

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS
REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS DE CURAUÁ**

ROGÉRIO DE SOUZA SOARES

MANAUS

2019

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS

ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS
REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS DE CURAUÁ**

ROGÉRIO DE SOUZA SOARES

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade do Estado do Amazonas (UEA).

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Garcia Del Pino

MANAUS

2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

S676a Soares, Rogério de Souza
 Avaliação da resistência à tração de materiais compósitos reforçados com fibras contínuas de curauá / Rogério de Souza Soares. Manaus : [s.n], 2019.
 75 f.: color.; 30 cm.

 TCC - Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2019.
 Inclui bibliografia
 Orientador: Gilberto Garcia Del Pino
 Coorientador: Antônio Cláudio Kieling

 1. Compósitos poliméricos. 2. Curauá. 3. Resina Epóxi. 4. NaOH. 5. Minitab. I. Gilberto Garcia Del Pino (Orient.). II. Antônio Cláudio Kieling (Coorient.). III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Avaliação da resistência à tração de materiais compósitos reforçados com fibras contínuas de curauá

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

ROGÉRIO DE SOUZA SOARES

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DE MATERIAIS COMPÓSITOS
REFORÇADOS COM FIBRAS CONTÍNUAS DE CURAUÁ**

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, 9 de dezembro de 2019.

Banca examinadora:



Orientador: Prof. Dr. GILBERTO GARCIA DEL PINO.



Coorientador: Prof. Dr. ANTONIO CLAUDIO KIELING.



Prof. Dr. ARÍSTIDES RIVERA TORRES

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me incentivaram e me apoiaram ao longo da minha vida acadêmica, especialmente aos meus pais Rosiana de Souza Soares e Moacir dos Santos Soares.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a Deus, pela vida e por me dar capacidade de buscar conquistar todos os meus objetivos.

Aos meus queridos pais Rosiana e Moacir, obrigados a conviver com minhas fases de frustração e desânimos ao longo desses meses, e que agora podem compartilhar comigo este momento de alegria sonhado por todos em nossa casa.

Ao orientador Prof. Dr. Gilberto Garcia del Pino, pela imensa ajuda, prontidão, paciência e muitos ensinamentos reportados ao longo desses anos.

Ao coorientador Prof. Dr. Antônio Cláudio Kieling pelas orientações e esforço para que o desenvolvimento do trabalho seguisse num ritmo adequado.

Aos meus amigos que compartilharam comigo inúmeros momentos emocionantes entre alegrias e tristezas ao longo da nossa jornada.

Agradeço ainda a todas as pessoas que, na UEA, tornaram possível que eu pudesse fazer esse curso e realizar o meu trabalho de pesquisa.

A todos que de alguma forma direta ou indiretamente contribuíram para elaboração do presente trabalho.

A todos o meu muito obrigado!

“Nenhum esforço faz sentido se você não acredita em si mesmo”

(Maito Gai)

RESUMO

No presente trabalho foram produzidos corpos de prova de materiais compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de curauá dispostas de forma contínua na matriz. Os compósitos foram fabricados por moldagem manual, moldagem por compressão em um molde desenvolvido para que os corpos de prova atendam as dimensões da norma ASTM D638-14 tipo 1, e também foram confeccionados em temperatura ambiente ($T = 23^{\circ}\text{C}$). Para avaliar o comportamento do compósito em ensaios de tração buscou-se três variáveis com potencial influência em tais características mecânicas: percentual mássico de fibra, percentual volumétrico de hidróxido de sódio em solução aquosa, tempo que o material de reforço é submetido ao tratamento alcalino. Foram utilizados dois níveis para o percentual de fibra (5% ou 15%), quatro níveis para o percentual volumétrico de NaOH (2,5%, 5%, 7,5% ou 10%) e três níveis para o tempo de exposição (2,5h, 5h ou 10h). Também foram produzidos cinco corpos de prova extras para efeito de comparação, estes não passaram por nenhum tipo de tratamento químico e possuem percentual de fibra de: 0%, 5%, 10%, 15% e 20%. O fator controlável com maior influência nos resultados do ensaio de tração foi o percentual de fibra, de forma geral o grupo com percentual de fibra de 15% obteve uma tensão de ruptura média de 88,94 MPa contra 52,39MPa o grupo com percentual de 5% de fibra, representando uma melhora de 69,76% com a adição no aumento de 10% de percentual mássico de fibra. Além disso foram analisados a influência dos três fatores no Módulo de Elasticidade e no alongamento máximo utilizando o Minitab.

Palavras-chave: Materiais compósitos, Fibras de Curauá, Resina Epóxi, NaOH, Minitab

ABSTRACT

In the present work were produced specimens of epoxy resin composite materials reinforced with cureuá fibers continuously arranged in the matrix. The composites were manufactured by manual molding, compression molding in a mold developed so that the specimens meet the dimensions of standard ASTM D638-14 type 1, and were also made at room temperature ($T = 23^{\circ}\text{C}$). To evaluate the behavior of the composite in tensile tests, three variables with potential influence on such mechanical characteristics were sought: fiber mass percentage, volumetric percentage of sodium hydroxide in aqueous solution, while the reinforcement material is subjected to alkaline treatment. Two levels were used for fiber percentage (5% or 15%), four levels for volumetric NaOH percentage (2.5%, 5%, 7.5% or 10%) and three levels for exposure time. (2.5h, 5h or 10h). Five extra specimens were also produced for comparison purposes, they did not undergo any type of chemical treatment and have fiber percentage of: 0%, 5%, 10%, 15% and 20%. The controllable factor with the greatest influence on the tensile test results was the fiber percentage, in general the group with 15% fiber percentage obtained an average rupture stress of 88.94 MPa against 52.39MPa the group with percentage of fiber. 5% fiber, representing a 69.76% improvement with the addition of a 10% increase in fiber mass percentage. In addition, the influence of the three factors on the Elasticity Module and the maximum elongation using Minitab was analyzed.

Keywords: Composite materials, Curauá fibers, Epoxy resin, NaOH, Minitab.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fases de um compósito	19
Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos.....	20
Figura 3- Classificação de fibras utilizadas na confecção de compósitos.....	21
Figura 4 - Orientação e tipos de fibras em compósitos	23
Figura 5 - Grupo epoxídico	26
Figura 6 - Estrutura química da resina epóxi DGEBA.....	27
Figura 7 - Classificação das fibras naturais	28
Figura 8 - Representação esquemática do tratamento de mercerização na superfície da fibra lignocelulósica	33
Figura 9 - Fluxograma	35
Figura 10 Fibras no estado in natura	36
Figura 11- Grupos de fibras recebendo tratamento químico com NaOH.....	36
Figura 12 - Fibras em processo de secagem	37
Figura 13 - Estufa utilizada (a), fibras dentro da estufa (b), temperatura configurada na estufa (c).....	37
Figura 14 - Conjunto resina epoxi e endurecedor.....	38
Figura 15 - Molde metálico utilizado	38
Figura 16 - Desmoldante para resina epóxi	39
Figura 17 - Molde preparado para receber o material compósito.....	39
Figura 18 - Dimensionamento corpo de prova AutoCAD.....	40
Figura 19 - Resultados do comando MASSPROP no AutoCAD	40
Figura 20 - Fibras pesadas e identificadas.....	41
Figura 21 - Balança utilizada (a), Molde aberto com resina e fibra (b), Molde fechado aguardando a cura(c)	43
Figura 22 - Corpos de prova identificados e armazenados.....	43
Figura 23 - Máquina de ensaios de tração	44

Figura 24 - Corpos de prova pós ensaio de tração.....	44
Figura 25 - Planejamento do experimento.....	46
Figura 26 - Tensão de ruptura versus número do corpo de prova crescente.....	47
Figura 27 – Tensão de ruptura crescente versus número do corpo de prova.....	47
Figura 28 – Regressão linear e termos da equação da tensão de ruptura	48
Figura 29 - Sumário do modelo de regressão linear para tensão de ruptura no Minitab.....	48
Figura 30 - Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para a resposta tensão de ruptura	49
Figura 31 - Probabilidade Normal versus resíduos para tensão de ruptura.....	50
Figura 32 - Resíduos versus valor ajustado para tensão de ruptura	50
Figura 33 - Histograma dos resíduos	51
Figura 34 - Gráfico de contorno de Tensão de ruptura versus percentual de fibra e percentual de NaOH.....	51
Figura 35 - Gráfico de superfície, Tensão de ruptura x Percentual de fibra x Percentual de NaOH.....	52
Figura 36 - Módulo de elasticidade versus número do corpo de prova crescente.....	53
Figura 37 - Módulo de elasticidade crescente versus número do corpo de prova.....	53
Figura 38 - Regressão Linear e termos da equação para Módulo de Elasticidade	54
Figura 39 - Sumário do modelo de regressão para Módulo de Elasticidade	54
Figura 40 - Gráfico de Pareto para módulo de Elasticidade.....	55
Figura 41 - Probabilidade normal para resíduos do Modulo de Elasticidade.....	55
Figura 42 - Resíduos do Modulo de Elasticidade versus valor ajustado	56
Figura 43 - Histograma do Módulo de Elasticidade versus resíduos	56
Figura 44 - Gráfico de contorno do Módulo de Elasticidade x Percentual de fibra x Percentual de NaOH.....	57
Figura 45 - Gráfico de superfície para Módulo de Elasticidade x Percentual de fibra x Percentual de NaOH	58
Figura 46 - Alongamento versus número do corpo de prova crescente	59

