,0 a 5,0 cStk (25°C)
Ponto de Fulgor	62 °C
Índice Refrativo	1,450 a 1,460
Solventes Apropriados	hidrocarbonetos



Figura 06: Aditivo antibolhas Siladit 53 (FONTE: site Redelease, 2021)

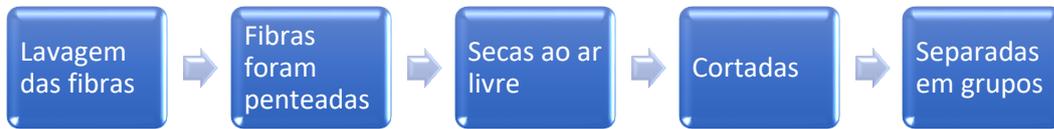
d) Um desmoldante TecGlaze N que é uma cera indicada para a desmoldagem de peças de compósitos. Sua formulação é composta por carnaúba e outros componentes especiais que permitem uma fácil aplicação e múltiplas desmoldagens.



Figura 07: Cera desmoldante Tecglaze [0,425 Kg] (FONTE: site Redelease, 2021)

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Preparo das Fibras de Curauá



As fibras utilizadas nesse estudo foram adquiridas diretamente do SENAI da região de Santarém, no Pará. Elas não haviam sofrido qualquer tipo de tratamento, a não ser a retirada da mucilagem e uma limpeza grosseira das fibras, secando ao ar livre. Tendo-se assim a oportunidade de trabalhar com fibras de curauá em seu estado natural.

Buscando a forma mais eficaz para a utilização das fibras de curauá, como reforço em compósitos poliméricos, foram realizados dois “tratamentos” básicos nelas.

Primeiramente, as fibras foram lavadas em água corrente para a retirada de todas as sujeiras e em seguida penteadas para que ficassem bem uniformes. Depois, foram secas ao ar livre por 8h. Logo após, foram cortadas em tamanhos de 180mm e separadas em grupos por peso em gramas, segundo a tabela 6. Cada grupo contém 3 agrupamentos de fibras cortadas com o mesmo tamanho, totalizando 48 agrupamentos.

Tabela 6: Corpos de prova, peso e porcentagem de fibras(FONTE: Própria)

Número do corpo de prova	Quantidade de fibra em wt%	Peso das fibras em g
1	2,5	0,22
2	5	0,44
3	7,5	0,66
4	10	0,88
5	12,5	1,09
6	15	1,31
7	17,5	1,53
8	20	1,75
9	22,5	1,97
10	25	2,19
11	27,5	2,41
12	30	2,63
13	32,5	2,85
14	35	3,06
15	37,5	3,28
16	40	3,50

O peso do volume do corpo de prova completo de resina é 8,5 gramas (foi determinado multiplicando o volume pela densidade da resina de $1,005 \text{ g/cm}^3$. Na coluna 2 da tabela estão as porcentagens em peso de fibra (wt%) em relação ao peso de 8.5g. (2,5 % de fibra, 5% de fibra, etc). A coluna 3 está o valor calculado dessas porcentagens de fibra, por exemplo: 5% de fibra é 0,437 gramas, etc.

E no segundo tratamento, os grupos de fibras foram secos em uma estufa com circulação forçada de ar (Marca QUIMIS, Modelo 0317M-72), imediatamente antes da moldagem dos compósitos, na temperatura de 60°C por 45 min.



Figura 08: Estufa QUIMIS 0317M-72(FONTE: Própria)

Assim, definiu-se o processamento primário aplicado às fibras para serem preparadas utilizadas como reforço no restante dos compósitos fabricados durante o trabalho.

3.2.2 Fabricação dos corpos de prova



O molde utilizado foi um de aço de 260 x 160 x 3,2 mm de área interna composto por dois componentes, uma parte inferior onde se encontra a cavidade e outra parte superior ou macho que ao unirem sobra um espaço vazio correspondente a espessura da placa do compósito. Primeiramente se passou desmoldante no molde e aguardou o tempo de secagem dele. Depois uniu-se os componentes da resina e os agitou por 15 minutos. Os componentes foram a resina epóxi transparente 2001 (0,670 Kg), o endurecedor epóxi 3154 (0,330 Kg) e o antibolhas Siladit 53 para resinas epóxi [100 g] na seguinte proporção: 82,5g de resina, 41,5g de endurecedor e 4g de antibolhas.

Na figura 9a observa-se o molde vazio a ser enchido com as fibras e na figura 9b o molde com os grupos de fibras. Posteriormente o molde é preenchido com os componentes misturados (Figura 10a) e depois aguardou-se 24 horas até a finalização do processo de cura segundo recomendações do fabricante, assim foi feito do corpo de prova 1 ao 12. Os corpos do 13 ao 16, após o preenchimento com os componentes misturados, foram fechados (Figura 10b) e colocados numa prensa com uma força de 38 KN, para garantir uma pressão de 1 Mpa internamente no material, cuja pressão foi mantida também por 24 horas até finalização do processo de cura.

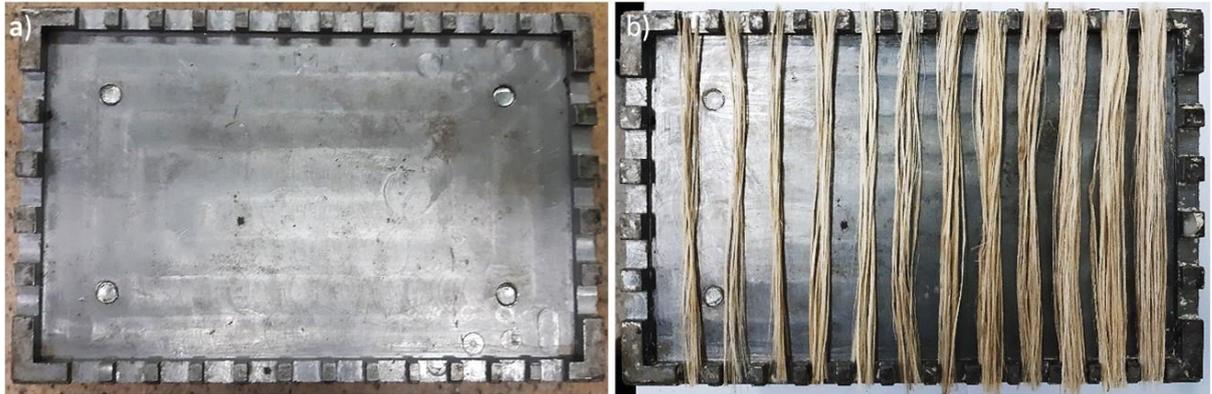


Figura 09: Preenchimento do molde: a) Molde vazio, b) Molde com os grupos de fibras (FONTE: Própria)

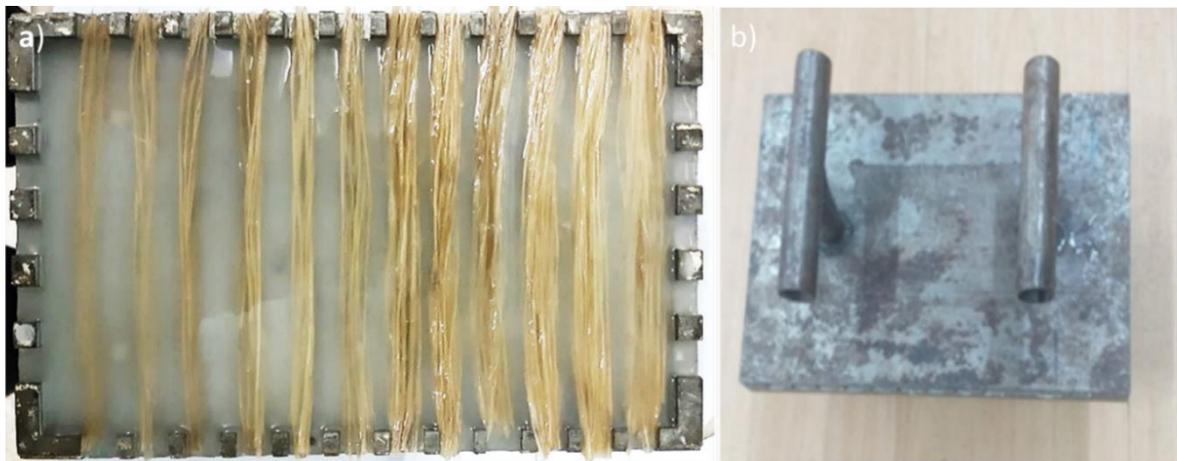


Figura 10: a) Molde preenchido com os componentes misturados, b) Molde fechado (FONTE: Própria)