Figura 47 - Alongamento crescente versus número do corpo de prova	59
Figura 48 -Regressão Linear e termos da equação para Alongamento.....	60
Figura 49 - Sumário do modelo de Regressão Linear da Elasticidade	60
Figura 50 - Gráfico de Pareto para Alongamento.....	61
Figura 51 - Probabilidade normal para resíduos do Alongamento.....	61
Figura 52 -Resíduos versus valor ajustado do Alongamento	62
Figura 53 - Histograma dos resíduos do Alongamento.....	62
Figura 54 - Gráfico de contorno Alongamento x Percentual de fibra x Percentual de NaOH .	63
Figura 55 - Gráfico de superfície: Alongamento x Percentual de fibra x Percentual de NaOH.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algumas propriedades de polímeros termoplásticos e termorrígidos	25
Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras	29
Tabela 3 - Massa dos corpos de prova 100% resina epóxi.....	41
Tabela 4 - Composição mássica dos corpos de prova	42
Tabela 5 - Resultados ensaios de tração	45
Tabela 6 - Variáveis e níveis DOE	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de normas técnicas
ASTM	Sociedade Americana para Testes de Materiais
CO₂	Dióxido de Carbono ou Gás Carbônico
CP	Corpo de prova
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
NaOH	Hidróxido de sódio
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
UEA	Universidade do Estado do Amazonas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PROBLEMATIZAÇÃO E HIPÓTESES	15
1.2	DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	15
1.3	OBJETIVOS	15
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivo específico	15
1.3.3	Justificativa	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	MATERIAIS COMPÓSITOS	18
2.2	COMPÓSITOS REFORÇADOS POR FIBRA	20
2.3	MATRIZES POLIMÉRICAS	24
2.4	RESINA EPÓXI	26
2.5	FIBRAS NATURAIS	27
2.6	FIBRA DE CURAUÁ	30
2.7	MÉTODOS DE OPTIMIZAÇÃO DA INTERFACE FIBRA-MATRIZ	31
2.7.1	Tratamento Alcalino de Mercerização	32
2.8	MINITAB	33
3	METODOLOGIA.....	34
3.1	MÉTODOS	34
3.2	TÉCNICAS	34
3.3	PROCEDIMENTOS	34
3.3.1	Tratamento superficial das fibras de curauá	35
3.3.2	Preparação da resina epóxi	37
3.3.3	Preparação do molde	38
3.3.4	Cálculo das proporções de cada material nos corpos de prova	39
3.3.5	Preparação dos corpos de prova	43
3.3.6	Ensaio de tração	44
4	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	46
5	SÍNTESE CONCLUSIVA	65
6	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	67
	REFERÊNCIAS.....	68
	ANEXOS.....	71

1 INTRODUÇÃO

O uso de materiais proveniente de fontes renováveis é uma tendência a algum tempo, a conscientização dos países combinada com a necessidade de alterar o cenário atual de utilização de recursos não renováveis está alavancando este setor promissor.

Com esse cenário o uso de materiais compósitos reforçados com fibras vegetais surge como uma alternativa aos materiais sintéticos derivados de petróleo na maioria dos casos. Dentre as diferentes fibras naturais que podem ser adicionadas aos compósitos uma das mais promissoras é o curauá (*Ananas erectofolius*), o grande interesse da comunidade científica por essa fibra deve-se principalmente ao fato dela possuir excelentes propriedades mecânicas e baixa densidade, que são características essenciais para a indústria automobilística e aeronáutica por exemplo.

Além de substituir um material de origem fóssil, o curauá ainda pode deixar os materiais que ele for usado como reforço mais leves, diminuindo o consumo de combustível caso este faça parte de um veículo.

O curauá é uma planta da família das Bromeliáceas, mesma família do abacaxi, muito cultivada na região Amazônica, principalmente no estado do Pará. Essa fibra tem uma grande importância econômica para a região paraense, pois muitas famílias garantem seu sustento a partir do seu cultivo. O cultivo dessa planta ainda não é muito difundido no Amazonas, mas vem crescendo e apresenta boa sinergia com o solo local do estado. No entanto, a importância principal dessa planta são suas características tecnológicas superiores a outras fibras vegetais, algumas pesquisas têm buscado aplicação para o fruto do curauá, por ser um fruto muito ácido fica difícil ser preparado para consumo.

Para analisar o compósito como substituto de fibras sintéticas em algumas aplicações, utiliza-se nesse trabalho a resina epóxi como matriz polimérica, também se optou por analisar três fatores principais na composição dos corpos de prova: percentual de fibras, percentual de NaOH na solução aquosa que as fibras foram submetidas e tempo que as fibras permaneceram na solução aquosa.

1.1 Problematização e hipóteses

PROBLEMA

Como é possível melhorar a resistência à tração nos compósitos reforçados com fibras de curauá?

HIPÓTESES:

H0: Alterando o percentual mássico de fibras no compósito.

H1: Alterando a concentração de hidróxido de sódio na solução aquosa de NaOH.

H2: Alterando o tempo de permanência das fibras na solução aquosa de NaOH.

1.2 Delimitação do estudo

O estudo tem como foco analisar a resistência a tração de materiais compósitos com matriz de resina epóxi reforçados com fibras de curauá. Porém, este trabalho delimita-se ao tratamento alcalino via hidróxido de sódio, utilizando diferentes concentrações e tempos para analisar a melhor combinação. Os materiais serão caracterizados por métodos físicos e a partir dos resultados realizaram-se análises dedutivas e quali-quantitativas com o auxílio do software Minitab.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo geral analisar o efeito de três variáveis selecionadas na resposta de resistência à tração dos compósitos com matriz epóxi reforçados com fibras contínuas de curauá.

1.3.2 Objetivo específico

- Modificar a superfície das fibras de curauá através de tratamento alcalino de hidróxido de sódio,
- Caracterizar os compósitos por meio de ensaios mecânicos de tração;
- Analisar os resultados dos ensaios de tração utilizando o software Minitab.

1.3.3 Justificativa

Projetar, pesquisar e analisar resultados é indispensável na formação de qualquer profissional, dessa forma o trabalho de conclusão de curso é uma oportunidade para colocar em prática uma parte do conhecimento adquirido ao longo desses anos de aprendizado. Explorar o campo dos novos materiais da engenharia é empolgante, pois permite obter um

maior conhecimento sobre um setor que vem ganhando cada vez mais importância, principalmente na parte de materiais compósitos que permitem combinar as melhores características dos materiais envolvidos, além disso ainda é possível contribuir com a sustentabilidade do planeta, implementando materiais de fontes renováveis em substituição a outros obtidos de forma sintética.

O crescimento da utilização de materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais está ligado a essa questão da sustentabilidade. Assim a maior aplicação das fibras naturais é na substituição das fibras sintéticas, que são derivadas do petróleo, uma fonte não renovável e que prejudica o meio ambiente no seu descarte.

As fibras naturais são materiais sustentáveis e provenientes de plantas nativas e quando adicionadas em materiais construtivos, favorecem a leveza do material, permitem baixo custo em sua produção além de melhorar as propriedades mecânicas do material.

Muitos setores das indústrias estão alinhados com esse pensamento e já iniciam a aplicação desses materiais nos seus sistemas produtivos ainda de forma tímida. Dentre os setores que mais utilizam esse novo tipo de tecnologia pode-se citar o setor automobilístico que busca reduzir o peso dos seus veículos para consumir menos combustível, o setor aeronáutico também devido a leveza que é importantíssima nessa área, os setores da construção civil, naval e embalagens que estão aumentando o uso gradativamente também merecem destaque.

Em busca por novos materiais para fortalecer polímeros e para fazer com que o custo de processos seja mais barato e competitivo para grandes empresas, a fibra de curauá surgiu com uma imensa força pelo fato de ser natural e com boas características mecânicas, tendo assim um crescimento progressivo na procura dessa fibra, pesquisas começaram a ser mais frequentes pelo fato de o uso de fibras naturais nas engenharias ajudarem a diminuir a alta agressão desta área ao meio ambiente e diminuir custos de produtos.

Apesar da melhora na questão ambiental, os materiais compósitos reforçados com as fibras naturais não alcançam as características de resistência mecânica das fibras sintéticas, tendo sua aplicação restrita apenas a situações de baixa solicitação de esforços mecânicos de tração, compressão, flexão, etc.

O tratamento químico melhora as características físicas e químicas das fibras, deixando a superfície da fibra mais rugosa, o que facilita a adesividade com a matriz polimérica.

Além disso atualmente a extração da fibra do curauá vem se tornando uma fonte de renda para as comunidades que as cultivam. O governo do estado do Amazonas está incentivando o seu cultivo entre as comunidades do interior do estado, a fim de proporcionar desenvolvimento e fonte de renda à população da região. Segundo a Agência de Fomento do Estado do Amazonas (AFEAM), o curauá poderia se tornar fonte de desenvolvimento e sobrevivência de muitas comunidades que hoje vivem de forma bastante precária. Nesse contexto, a presente pesquisa se justifica na medida em que busca uma forma alternativa de aplicação da fibra de curauá e ao mesmo tempo uma fonte de renda para a região, diminuição do consumo de energia elétrica do planeta, proporcionando mais conforto ambiental a partir de um produto final proveniente de fonte renovável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta uma revisão sobre materiais compósitos, matrizes poliméricas, fibras vegetais e seus métodos de modificação superficial, além de uma abordagem geral sobre ensaios de tração dando-se ênfase aos tópicos associados com a presente pesquisa.

2.1 Materiais compósitos

No século XX, os engenheiros intensificaram as pesquisas no ramo dos novos materiais, nesse período destacaram-se os materiais compósitos. O objetivo deste é unir diferentes materiais, com comportamentos mais eficientes nas diferentes aplicações da engenharia, de forma a preencher as lacunas deixadas pelos materiais disponíveis na época. As características mais buscadas até os dias são materiais muito resistentes, duráveis, pouco deformáveis e capazes de absorver e dissipar energia, sem ocorrência de ruptura frágil (JUVANDES, 1999)

São usualmente constituídos por duas fases, a fase dispersa (uma fase descontínua que pode conter as cargas e o reforço do compósito) e matriz (a fase contínua que envolve a fase dispersa), as quais não se fundem nem reagem entre si (CALLISTER, 2002).

De maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exhibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases constituintes, tal que é obtida a melhor combinação de propriedades. De acordo com esse princípio da ação combinada, melhores combinações de propriedades são criadas por uma combinação de dois ou mais materiais distintos (CALLISTER, 2002).

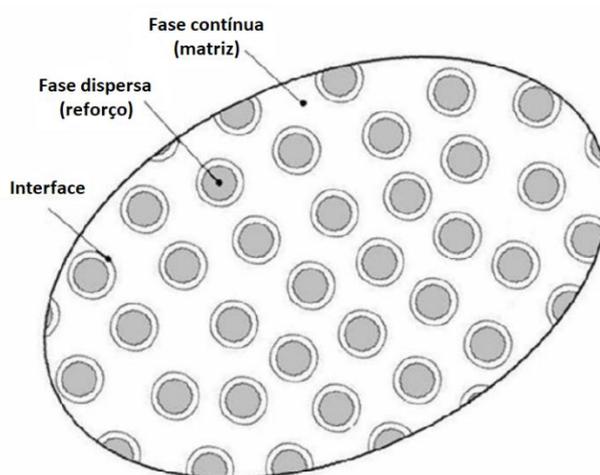
Atualmente, o uso de diferentes combinações, como metal-polímero, metal-cerâmica, cerâmica-cerâmica é bastante comum. Um exemplo de compósito que segue uma destas combinações é o concreto-armado, utilizado na construção civil. Nesse exemplo a armação metálica atua como elemento de reforço, para aumentar a resistência da matriz, que no caso é composta por concreto. Um detalhe interessante é que o concreto também é um material compósito, seus elementos são cimento, areia e brita. (KERSTING, 2004)

O componente matricial geralmente é um polímero termoplástico ou termorrígido, mas também pode ser metálico ou cerâmico. De acordo com Ferreira (2009), a principal finalidade da matriz é envolver as outras fases e protegê-las dos ataques ambientais, particularmente, corrosão e abrasão. Além do mais, outra importante função exercida pelas matrizes é promover um meio de transferência de carregamentos para a fase dispersa.

O componente estrutural corresponde ao agente de reforço, também chamada de fase dispersa, que quase sempre é o elemento mais resistente e flexível da mistura, sendo o maior responsável pelas propriedades específicas do compósito. Porém Gonzaga (2014) e Callister (2002) afirmam que a resistência promovida pelo reforço está intimamente ligada à capacidade de transferência de carga da matriz para a fase dispersa, que é definida pela magnitude da força de ligação interfacial entre os mesmos. Pode ser formada por fibras, partículas e estruturas distintas que, dependendo da sua distribuição na estrutura do material, influenciam na classificação do compósito (CALLISTER, 2002).

Para melhor visualização a figura 1 demonstra as diferentes fases explicadas anteriormente.

Figura 1 - Fases de um compósito



Fonte: (DANIEL e ISHAI, 1994)

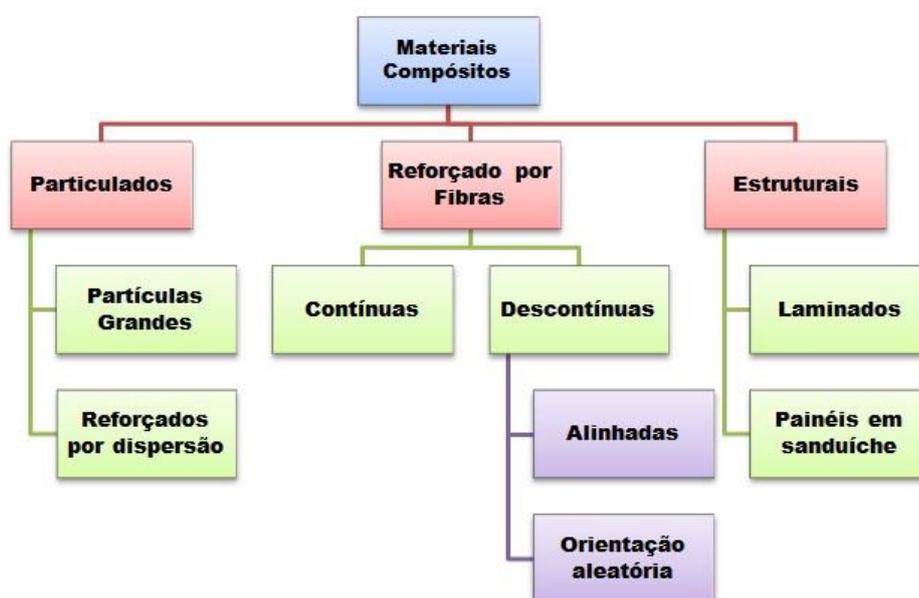
De maneira geral as propriedades dos materiais compósitos dependem:

- Das propriedades individuais da fase matriz e da fase dispersa;
- Da natureza da interface “fase matriz – fase dispersa”;
- Da “geometria” da fase dispersa, dentre elas:
 - ❖ Concentração
 - ❖ Tamanho
 - ❖ Forma
 - ❖ Distribuição
 - ❖ Orientação

Um exemplo básico de material compósito bem planejado, é a prancha de surf, no qual espumas são revestidas por uma camada de polímeros que originam um conjunto impermeável, mas, de resistência mecânica baixa, obstáculo que é solucionado a partir da adição de fibras de vidro ao conjunto resultando assim num material com estrutura de engenharia otimizada: leve, impermeável e resistente (ALMEIDA, 2014).

Para exemplificar melhor, na figura 2 é apresentado um esquema com a classificação dos materiais compósitos proposto por Callister (2002) e que será adotado nesse trabalho.

Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos



Fonte: (CALLISTER, 2002)

As matrizes poliméricas são amplamente utilizadas em função de sua ductilidade e fácil moldagem (SILVA, 2011). Existem ainda os compósitos híbridos, os quais são constituídos de combinações de vários tipos de reforço. Estes podem combinar fibras e partículas no mesmo material ou ainda combinar mais de um tipo de fibra ou de partícula em um mesmo material (OLIVEIRA, 2007).