Depois de curado o material, foi levantada a tampa do molde, no caso dos corpos de prova dos grupos de 13 a 16, como se pode observar na figura 11 e a placa da resina foi extraída do molde utilizando o parafuso extrator (apontado na figura 12b com uma seta vermelha) enroscando-o no furo roscado na placa inferior e expulsando a chapa de resina para o exterior do molde segundo pode-se observar na figura 12.

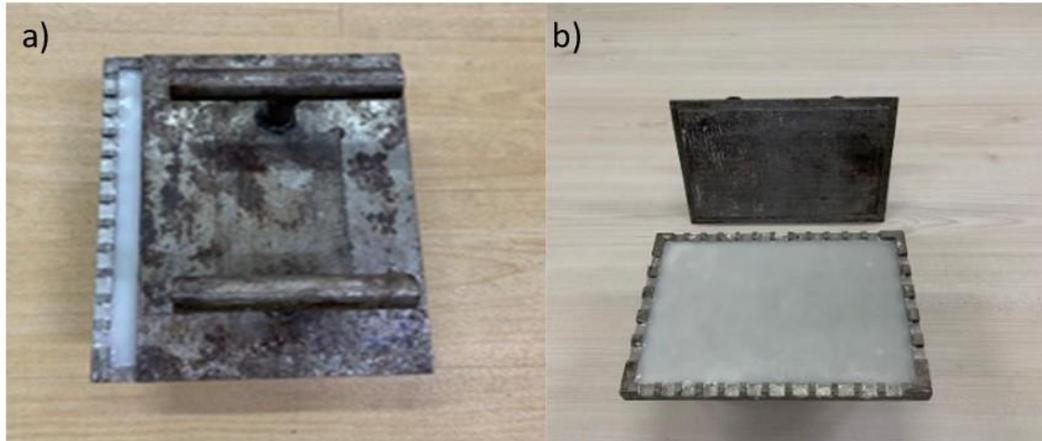


Figura 11: Abertura do molde: a) Deslocamento da tampa do molde, b) Liberação da placa inferior (FONTE: Própria)

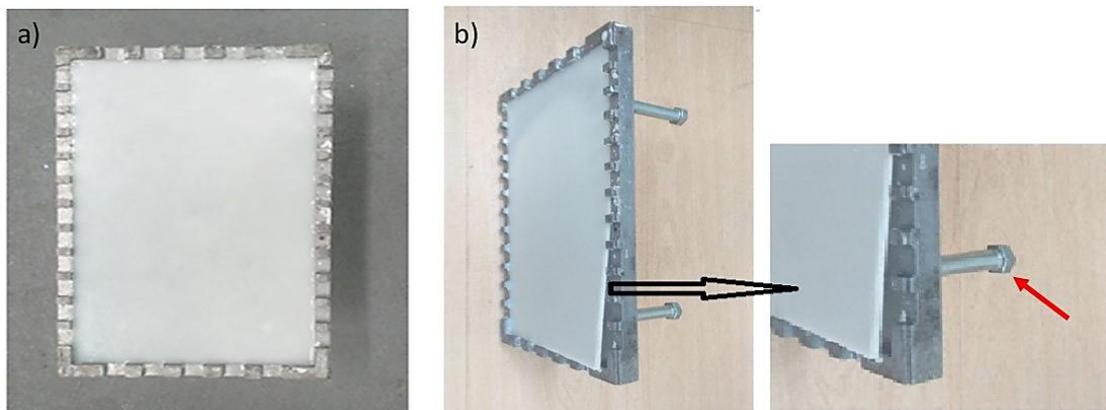


Figura 12: Extração da chapa de resina do molde: a) chapa de resina curada, b) Extração da chapa de resina (FONTE: Própria)

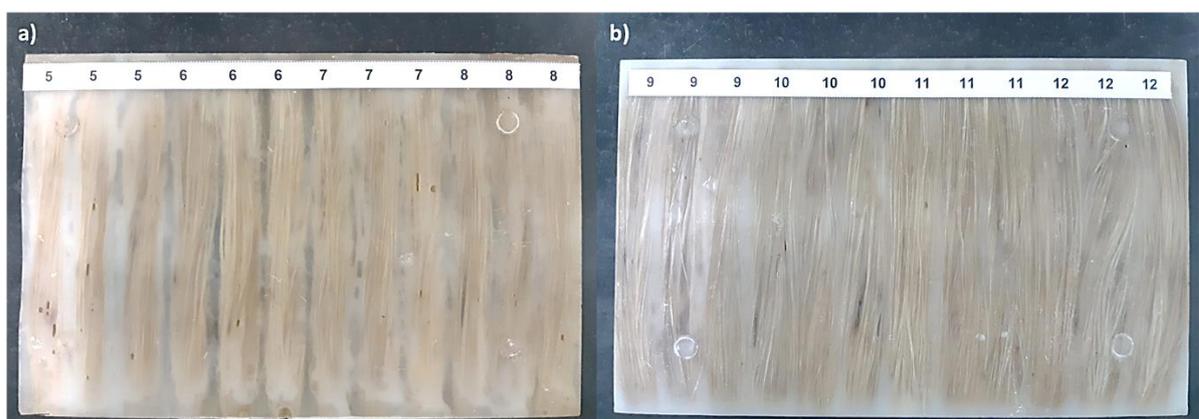


Figura 13: Chapas de resina: a) Contendo os corpos de prova de 5 a 8, b) Contendo os corpos de prova de 9 a 12 (FONTE: Própria)

A partir das chapas de resina (figura 13) foram cortados os corpos de prova segundo as dimensões da norma D638-14 (figura 14) para ensaio de tração em uma máquina Router Laser

CNC modelo VS6040 no laboratório de STEM da Escola Superior de Tecnologia (EST) da Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Na figura 17 pode-se observar a finalização do corte dos corpos de prova a laser e os corpos de prova cortados. E assim obteve-se os 48 corpos de prova.