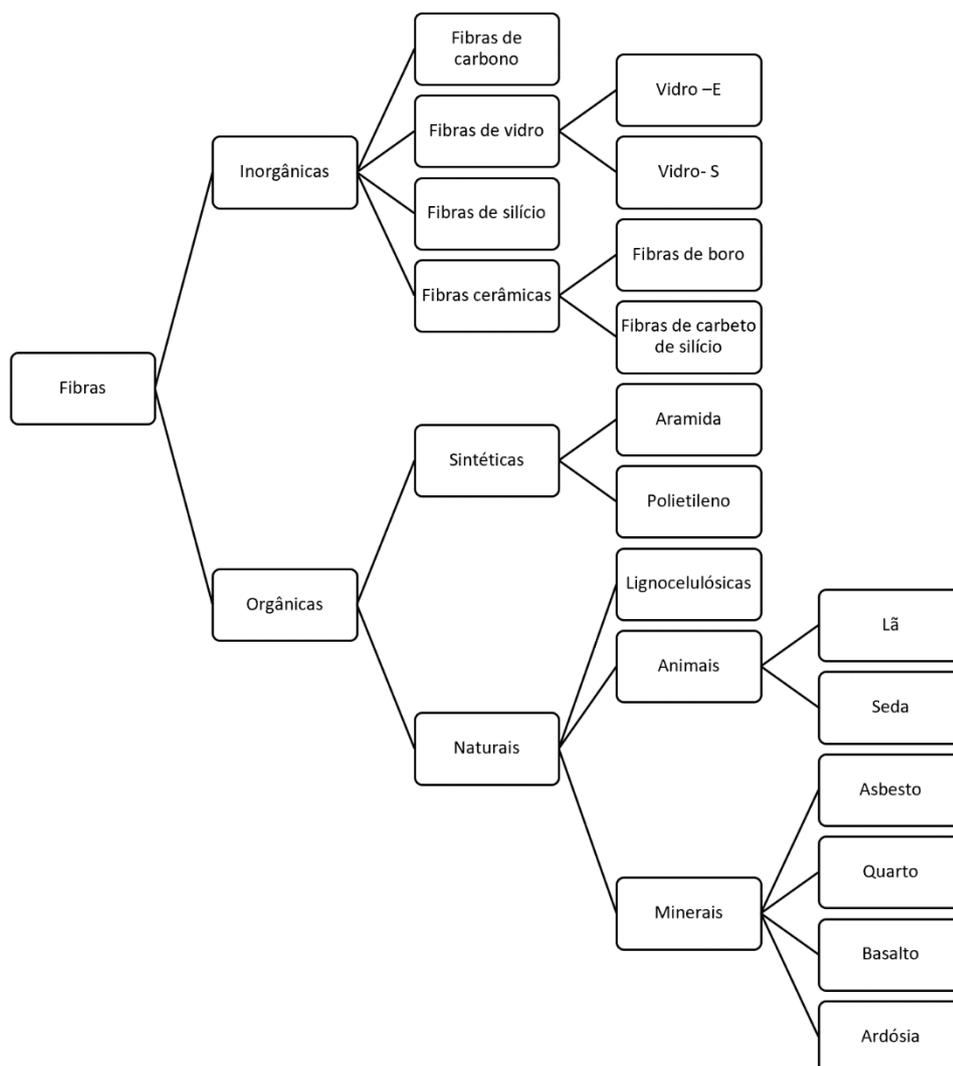
2.2 Compósitos reforçados por fibra

A família dos compósitos de FRP resulta, sobretudo, da conjugação de *fibras contínuas* de reforço orgânicas ou inorgânicas, com a *resina termoendurecível* e com as *cargas* de enchimento designadas por "fillers". Para constituintes secundários, estes materiais recorrem a *aditivos* e a outros produtos, como por exemplo, os agentes catalizadores, os

promotores ou os aceleradores. As principais *fibras* comercializadas são o vidro, o carbono e a poliamida aromática (aramida ou kevlar), sendo os respectivos compósitos reforçados, denominados internacionalmente por *GFRP* (Glass Fiber Reinforced Polymer), *CFRP* (Carbon Fiber Reinforced Polymer) e *AFRP* (Aramid Fiber Reinforced Polymer (JUVANDES, 1996).

Os compósitos de maior interesse na atualidade são aqueles onde a fase dispersa se encontra na forma de fibras, visto que apresentam características peculiares, como boa resistência e rigidez que são características bastante exploradas pela indústria, sendo retratadas em termos de resistência e módulos específicos (MATTHEWS & RAWLINGS, 1999). A Figura 3 classifica os diferentes tipos de fibras utilizados na confecção de materiais compósitos, sendo as fibras sintéticas de vidro, carbono e aramidas (Kevlar) as mais utilizadas pelo fato de apresentarem faixa de propriedades mais definidas (QUINAYÁ, 2017).

Figura 3- Classificação de fibras utilizadas na confecção de compósitos



Fonte: (QUINAYÁ, 2017)

As principais variáveis materiais da fibra que irão afetar significativamente as propriedades mecânicas de polímeros reforçados por fibras são:

- 1- Tipo de fibra;
- 2- Comprimento médio da fibra;
- 3- Orientação da fibra;
- 4- Interface fibra-polímero;
- 5- Dispersão das fibras;

De forma geral uma fibra é definida como um corpo flexível que seja macroscopicamente homogêneo, além disto deve possuir uma alta razão entre o comprimento e a espessura. A eficiência do reforço no compósito é diretamente ligada ao comprimento da fibra, pois para produzir os efeitos esperados, a fibra deve atender a certo comprimento crítico, o qual é relacionado com o comprimento e o diâmetro das fibras. As fibras menores que possuem comprimento menor que o comprimento crítico são chamadas fibras descontínuas ou curtas e as que excedem essa medida são as fibras contínuas ou longas (BOTELHO, 2017). Callister (2000) comenta que a configuração que gera uma melhoria significativa no compósito é a de fibras contínuas, pois nesse modo obtém-se a melhor combinação de densidade/desempenho. No caso das fibras descontínuas, as fibras são muito curtas para gerar uma melhoria relevante na resistência.

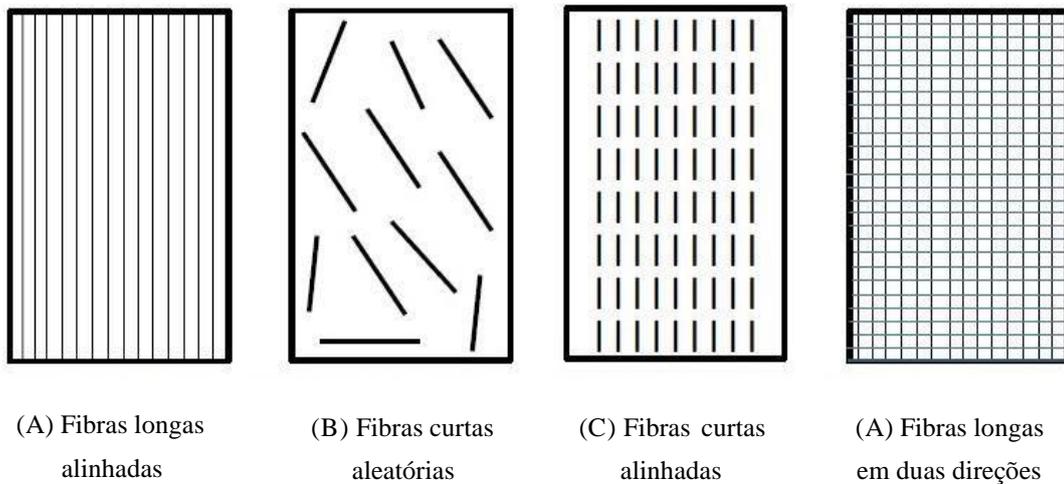
- Fibras curtas: são as que possuem comprimento longitudinal de até 15 mm.
- Fibras longas: são as que possuem comprimento longitudinal maior que 15 mm.

As fibras do tipo longa com a configuração alinhada são as que reforçam melhor o compósito, no sentido de proporcionar melhores características mecânicas. A razão para essa superioridade está relacionada com a maior capacidade de transferir os esforços da matriz para a fibra, que por serem os elementos de reforço possuem características mecânicas maiores.

A forma como as fibras são dispostas no compósito também gera grande influência nas propriedades do composto, a disposição das fibras pode ser unidirecional, bidirecional ou aleatória. A diferença entre elas está na direção em que o reforço irá atuar. Na orientação unidirecional o reforço se dá na direção longitudinal, no arranjo bidirecional o reforço ocorre tanto na direção longitudinal quanto transversal e na forma aleatória ocorre em praticamente todas as direções (BOTELHO, 2017).

Os materiais compósitos são classificados com base em suas matrizes e seus reforços, que podem ser metálicos, cerâmicos ou poliméricos (SILVA, 2010). A Figura 4 mostra os vários tipos de compósitos segundo a orientação e/ou distribuição das fibras de reforço.

Figura 4 - Orientação e tipos de fibras em compósitos



Fonte: (LEÃO, 2012)

A fibra de vidro é o material mais utilizado na criação de compósitos, em virtude de apresentar propriedades como: resistência mecânica, baixo custo, não ser inflamável e não reagir quimicamente com outros materiais, apresentar resistência à corrosão e à umidade (OTA, 2004).

Entretanto, o contato irrestrito e contínuo com os filamentos de fibra de vidro pode acarretar doenças respiratórias e pulmonares, além de aumentar a probabilidade do desenvolvimento de câncer. Pesquisas feitas pelo Conselho de Defesa dos Recursos Naturais, detectaram que o risco de câncer ligado ao manuseio de fibra de vidro é igual ao causado pelo amianto (GEHLEN, 2014).

É inegável afirmar que desde a descoberta dos polímeros até os dias de hoje, tais materiais são lançados no meio ambiente de forma ininterrupta e acelerada. O avanço tecnológico e o crescimento econômico viabilizaram grandes benefícios à população. Porém, associado ao desenvolvimento social e ao consumo inadequado, causaram vários distúrbios entre os quais destaca-se a poluição, sendo o principal responsável pela destruição ambiental e diminuição da qualidade de vida do ser humano (ROLIM, 2000).

Devido a tais fatos, torna-se cada vez mais necessário o investimento em materiais alternativos que contribuam tanto para a defesa e segurança do meio ambiente quanto para a sustentabilidade da vida e saúde (CARASCHI e LEÃO, 2002).

Com foco na sustentabilidade, inúmeras pesquisas e trabalhos na área de polímeros e compósitos foram, e ainda estão sendo feitos para assegurar a preservação do meio ambiente e promover uma melhora na qualidade de vida. Entre as buscas feitas nesta área, as que usam

recursos naturais na fabricação dos materiais vêm crescendo, dando ênfase no uso de fibras naturais (SILVA, 2010).

2.3 Matrizes poliméricas

Segundo Ota (2004) a matriz mais utilizada para materiais compósitos é a polimérica e as razões para isto são duas:

1-Em geral, as propriedades mecânicas dos polímeros são inadequadas para várias aplicações. As suas resistências são muito inferiores se comparadas com as de metais e cerâmicos. Isto significa que existe um grande benefício potencial usando o processo de reforço em materiais polimérico.

2-O processamento de compósitos poliméricos não necessita de altas pressões e de altas temperaturas

O material compósito de matriz polimérica é composto, basicamente, por uma resina e um reforço. Uma classificação simples de matrizes poliméricas as divide em termorrígidas (poliésteres, poliuretanos, vinil-éster e resinas fenólicas) ou termoplásticas (polietileno, polipropileno e poliestireno).

Termofixas (termorrígida): se tornam permanentemente duros quando submetidos a aplicação de calor e não amolecem com um aquecimento subsequente. Durante o tratamento térmico inicial, ligações cruzadas covalentes são formadas entre cadeias moleculares adjacentes. Os termofixos são geralmente mais duros, mais fortes e mais frágeis do que os polímeros termoplásticos, e possuem melhor estabilidade dimensional. A maioria dos polímeros com ligações cruzadas e em rede, entre eles as borrachas vulcanizadas, os epóxis e as resinas fenólicas e algumas resinas de poliéster são do tipo termofixo (CALLISTER, 2002).

Termoplástica: Segundo Elmajdoubi e Vu-Khan (2003) citado por Ota (2004) as matrizes termoplásticas possuem uma combinação de baixa densidade, resistência química, custo baixo e um balanço entre rigidez e tenacidade permite que termoplásticos ocupem espaço entre outros materiais em muitas aplicações importantes. Estes polímeros podem ser repetidamente aquecidos, fabricados e resfriados e conseqüentemente serem reciclados.

A principal diferença entre os dois está no comportamento quando são aquecidos, nesse caso, os termoplásticos são polímeros capazes de serem moldados diversas vezes devido às suas características de se tornarem fluidos sob ação da temperatura e depois se solidificarem quando há uma diminuição de temperatura (SOBRINHO, 2005). Quando se trata dos termorrígidos, estes não são capazes de se tornarem fluidos devido à presença de ligações

cruzadas entre as cadeias macromoleculares. A Tabela 1 apresenta as principais diferenças entre polímeros termoplásticos e termorrígidos (SANTOS, 2006).

Tabela 1 - Algumas propriedades de polímeros termoplásticos e termorrígidos

Termorrígidos	Termoplásticos
Não reciclável mecanicamente	Baixa estabilidade
Tempo limitado de armazenamento	Baixo tempo ilimitado de armazenamento
Baixa viscosidade durante o processamento	Alta viscosidade quando fundido
Alta resistência à fluência	Temperatura de uso limitada a T_g e T_f

Fonte: (SANTOS, 2010)

Tradicionalmente, uma característica básica da resina termoplástica está em sua estrutura, isto é, na sua composição molecular. As moléculas são longas com comprimento da ordem de 20 a 30 nm e fluem sob tensão com temperaturas moderadas, permitindo assim que sejam fabricadas na forma solicitada e mantendo a forma quando resfriada à temperatura ambiente. Esses polímeros podem ser repetidamente aquecidos, fabricados, resfriados e, conseqüentemente, reciclados (OTA, 2004).

Quando se trata de matriz termoplástica em compósitos, devem ser observadas as características de porosidade do composto, processo de temperatura e compatibilidade entre fibra e matriz (MADSEN, 2004). Entretanto, as propriedades específicas dos compósitos poliméricos dependem de diversos fatores tais como interação entre as fases, geometria, tamanho, distribuição, orientação e quantidade de reforço (SANTOS, 2007).

A matriz é um material homogêneo que tem o intuito de aglutinar as fibras ou partículas do material de reforço, melhorando as propriedades dos polímeros, além de reduzir os custos (SANTOS, 2010). Sendo assim, quando o compósito é analisado macroscopicamente o mesmo é homogêneo, podendo possuir fibras longas ou curtas (BEVITORI, SILVA e LOPES, 2010).

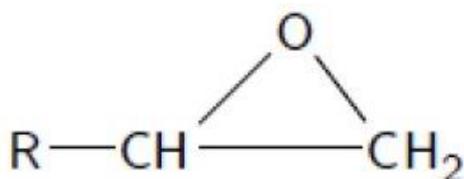
A combinação fibra-polímero, portanto, é capaz de gerar um material com boas propriedades mecânicas e com a alta resistência a agentes químicos. Estima-se que mais de três quartos de todas as matrizes de compósitos poliméricos sejam constituídas por polímeros termofixos (DE PAIVA e F., 1999).

2.4 Resina epóxi

A resina epoxídica é um polímero termorrígido bastante utilizado como matriz curada na preparação de materiais compósitos, principalmente devido às suas excelentes propriedades, tais como, estabilidade térmica, resistência a solventes, boa adesão, entre outras. As resinas epóxi são muito utilizadas em aplicações estruturais ou como adesivos, pois são de fácil manuseio, possuem boa resistência química, térmica e ainda demonstram elevada resistência e módulo de elasticidade (NASCIMENTO, 2009).

Segundo Nascimento (2009) a cadeia da resina inicial é frequentemente encontrada na rede do sistema curado. E isto ocorre por causa da polaridade dos grupos éteres e hidroxilas alifáticas presentes neste sistema gerando a alta adesão desses polímeros. Essa polaridade cria forças de interação entre a molécula epóxi e a superfície adjacente a ela otimizando, dessa forma, o uso como adesivo e revestimento. Assim sendo, a existência desses grupos polares minimiza problemas relativos à interface resina/reforço em compósitos.