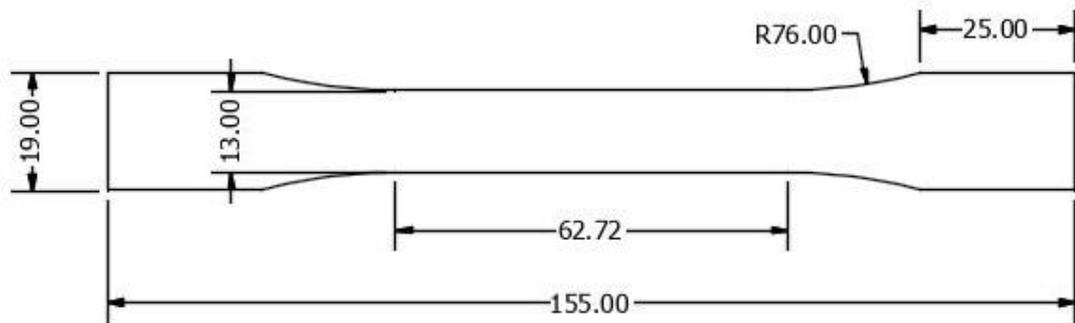


Figura 14: Corpo de prova padronizado (FONTE: Própria)



Figura 15: Máquina Router laser CNC VS6040 (FONTE: site MULTIVISI)

Tabela 7: Especificações técnicas da máquina Router laser CNC VS6040

Marca	VISUTEC
Modelo	VS6040
Potência do Laser	60W
Refrigeração	Resfriamento de água e sistema de proteção com bomba de água
Software compatível	CorelDraw, Laserdraw
Área de Trabalho	60cm x 40cm
Comprimento de onda	10.6 μ m
Vida útil do tubo	Até 10.000 horas
Máx. Velocidade da gravação	400 mm/seg
Velocidade de corte	20 mm/seg
Precisão	0,01 milímetros
Resolução	0.01mm
Fonte de alimentação	220V, 50 - 60Hz
Min. moldagem de caractere	2 milímetros x 2mm, Inglês 1 milímetro x 1mm
Apoiador gráfico	BMP, JPG, TIFF
Sistema de condução	Motor de passo
Software suportado	Corel Draw, Laser Draw
Temperatura de operação	0° C ~ 45° C
Sistema Operacional	Windows 7, 8 e 10 - 32, 64 bits
Temperatura de operação	0 ° C ~ 45 ° C
Umidade	5% ~ 95%
Potência bruta	\leq 400w
Interface	Porta USB - USB
Dimensões	A: 108cm x L: 75cm x C: 140cm

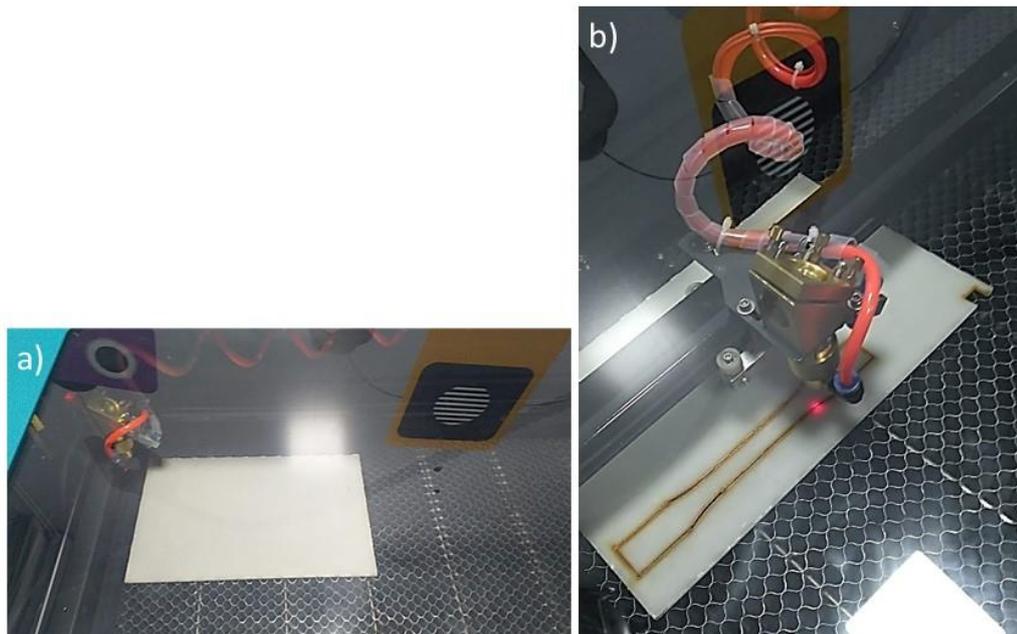


Figura 16: Corte dos corpos de prova a laser: a) Posicionamento da chapa na máquina, b) Início do corte dos corpos de prova. (FONTE: Própria)

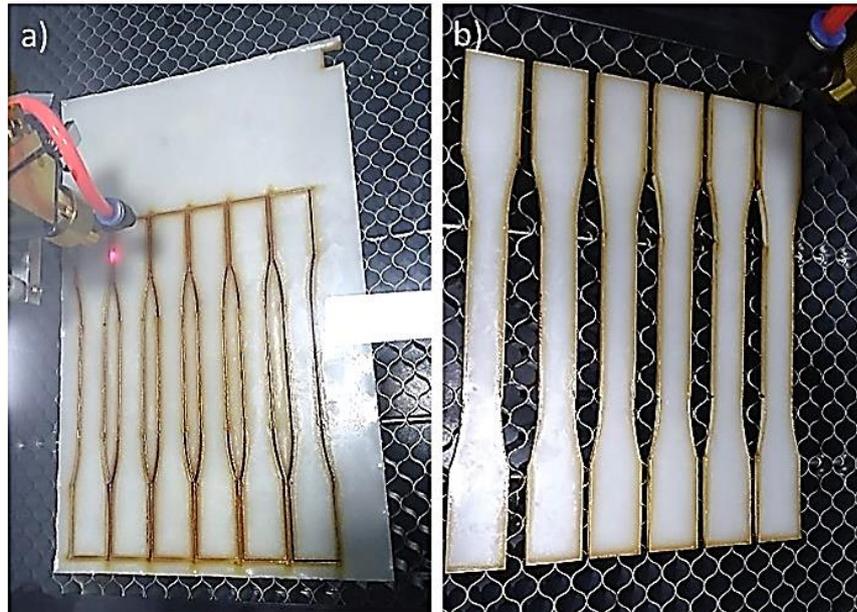


Figura 17: Corte dos corpos de prova a laser: a) Posicionamento da chapa na máquina, b) Corpos de prova depois de cortados. (FONTE: Própria)

3.2.3 Ensaio de tração

Os ensaios de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (Método padrão de ensaio de tração para propriedades de plásticos). Desde os corpos de provas até a velocidade do ensaio foram padronizados de acordo com a norma citada. As características deste ensaio padronizado serão apresentadas neste estudo detalhadamente.

Esse método de teste envolve a determinação das propriedades sobre tração de plásticos reforçados e não reforçados, para o controle e especificação de materiais poliméricos, na forma padronizada de corpos de prova na forma de halteres de acordo com condições definidas de pré-tratamento, temperatura, humidade e velocidade de teste da máquina. Este método é aplicável a materiais de teste de qualquer espessura até 14 mm (0,55 pol.). No caso deste projeto em questão utilizaremos a espessura normalmente utilizada que é de 3 mm. Os valores devem ser apresentados no SI (Sistema Internacional) de unidade assim como as informações presentes na norma.

Os ensaios foram realizados numa Máquina Eletromecânica de Ensaio Universal Marca INSTRON, modelo 5984, com célula de carga de 150 KN. Os ensaios foram realizados a uma velocidade de tração de 5mm/min.

Todos os equipamentos foram regulados de acordo com a Norma ASTM D638 para que todos os resultados fossem padronizados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os corpos de prova foram posicionados na máquina e foi aplicado uma tensão que foi sendo aumentada até a ruptura deles, como mostrado nas figuras 18, 19 e 20.

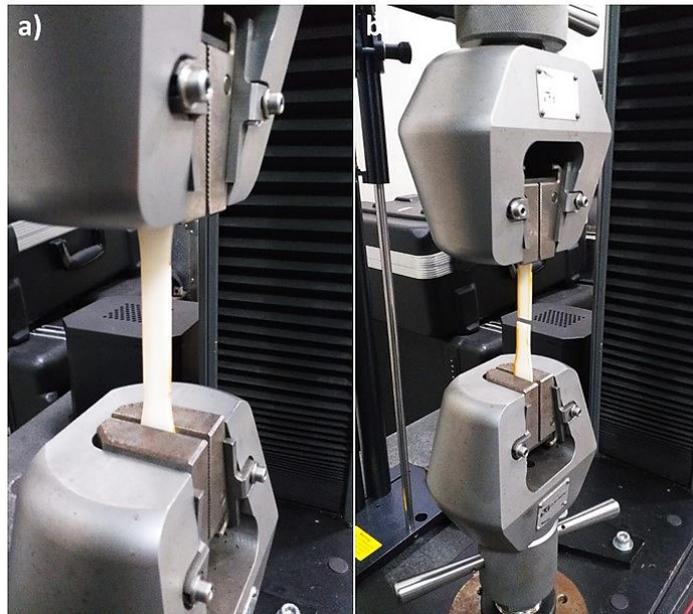


Figura 18: Corpo de prova com resina pura (FONTE: Própria)

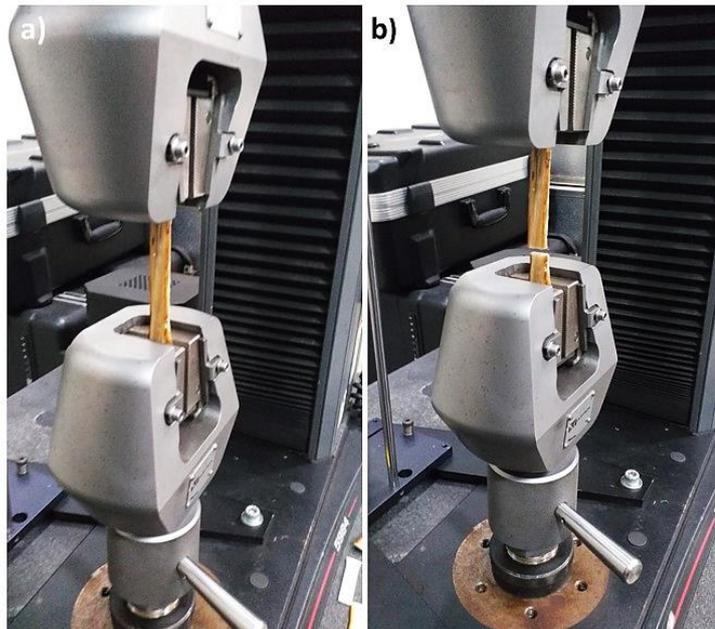


Figura 19: Corpo de prova com pouca fibra curauá (FONTE: Própria)



Figura 20: Corpo de prova muita fibra curauá (FONTE: Própria)

Ao final de todos os 48 ensaios, uma curva tensão-deformação foi plotada a partir das médias dos 3 agrupamentos de cada grupo de fibras para observar o comportamento dos materiais ensaiados, ilustrado na figura 21 onde o eixo das abscissas são as médias das deformações e o eixo das ordenadas são as médias das tensões, e também foi calculado o Módulo de Elasticidade (E) para cada grupo.

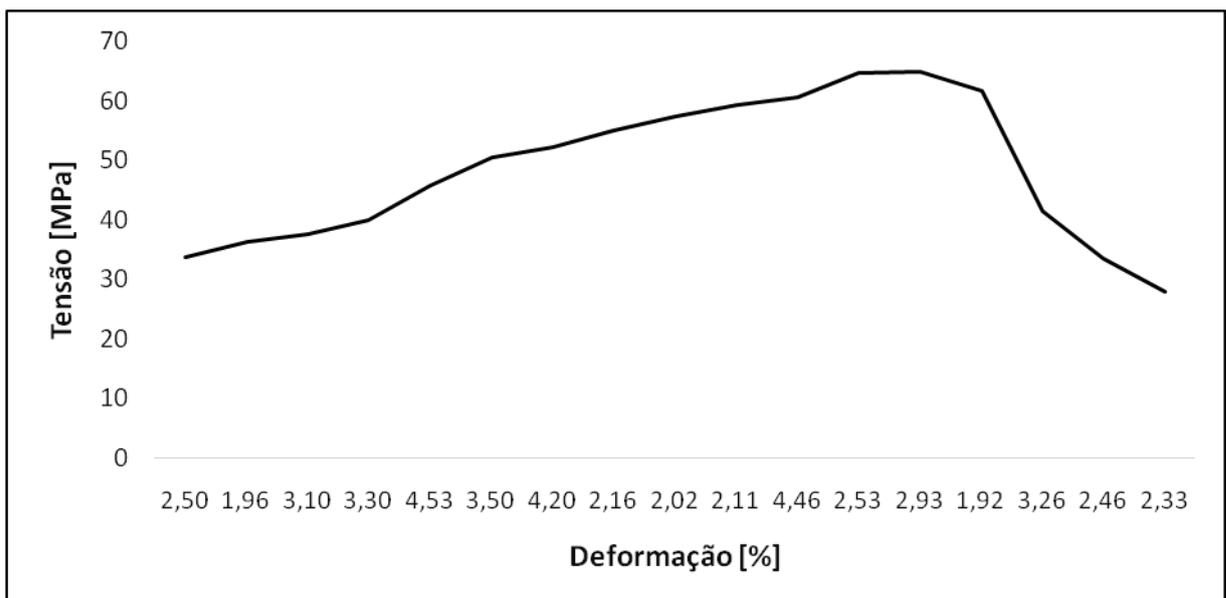


Figura 21: Curva tensão-deformação dos corpos de prova (FONTE: Própria)

Para o cálculo do módulo de elasticidade E, na norma ASTM D638, diz que devemos estender a porção linear inicial da curva tensão-deformação e dividir a diferença de tensão ($\Delta\sigma$) correspondente a qualquer segmento de seção nessa linha reta pela diferença correspondente de deformação ($\Delta\varepsilon$). Todos os valores do módulo de elasticidade devem ser calculados utilizando a área da seção transversal original da média no segmento de comprimento padrão da amostra nos cálculos. Além disso, foram calculados os desvios-padrões para o esforço de tensão, módulo de elasticidade e para a deformação em cada grupo de fibras. Com isso, foi gerada a seguinte tabela 8.

Tabela 8: Valores de tensão, módulo de elasticidade e deformação dos corpos (FONTE: Própria)

Número do corpo de prova	Quantidade de fibra em wt%	Peso da fibra em g	Esforço de tensão em MPa	Módulo de Elasticidade em MPa	Deformação em %
0	Resina Pura	0	33,85 ± 0,7	1870 ± 49	2,5 ± 0,1
1	2,5	0,22	36,35 ± 0,9	2540 ± 56	1,96 ± 0,7
2	5	0,44	37,56 ± 2,5	3593,33 ± 141	3,1 ± 0,2
3	7,5	0,66	39,96 ± 1,5	2216,66 ± 205	3,3 ± 0,1
4	10	0,88	45,71 ± 0,6	2602 ± 31	4,53 ± 0,1
5	12,5	1,09	50,55 ± 2,5	3700 ± 49	3,5 ± 0,1
6	15	1,31	52,27 ± 1,5	3313,33 ± 15	4,2 ± 0,2
7	17,5	1,53	55,07 ± 2,8	4856,66 ± 65	2,16 ± 0,1
8	20	1,75	57,45 ± 2,4	5220 ± 127	2,02 ± 0,3
9	22,5	1,97	59,31 ± 0,3	5225,33 ± 152	2,11 ± 0,1
10	25	2,19	60,61 ± 2,7	4473 ± 155	4,46 ± 1
11	27,5	2,41	64,71 ± 0,8	4506 ± 226	2,53 ± 0,6
12	30	2,63	64,89 ± 0,5	4633,33 ± 91	2,93 ± 0,2
13	32,5	2,85	61,68 ± 2,8	5630 ± 87	1,92 ± 0,1
14	35	3,06	41,48 ± 1,5	2273 ± 212	3,26 ± 0,1
15	37,5	3,28	33,52 ± 1,5	1866,66 ± 113	2,46 ± 0,1
16	40	3,50	27,96 ± 1,3	2573,33 ± 141	2,33 ± 0,5

Pode-se observar com o gráfico apresentadona figura 21 e a tabela 8 que os corpos que apresentaram a maiormédia de resistênciasà tensão foram os do grupo12contendo 30% de fibra curauá em sua composição. Logo em seguida foi gerado mais dois gráficos, o primeiro fazendo um comparativo entre as três amostras que continham 30% de fibra, como mostrado na figura 22, e o segundo fazendo um comparativo entre as três amostras somente com resina, outra com 22,5% de fibra e por fim uma última com 35% de fibra, como mostrado na figura 23.