Figura 5 - Grupo epoxídico



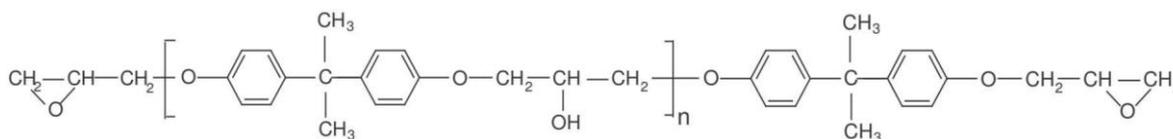
Fonte: (LEITE, 2011)

A resina epóxi líquida possui baixa viscosidade o que facilita o manuseio. Com agentes de cura apropriados rapidamente se convertem a fase termofixa. Podem ser curadas rapidamente na faixa entre 5 a 150°C, dependendo do agente utilizado. Além disso, possuem baixa contração durante a cura (aproximadamente 3%). Depois de curadas, dependendo do agente de cura, possuem boa resistência a ácidos e reagentes cáusticos. Este fato favorece a utilização em inúmeras aplicações tendo como principal, a utilização em compósitos de fibras (NASCIMENTO, 2009).

A maioria das resinas epóxi usadas atualmente são produtos líquidos da reação entre epícloridrina e bisfenol A, normalmente chamadas epóxios Epi-Bis, a estrutura dessa molécula é mostrada na figura 6. Esta mistura resulta em resinas com diferentes tipos de viscosidade, adequadas as mais diversas aplicações. Neste tipo de resina têm-se sistemas que vão de uma condição líquida até uma forma sólida, com fusão de temperaturas superiores a 175°C. Assim, as propriedades de cura para as resinas são praticamente as mesmas, com detalhe de que a

viscosidade aumenta e atua diretamente nas propriedades físicas do material, aumentando propriedades inclusive como a tenacidade das resinas (KERSTING, 2004).

Figura 6 - Estrutura química da resina epóxi DGEBA



Fonte: (LEITE, 2011)

A grande desvantagem desse material é seu custo elevado em relação às outras resinas como, por exemplo, as resinas poliéster. Apesar disso, suas ótimas propriedades aliadas a excelentes resultados transformaram o epóxi no polímero mais utilizado na confecção de compósito de alto desempenho. Nas palavras de (PIRES, 2009) as resinas epóxi apresentam, “uma combinação singular de propriedades geralmente não encontrada em outros materiais poliméricos”.

2.5 Fibras naturais

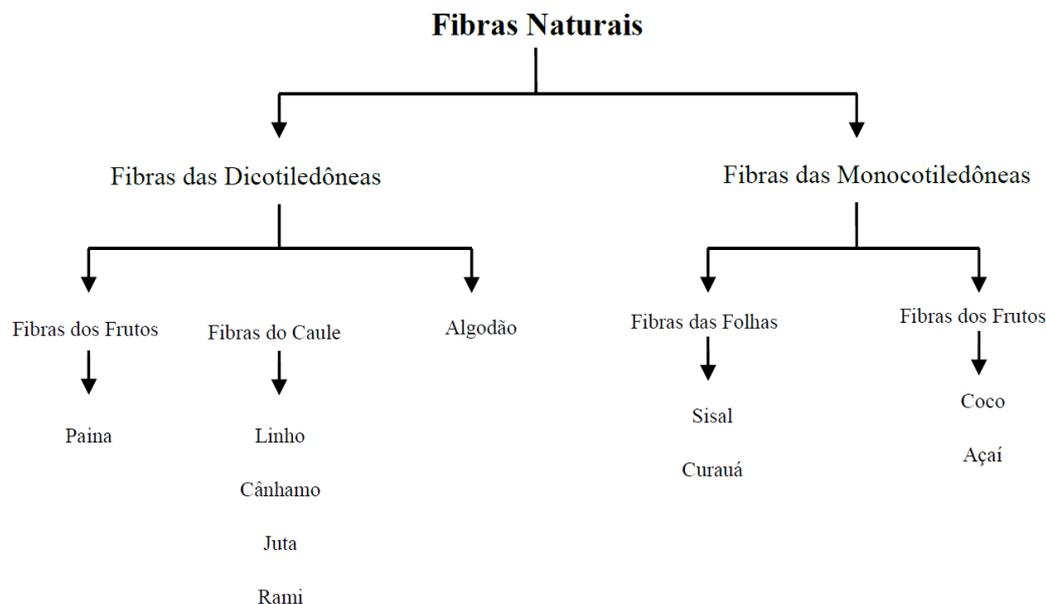
A Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação (FAO- ONU – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*) estabeleceu o ano de 2009 como o ano mundial das fibras naturais propondo assim conscientizar e encorajar o emprego de fibras naturais, impulsionando políticas do governo de incentivo ao setor e às ações sustentáveis das empresas, para a sua utilização (FAO, 2009).

As fibras vegetais vêm sendo utilizadas por diversas culturas e sua aplicação é das mais variadas. Inicialmente, as fibras eram utilizadas para fabricação de artefatos rústicos como bolsas, mantas, cordas, redes, pincéis, cestos, entre outros produtos que eram comercializados no mundo há centenas de anos. Segundo Singh (1994), conforme citado por Da Silva (2013), estudiosos começaram a investigar as fibras vegetais como reforço em materiais compósitos poliméricos, destacando-se os compósitos de matriz termorrígida.

Segundo Jacob e Thomas (2008) citados por Pires (2009) as fibras naturais comparadas às fibras artificiais, apresentam vantagens ecológicas (são biodegradáveis, renováveis e carbono “free”, isto é, quando são compostadas ou incineradas liberam a mesma quantidade de dióxido de carbono consumida durante seu desenvolvimento), vantagens sociais (geram empregos rurais), mecânicas (mais leves e resistentes) e econômicas (são mais baratas, já que sua produção requer pouca energia).

A substituição das fibras sintéticas por fibras vegetais é uma possibilidade bastante interessante por se tratar da substituição de um recurso não-renovável (fibra de vidro) por um recurso renovável (fibra natural). Uma classificação geral das fibras naturais é mostrada na figura 7.

Figura 7 - Classificação das fibras naturais



Fonte: (SANTOS, 2010)

O Brasil é um dos países que possui a maior biomassa disponível no mundo e a maior extensão territorial cultivável, potenciais estes que podem e devem ser melhor explorados (Mattoso, 1996). A grande quantidade disponível de fibras lignocelulósicas, junto com a necessidade de uma fonte renovável para a produção de polímeros, tem assim uma grande chance para desenvolver tecnologias que ao mesmo tempo aumentam o valor dos produtos da agroindústria e haja na estabilização do carbono na natureza. Auxiliando na diminuição do lançamento de dióxido de carbono (CO₂) para atmosfera durante a produção, processamento e utilização de produtos da agroindústria, elevando o poder econômico do agronegócio devido à possibilidade de comercialização de créditos de carbono para a cadeia produtiva, que foi criada devido ao sistema de desenvolvimento limpo previsto pelo Protocolo de Kyoto (SILVA, 2009).

Segundo Levy Neto e Pardini (2006), existem também desvantagens associadas às fibras naturais, como baixa temperatura de utilização; baixa estabilidade dimensional; elevada sensibilidade a efeitos ambientais - como variações de temperatura e umidade, influência das condições do solo no plantio e época da colheita, processamento pós-colheita; geometria

complexa e não uniforme, além de propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais fibrosos sintéticos.

Além disso, as fibras sintéticas apresentam outras desvantagens em relação às fibras vegetais, dentre elas: alto consumo de energia durante sua produção, causam abrasão aos equipamentos de processamento e não são degradáveis, o que causa um problema no descarte dos materiais feitos a partir de fibras sintéticas (**Kumar, 2005**).

A Tabela 2 apresenta algumas propriedades físicas e mecânicas das fibras naturais e das fibras sintéticas utilizadas como reforço em compósitos. Por meio dessas propriedades, pode-se entender o comportamento das fibras e determinar as suas diversas aplicações (**SILVEIRA, 2008**).

Tabela 2 - Propriedades físicas e mecânicas de algumas fibras

MATERIAIS	Densidade (g/cm³)	Alongamento (%)	Tensão na ruptura (Mpa)	Modulo de Young (GPa)
CURAUÁ	1,4	4,2	890-4200	50,4
SISAL	1,5	2,0-2,5	635-5511	9,4-22
ALGODÃO	1,5-1,6	7-8	287-597	5,5-12,6
JUTA	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
RAMI	-	3,6-3,8	400-938	61,4-128
LINHO	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
FIBRA DE COCO	1,2	3,0	175	4,0-6,0
VIDRO-E	2,5	2,5	2000-3500	70,0
VIDRO-S	2,5	2,8	4750	86,0
ARAMIDA NORMAL	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
CARBONO PADRÃO	1,4	1,4-1,8	4000	230,0-240,0

Fonte: (MARINELLI et al., 2009)

2.6 Fibra de curauá

O curauá, nome científico *Ananas erectifolius*, é uma bromeliácea da região da Amazônia, Fig. 1a. Suas folhas possuem 1,5 a 1,7 m de comprimento e 4 cm de largura, são duras e eretas e possuem a superfície lisa. A fibra extraída de suas folhas é leve e resistente, apresentando inúmeras aplicações na indústria como, por exemplo, em revestimentos de automóveis.