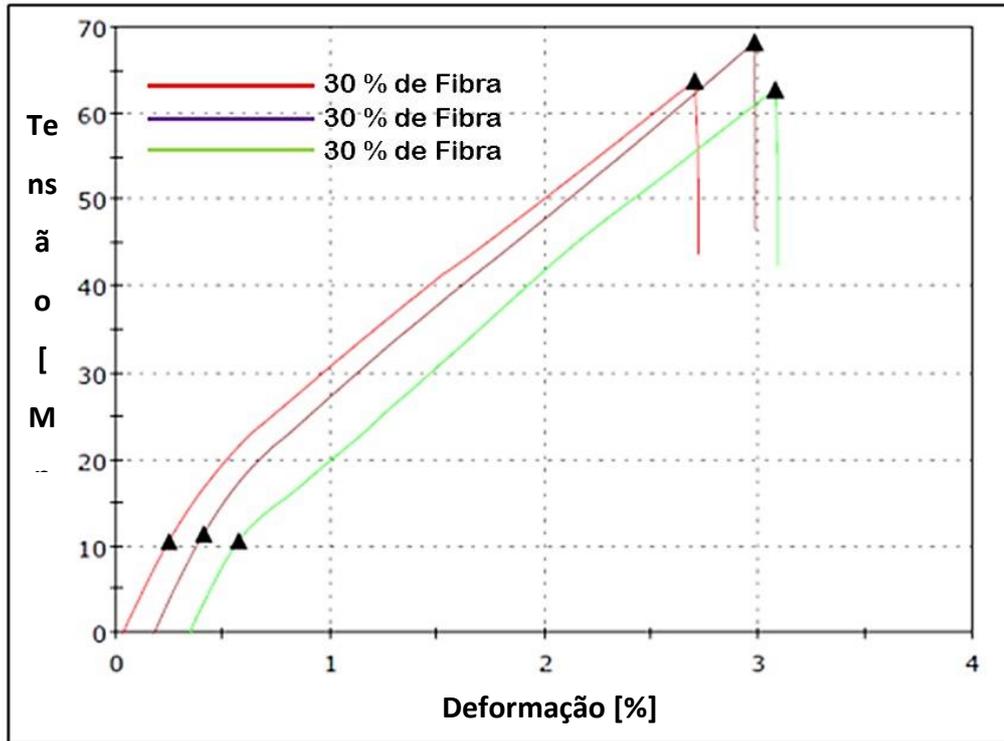


Figura 22: Gráficos de tração gerados pela máquina para os corpos de prova com 30% em Peso de fibra de Curauá (Compósitos de maior resistência) (FONTE: Própria)

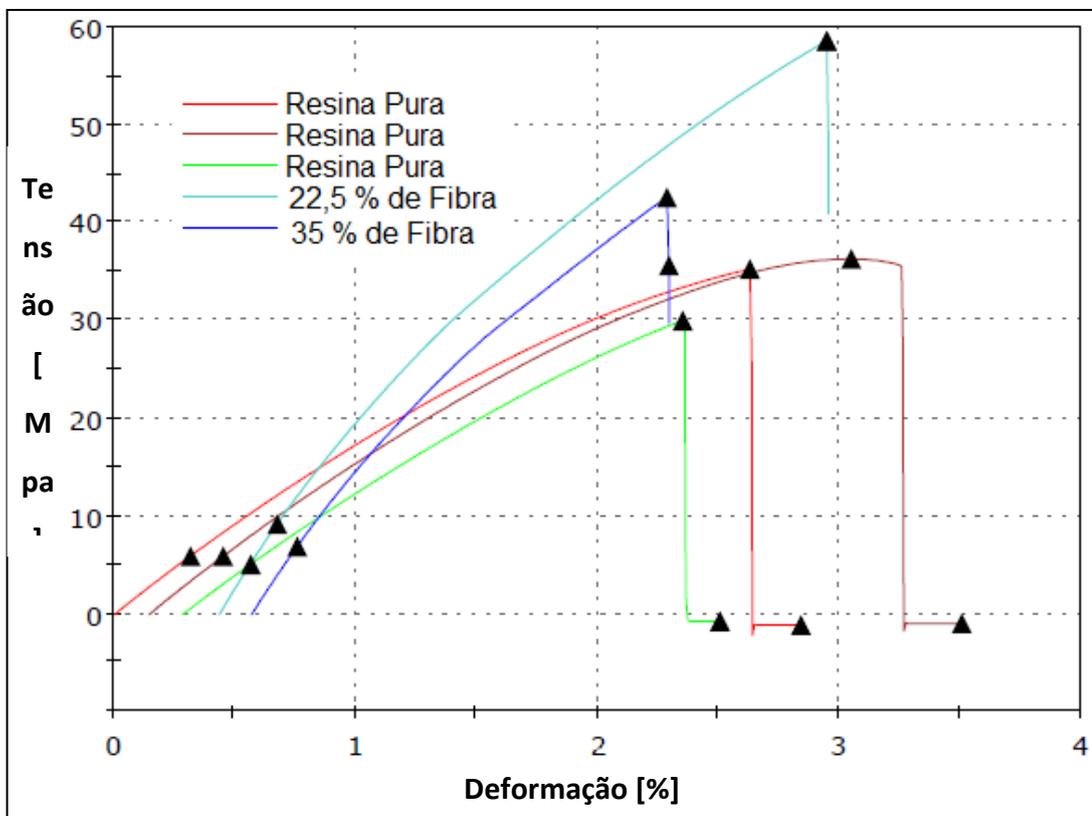


Figura 23: Gráficos de tração gerados pela máquina para corpos de prova com diferentes conteúdos de fibra de Curauá (FONTE: Própria)

Além disso, foi realizada a micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x250, onde se pode constatar que as fibras ficaram bem distribuídas na área do compósito, todavia apareceram bolhas internas no material, como mostrado a figura 24. As partes bem mais escuras são espaços vazios deixados pela quebra da fibra internamente em um plano distante do plano da fratura. Essas áreas escuras significam que as fibras estavam descoladas no plano da fratura e bem coladas internamente provocando a quebra nesses pontos devido a força de tração. Pode-se observar também algumas fibras bem coladas na matriz.

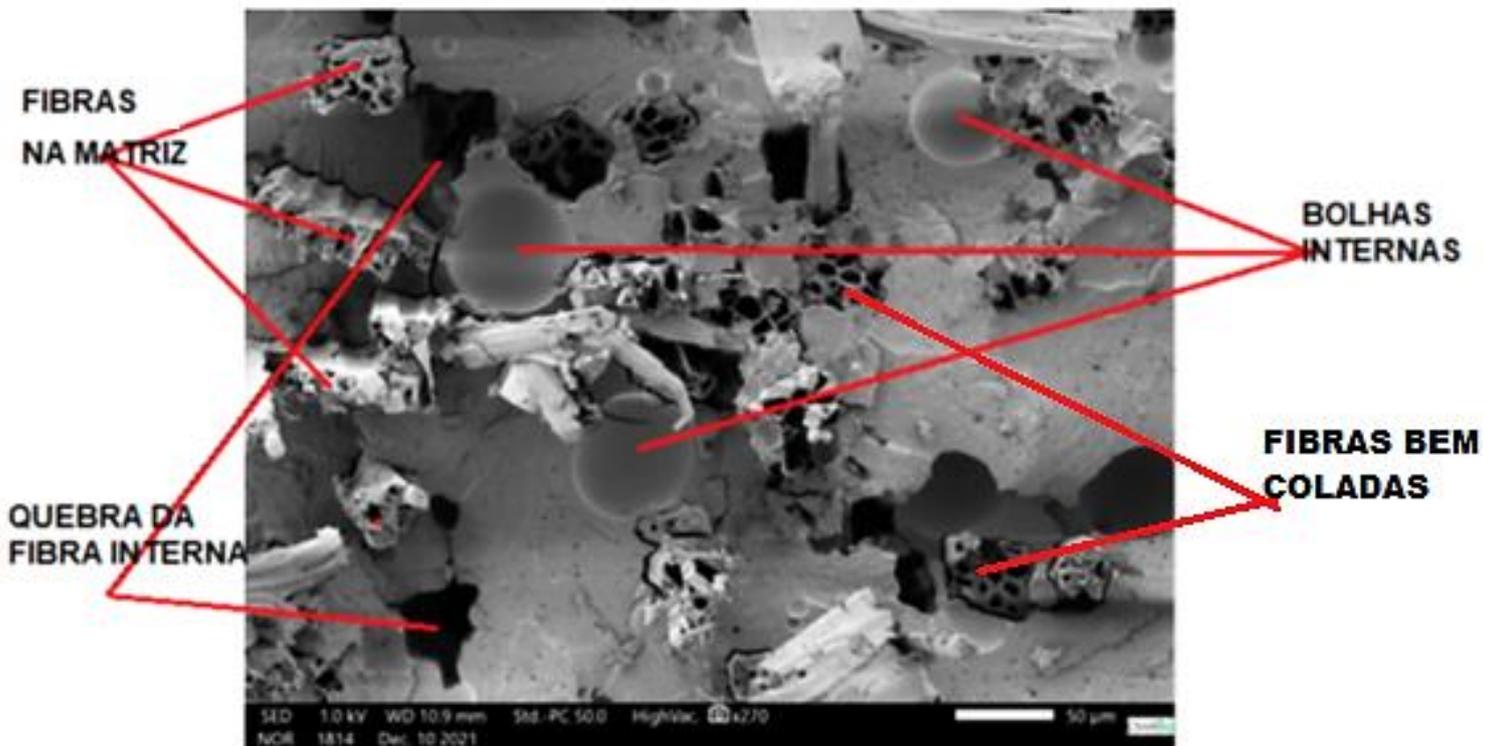


Figura 24: Micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x250. (FONTE: Própria)

Na Figura 25 pode ser observada a micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x150 (um aumento menor), onde constata-se que as fibras ficaram bem distribuídas na área do compósito.

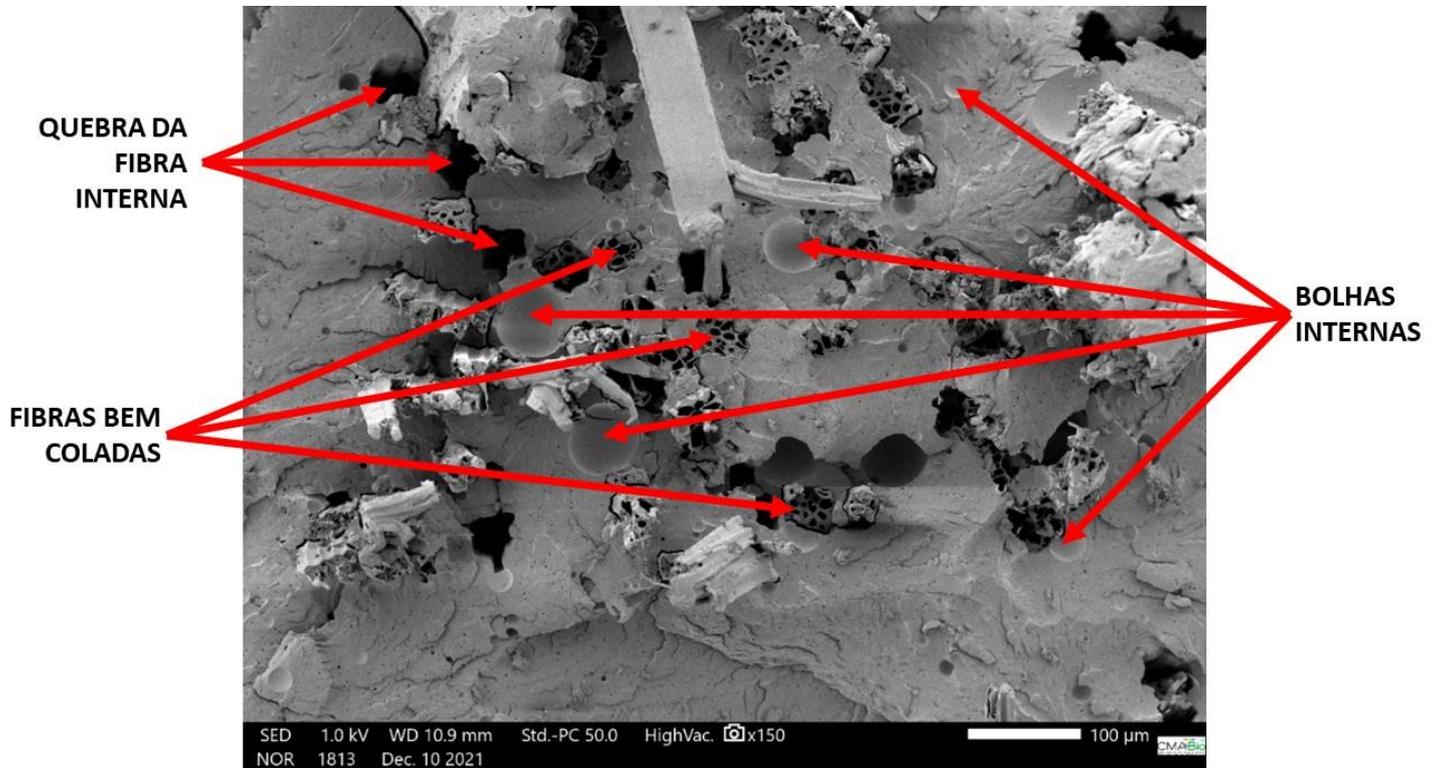


Figura 25: Micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x150. (FONTE: Própria)

Na Figura 26 pode ser observada a micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x750, onde se pode constatar que apareceram bolhas internas no material, quebra da fibra internamente em um plano distante do plano da fratura, e algumas fibras descoladas da matriz no plano da fratura.