Segundo Leão *et. all.*, as fibras de curauá estão entre as quatro lignocelulósicas mais rígidas até hoje conhecidas (**Frollini e Leão**). A planta vem atraindo a atenção dos pesquisadores, particularmente a partir de 1993, quando sua fibra foi reconhecida comercialmente pela indústria automotiva brasileira (**ZAH et al., 2007**).

Além de reduzir o consumo de materiais baseados no petróleo (leia-se “plásticos”), o uso de fibras naturais em carros torna-os mais leves, reduzindo o consumo de combustíveis e consequentemente as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera, o que contribui para evitar o aquecimento global (PIRES, 2009).

Atualmente fibras picadas de curauá estão sendo misturadas com sobras de cobertores e tapetes descartadas pela indústria têxtil para reforçar matriz de polipropileno em compósitos utilizados no teto e na parte interna do compartimento de bagagem de automóveis como o Fox e o Pólo da Volkswagen do Brasil (ERENO, 2004).

Segundo Sabaa (1991) citado por Monteiro (2006) os resultados obtidos até agora são bastante animadores, uma vez que as fibras de curauá apresentam resistência mecânica comparável à das fibras de sisal e juta.

A caracterização mecânica das fibras de Curauá feita por **Fermoselli (2003)**, mostrou que a resistência à tração específica das fibras de curauá é próxima à das fibras de vidro, apresentando resistência à tração específica de 900 (± 200) MPa g-1 cm-3 frente a 880-1830 MPa g-1 cm-3 para as fibras de vidro [29,30].

Por isso, são consideradas as substitutas ideais das fibras de vidro em algumas aplicações, superando o Sisal em duas vezes e a Juta em nove vezes (**FERMOSELLI, 2003**). **Segundo Silva e Aquino (2008)**, as fibras de curauá ainda apresentam a vantagem o potencial de reciclagem, enquanto que o destino final do compósito com fibra de vidro ao término de sua vida útil é o aterro sanitário.

Conforme Picanço (2005), a fibra de curauá é de uso popular na região conhecida como Baixo-Amazonas, oeste do Estado do Pará, na manufatura de cordas, cestas e tapetes, com plantios em escala comercial. Por ser pouco conhecida nas demais regiões do país, o

mesmo autor destaca a importância de estudos específicos sobre suas propriedades físicas, químicas e mecânicas, que possibilitem sua aplicação segura em compósitos para a construção civil.

Outra potencial utilização do curauá trata-se da extração da Bromelina, uma enzima proteolítica presente em plantas da família Bromeliaceae, tendo como principal fonte atual o abacaxi (*Ananas comosus*). O trabalho de Johnson (1977), se refere às diversas formas de utilização desta enzima em alimentos, na indústria e na medicina. Portanto, a extração desta enzima a partir dos resíduos do desfibramento (mucilagem) do curauá é uma alternativa de valor comercial muito superior ao da própria fibra, o que pode maximizar sua utilização e viabilizar seu cultivo. No entanto, estudos acerca da extração da bromelina a partir do curauá ainda estão em andamento.

2.7 Métodos de otimização da interface fibra-matriz

As fibras naturais são constituídas por vários compostos químicos formados a base de hidrogênio (H), carbono (C) e oxigênio (O), sendo os principais a celulose, a hemicelulose e a lignina (SILVEIRA, 2008).

Os materiais lignocelulósicos *in natura*, devido às suas propriedades, não admitem fácil acessibilidade aos seus componentes. Vários fatores comprometem a hidrólise dos resíduos lignocelulósicos, por exemplo, a porosidade do material, a cristalinidade da celulose e os elevados conteúdos de lignina e hemicelulose (COELHO, 2007).

A relação de fibra/matriz é um dos fatores determinantes para a formação dos compósitos (KAMIYA et al., 2010). O principal problema encontrado para a junção de fibra/matriz é a falta da interação interfacial entre a matriz (hidrofóbica) e a fibra (hidrofílica) (KIM et al., 2008). Ou seja, a natureza hidrofílica das fibras naturais pode afetar negativamente a adesão com a matriz hidrofóbica (HERRERA-FRANCO;2004). Portanto, a modificação química é importante para diminuir o caráter hidrofílico das fibras naturais, isto é, aumentar sua adesão interfacial (fibra/matriz) com a matriz apolar (IOZZI et al., 2010).

As principais técnicas empregadas para aumentar a compatibilidade fibra/matriz são: modificação química da matriz polimérica, modificação do agente de reforço ou utilização de agentes interfaciais de acoplamento. Estas técnicas tornam compatível a fibra e a matriz que proporcionam uma excelente transferência de tensão na interface, eficazes para qualidade e aplicabilidade do produto final (SILVEIRA, 2008).

As argilas do tipo organofílica (hidrofóbica), devido as interessantes propriedades que apresentam, têm recebido bastante atenção dos pesquisadores. Segundo Paiva et al. (2008), sua incorporação em compósitos poliméricos tem como objetivo a melhoria de propriedades mecânicas, físicas (térmicas e de barreira) e químicas das matrizes poliméricas, além da redução de peso e custo. No quesito econômico, as partículas de argila agregadas podem atuar como um componente de enchimento para reduzir o custo total do compósito, pois elas são mais baratas, enquanto as resinas são relativamente mais caras.

Em trabalho recente desenvolvido por Botelho (2017), os resultados apontam para uma melhora nos resultados de ensaios mecânicos de tração quando a argila organofílica é adicionada ao compósito.

Em trabalho recente, no tratamento de fibras naturais com água quente verificou-se a eliminação com maior eficiência da camada superficial da fibra aumentando a área de contato pela exposição das fibrilas (reentrâncias) e marcas globulares (saliências) (SANTIAGO; SELVAM, 2007).

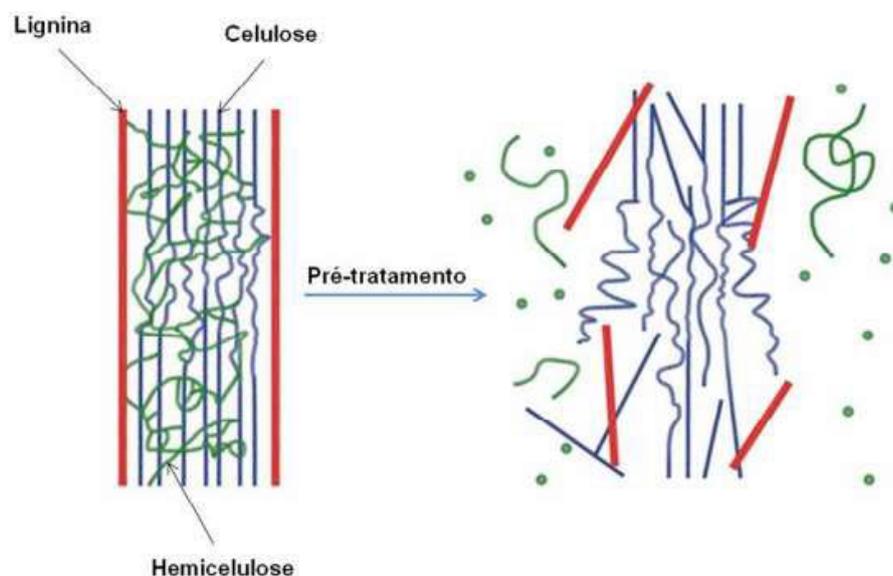
Conforme Agopyan e Savastano Júnior (1998), em compósitos formados por matrizes frágeis e fibras vegetais, dois fatores são determinantes: o ataque alcalino às fibras e a incompatibilidade física entre fibras e matrizes. Os mesmos autores colocam que a principal fonte de degradação de vegetais no ambiente natural, o ataque biológico por meio de fungos xilófagos, não apresenta maiores preocupações, porque as matrizes empregadas apresentam pH alcalino capaz de inibir sua ação.