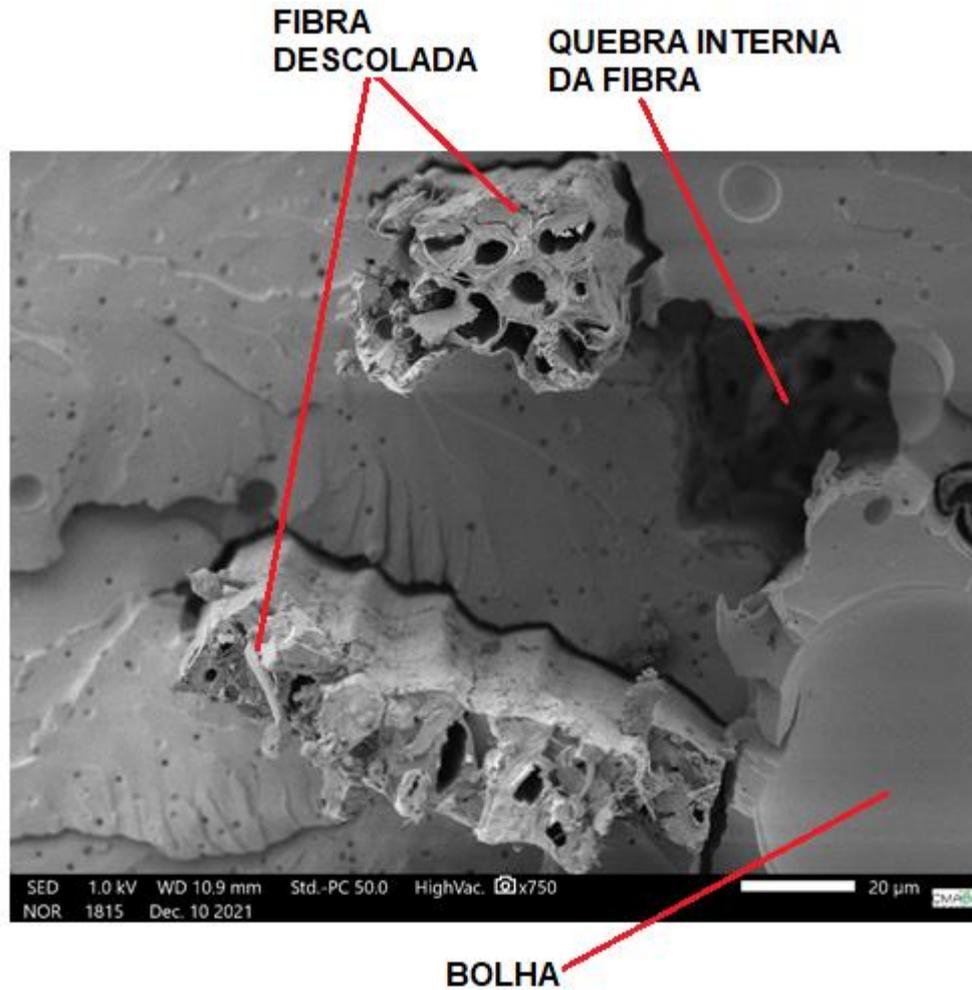


Figura 26: Micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 15% de fibra com magnificação de x750. (FONTE: Própria)

Na Figura 27 pode ser observada a micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 10% de fibra com magnificação de x750, onde se pode constatar que para esta área de análise não apareceram bolhas internas no material nem quebra da fibra internamente em um plano distante do plano da fratura. Também é possível observar uma fibra cuja superfície está completamente lisa por não ter recebido tratamento químico, o que dificulta a adesividade da fibra na matriz e com isso diminui a resistência do compósito.

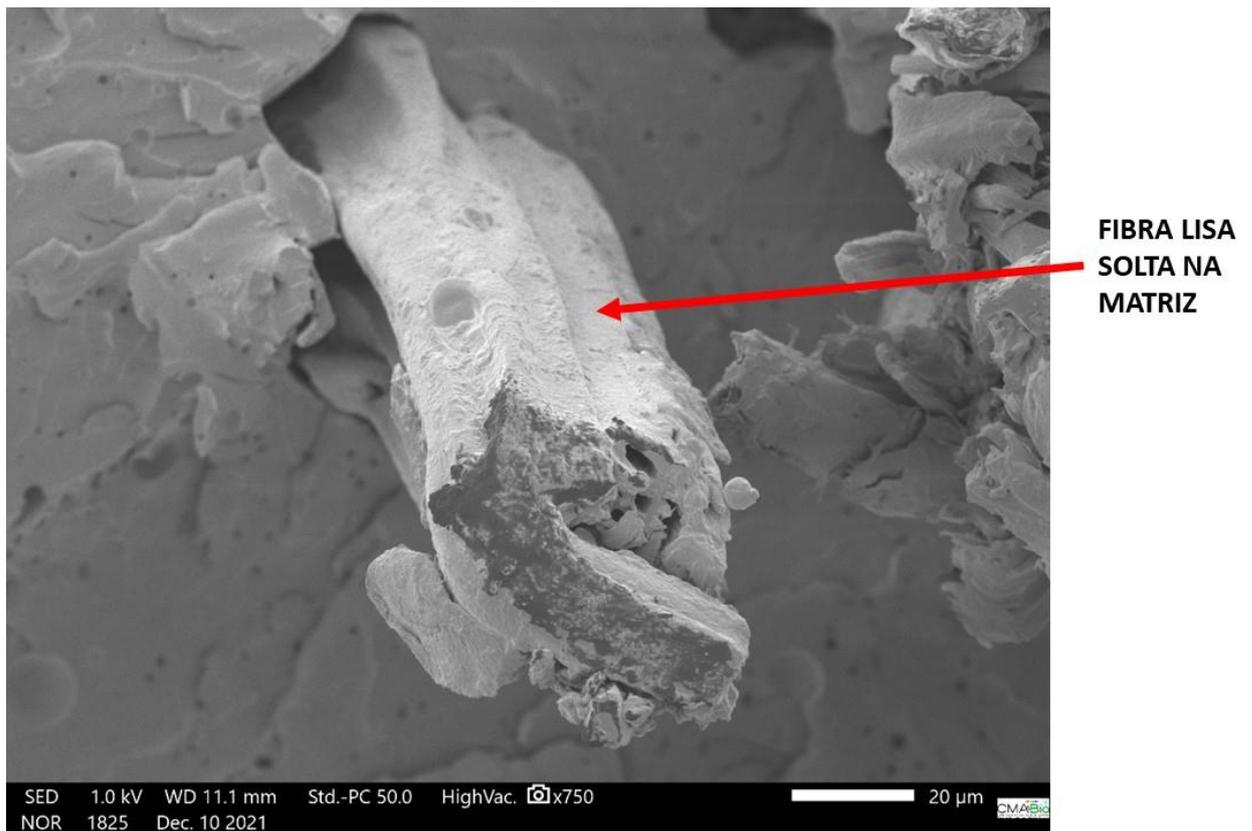


Figura 27: Micrografia da zona da fratura após o ensaio de tração do corpo de prova com 10% de fibra com magnificação de x750. (FONTE: Própria)

5 CONCLUSÕES

Através dos resultados deste trabalho é possível se constatar que as fibras curauá quando acrescentadas aos compósitos de resina epóxi melhoram a resistência a tração desses compósitos, contudo há um limite para isso. De todas as porcentagens de fibras propostas, aquela que obteve o melhor resultado foi a com 30% de fibras em relação ao compósito, como mostrado na tabela 8, após isso a resistência do material começa a diminuir. Também pode-se observar que, de modo geral, o módulo de elasticidade cresce à medida que se aumentam as porcentagens de fibras até o grupo com 32,5% de fibras devido ao aumento de resistência dos corpos de prova.

Além disso, com as micrografias realizadas pode-se verificar que as fibras ficaram bem distribuídas na área do compósito e ainda que não tenham sofrido nenhum tratamento químico, muitas delas mantiveram-se fixas aos corpos de prova após o rompimento dos materiais ou seja, aderiram bem ao material. Contudo, houveram algumas fibras descoladas que saíram do material com a ruptura deixando assim um vazio nele.

Com todos os resultados apresentados, é possível concluir que o uso das fibras, mesmo sem tratamento químico, é satisfatório afinal com apenas 30% de fibras é possível, praticamente, duplicar a resistência do material que saiu de aproximadamente 34 MPa (resina pura) para praticamente 65 MPa. As aplicações desses compósitos não serão ilimitadas, contudo, os compósitos com a fibra amazônica curauá podem substituir, em vários casos, os compósitos de fibras sintéticas, proporcionando um menor impacto ao meio ambiente, ajudando na sustentabilidade e podendo até gerar novas fontes de emprego para as populações mais pobres da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, C. M. **Hidrólise enzimática de resíduos lignocelulósicos utilizando celulasas produzidas pelo fungo *Aspergillus Níger***. 2010. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.
- AQUINO, R. C. M. P.; MONTEIRO, S. N.; D'ALMEIDA, J. R. M. Desenvolvimento de Compósitos de Matriz Polimérica e Piaçava. In: Net, **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. 2000.
- ARAÚJO, J. R.; WALDMAN, W. R.; DE PAOLI, M. A. Thermal properties of high density polyethylene composites with natural fibres: coupling agent effect. **Polymer Degradation and Stability**, 93, pp. 1770-1775, 2008.
- ASKELAND, Donald R. **Ciência e engenharia dos materiais**. 3. ed. São Paulo: Cengage learning, 2014.
- BALEY, C., BUSNEL, F., GROHENS, Y., SIRE, O., Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of flax fibre–polyester resin. **Science Direct Composites**, 2016, Part A 37 1626–1637
- BARBOSA, A. de P. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de buriti**. 2011. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2011.
- CALLISTER, W. D. Jr. **Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CANDIDO, V. S. **Caracterização e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar**. 2014. 188 p. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, 2014.
- CARVALHO, Vinícius. **Materiais compósitos**. 2013. Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande, 2013.
- CORRÊA, A. C., TEIXEIRA, E. M., PESSAN, L. A., Mattoso, L. H. C., Cellulosenanofibersfromcurauafibers, **Cellulose**, 2010;17:1183–1192.
- GALLO, M. **Curauá é exemplo de potencial comercial do bionegócio**. Manaus online, 13 de dezembro de 2019. Disponível em: <<https://www.manausonline.com/noticias/noticias-leitura.asp?ID=12524>>
- GARCIA, G.; BEZAKI, A.; BOUMEDIRI, H; ET AL. Hybrid epoxy composites made from treated curauá fibres and organophilic clay. **Sage Journals**, V. 55: No.1, p. 57-69, july, 2020. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998320945785>>
- GARCIA, G. ET AL. Hybrid Polyester Composites Reinforced with Curauá Fibres and Nanoclays. **Fibers and Polymers**, Vol.21, No.2, p. 399-406, february, 2020. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s12221-020-9506-7>>

GIOCOMINI, N. P.; LEÃO, A. L.; NEIS, A. M. Unsaturated polyester based composites reinforced with curauá fiber – preliminar studies. **ISNaPol**, pp. 386-392, 2000.

GOMES, A.; MATSUO, T.; GODA, K.; OHGI, J. Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curauá fiber green composites. **Composites Part A – Applied Science and Manufacturing**, 38 (8), pp. 1811-1820, 2007.

JAYARAMAN, K. **Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation**. *Composites Sci. Technol.* v. 63, p. 367-374, 2003.

JOHN, M.J.; THOMAS, S. **Biofibers and Biocomposites**. *Carbohydrate Polymers*, v. 71, p. 343-364, 2008.

LEVY NETO, F. L.; PARDINI, L.C.; **Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia**. Editora Edgar Blucher Ltda, 2006.

LUZ, F. S. da. **Avaliação do comportamento balístico de blindagem multicamada com compósito de epóxi reforçado com fibra de juta**. 2014. 119p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.

MANO, B.; ARAÚJO, J. R.; SPINACÉ, M. A. S.; DE PAOLI, M. A. Polyolefin composites with curauá fibres: effect of the processing conditions on mechanical properties, morphology and fibres dimensions. **Composites Science and Technology**, 70, pp. 29-35, 2010.

MARGEM, J. I. **Estudo das características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras de malva**. 2013. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2013.

MARINELLI, A. L. ET. AL. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais da Biodiversidade: Uma contribuição para a sustentabilidade Amazônica**. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 2008, v. 18, n. 2, p.92-99.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais compósitos poliéricos**. São Paulo: Artiliber, 2011.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D.; CARVALHO, E. A.; D'ALMEIDA, J. R. M. Comportamento mecânico e características estruturais de compósitos poliméricos reforçados com fibras contínuas e alinhadas de curauá. **Revista Matéria**, 11 (3), pp.197-203, 2006.

MONTEIRO, S. N.; AQUINO, R. C. M. P.; LOPES, F. P. D. Performance of curauá fibers in pullout tests. **Journal of Materials Science**, 43, pp. 489-493, 2008.

MORAIS, J. A., GADIOLI, R., DE PAOLI, M., Curauá fiber reinforced high-density polyethylene composites : effect of impact modifier and fiber loading, **Polímeros Ciência e Tecnologia**, 2016, 26(2):1-8.

MOREIRA, A. M. **Materiais de Construção I: Materiais Compósitos**. Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Tomar. Tomar, Portugal, 2009.

MOTHE, C. G.; ARAUJO, C. R.; WANG, S. H. Thermal and mechanical characteristics of polyurethane/curaua fiber composites. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 95 (1), pp. 181-185, 2009.

MULTIVISI. **Router Laser**. Disponível em:

<<https://www.multivisi.com.br/impresao-corte-e-laminacao/router-laser-e-cnc/maquina-router-laser-cnc-vs6040-corte-e-gravacao-60x40cm-60w>>

NASCIMENTO, D. C. de O. **Análise das propriedades de compósitos de fibras de piaçava e matriz de resina epóxi**. 2009. 136 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2009.

PLASTICOVIRTUAL. **Resinas epóxi**. Disponível em:

<<https://plasticovirtual.com.br/o-que-e-quais-os-tipos-e-onde-sao-utilizadas-as-resinas-epoxi/>>. Acesso em: 22/11/2021

REDELEASE. **Produtos**. Disponível em:

<<https://www.redelease.com.br/produtos>>. Acesso em: 06/12/2021

ROSATO, D. V.; **Reinforced Plastics Handbook**. Publisher: Elsevier, 2004.

SARTORI, Humberto. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibras de vidro**. 2010. 67. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. **Studies on lignocellulosic fibers of Brasil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications**. Composites: Part A, 38, pp. 1694-1709, 2007.

SILVA, R. V. **Compósitos de Resina Poliuretano Derivada de Oléo de Mamona e Fibras Vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SILVA, R. V., AQUINO, E. M. F., Curaua Fiber: A New Alternative to Polymeric Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008; 27:103– 112.

SINGH, B.; GUPTA, M.; VERMA, A., HAJELA, R. B. **Studies on polymer composites based on sisal polyester and glass modified sisal fibers, filler and unsaturated polyester resin**. *Research and Industry*, 39 (1), pp. 38-42, 1994.

SOUZA, F. G.; OLIVEIRA, G. E.; RODRIGUES, C. H. M.; SOARES, B. G.; NELE, M.; PINTO, J. C. Natural Brazilian Amazonic (curaua) fibers modified with polyaniline nanoparticles. **Macromolecular Materials and Engineering**, 294 (8), pp. 484-491, 2009.

ZAH, R.; HISCHIER, R.; LEÃO, A. L.; BRAUM, I. Curaua fibers in the automobile industry - A sustainability assessment. **Journal of Cleaner Production**, 15 (11-12), pp. 1032-1040, 2007.

YUE, Y., HAN, J., HAN, G., ZHANG, Q., FRENCH, A. D., WU, Q., Characterization of cellulose I/II hybrid fibers isolated from energycane bagasse during the delignification process: Morphology, crystallinity and percentage estimation, **Carbohydrate Polymers**, 2015;133:438–447.