2.7.1 Tratamento Alcalino de Mercerização

O tratamento de fibras lignocelulósicas com soda cáustica (NaOH), também conhecido como mercerização, é um método antigo e um dos mais utilizados para obter fibras de alta qualidade, principalmente pela indústria de papel (KABIR & WANG, 2012). Tem grande destaque na indústria por ser um método de baixo custo e por não afetar o meio ambiente, pois seu resíduo pode ser descartado diretamente na rede de esgoto (KIM, 2010)

O processo de mercerização atua diretamente na remoção da lignina e da hemicelulose da superfície da fibra e também remove algumas impurezas como ceras e graxas. A remoção de ligantes estruturais promove a desfibrilação do material vegetal, deixando as fibras mais soltas, ou seja, fibras mais expostas possuem superfície de contato maior e com maior rugosidade. Isso facilita a ancoragem mecânica da fibra pela matriz (KABIR & WANG, 2012). A Figura 8 representa o efeito da mercerização sobre a superfície de uma fibra lignocelulósica.

Figura 8 - Representação esquemática do tratamento de mercerização na superfície da fibra lignocelulósica



Fonte: (KIM, 2010)

O tratamento alcalino altera a morfologia, dimensões e propriedades mecânicas das fibras, diminuindo os microvazios presentes nas fibrilas, além de modificar as proporções entre comprimento e diâmetro, tornando-as mais uniformes. Do ponto de vista químico, o arranjo molecular da celulose é modificado através do enfraquecimento das ligações de hidrogênio, dispostas em forma de rede. A quebra das ligações OH aumenta a quantidade de celulose amorfa na célula vegetal e modifica seu grau de cristalinidade, despolimerizando-a (KABIR & WANG, 2012). A estrutura molecular da lignina sofre hidrólise básica, resultando em fenol, siringol e guaiacol, ao mesmo tempo que a hemicelulose é removida por ser bastante solúvel em pequenas concentrações de álcali. Os grupos álcali remanescentes, favorecem o surgimento de afinidades polares entre fibras e matriz, favorecendo a molhabilidade entre elas (SAXENA & PAPPU, 2011). O sucesso do tratamento superficial depende de diversas variáveis, sendo as principais: a concentração de NaOH da solução, o tempo de exposição das fibras e a temperatura do sistema (SAXENA & PAPPU, 2011).

2.8 Minitab

O Minitab fornece um conjunto de inteligência artificial, ferramentas de análise estatística e melhoria de processos, que é abrangente e um dos melhores da sua classe, para ajudar empresas e instituições a identificar tendências, resolver problemas e descobrir insights valiosos nos dados. Com uma facilidade inigualável, o Minitab simplifica como nunca a obtenção de insights avançados a partir dos dados. Este software será utilizado para uma análise estatística mais completa dos resultados dos ensaios de tração

3 METODOLOGIA

Neste capítulo é feita a descrição dos métodos e das técnicas de investigação utilizadas no presente trabalho, bem como do procedimento experimental adotado na fabricação dos corpos de prova e na realização dos ensaios mecânicos de tração.

3.1 MÉTODOS

Adota-se neste processo o método dedutivo que parte de uma observação geral para o particular.

Conforme Lakatos e Marconi, (2007, p. 44) “Método é o caminho pelo qual se chega a determinado resultado ainda que esse caminho não tenha sido fixado de antemão de modo refletido e deliberado”.

Conforme Andrade, (2006, p.131), “Método Dedutivo é o caminho das consequências, pois uma cadeia de raciocínio em conexão descendente, isto é, do geral para o particular, leva à conclusão”. Segundo esse método, partindo-se de teorias e leis gerais, pode-se chegar à determinação ou previsão de fenômenos particulares.

Os corpos de provas serão produzidos e submetidos a ensaios de tração seguindo a norma da ASTM D638-03.

3.2 TÉCNICAS

Para Cervo et al. (2007), podem ser chamados de técnicas aqueles procedimentos científicos utilizados por uma ciência determinada no quadro das pesquisas próprias dessa ciência.

O projeto de pesquisa irá trabalhar nos âmbitos bibliográfico e experimental.

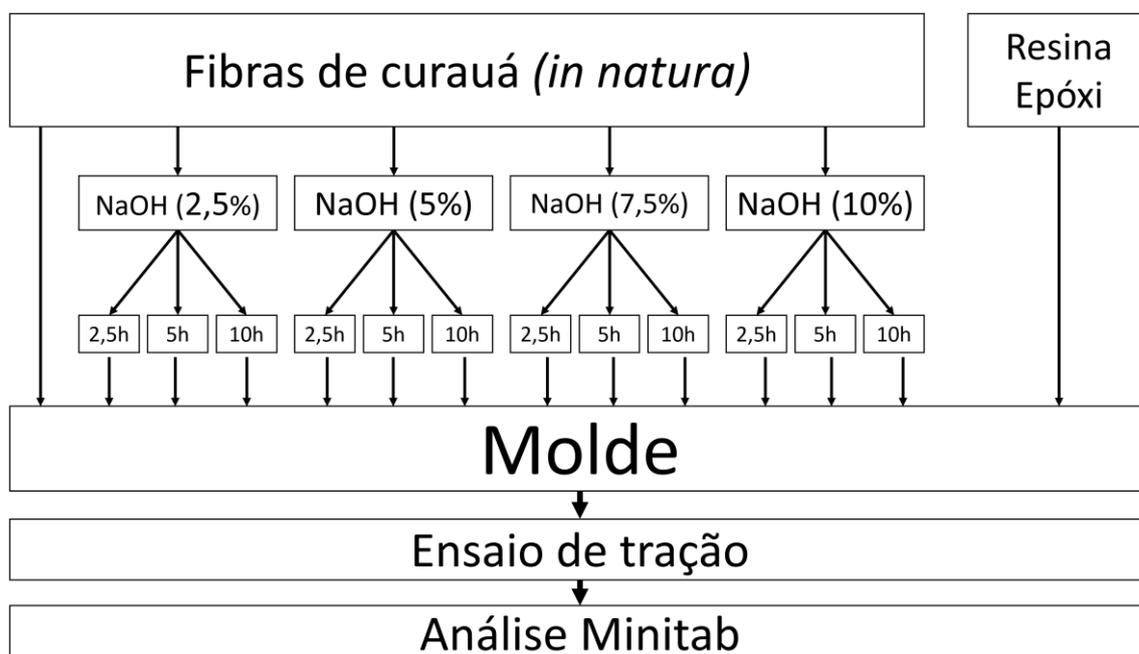
O levantamento bibliográfico será desenvolvido a partir de livros e artigos científicos, principalmente, os estudos que abordaram os métodos de fabricação de compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais, bem como aqueles que investigaram os efeitos da alteração da superfície das fibras através de tratamentos químicos.

3.3 PROCEDIMENTOS

- Produção de corpos de prova com variação na composição entre resina epóxi, fibras de curauá com diferentes tipos de tratamento.

- Submeter os corpos de prova a ensaios mecânicos de tração. Será utilizada a máquina de tração da INSTRON localizada no laboratório de P&D localizada na Escola Superior de Tecnologia – EST da UEA.
- Fazer análise estatística dos resultados analisando média e desvio padrão. Além de apresentar os resultados em forma de gráfico com as respectivas composições utilizando o programa Minitab.
- Analisar os resultados obtidos e comparar com as hipóteses iniciais e as referências adotadas

Figura 9 - Fluxograma



Fonte: Autoria própria

3.3.1 Tratamento superficial das fibras de curauá

As fibras de curauá foram adquiridas de um fornecedor em Santarém no estado *in natura*. A primeira etapa de preparação da fibra foi separar as partes mais embaraçadas e com comprimento menor que 165 mm logo em seguida descartá-las pois não estavam adequadas para os processos seguintes. A parte seguinte foi preparar a parte aproveitável das fibras em diferentes rotas de tratamento.

Figura 10 Fibras no estado in natura



Fonte: Autoria própria

Importante destacar que não foi possível obter informações sobre o processo de desfibramento utilizado, tempo de secagem, métodos de armazenagem e transporte, parâmetros estes que podem influenciar nos resultados obtidos nos ensaios mecânicos.

O tratamento químico foi realizado no laboratório de química da EST/UEA utilizando-se 4 grupos de solução aquosa de hidróxido de sódio nas concentrações de 2,5%, 5%, 7,5% e 10% (concentração mássica de NaOH), preparada com hidróxido de sódio da fabricante CRQ Química. As fibras ficaram imersas à temperatura ambiente, sem agitação, nos intervalos de tempo de 2 horas e 30 minutos, 5 horas e 10 horas.

Figura 11- Grupos de fibras recebendo tratamento químico com NaOH



Fonte: Autoria própria

Em seguida as fibras foram lavadas em água corrente para remoção dos resíduos do tratamento químico, identificadas conforme a rota de tratamento planejada e postas para secar sem exposição ao sol.

Figura 12 - Fibras em processo de secagem



Fonte: Autoria própria

Na etapa seguinte as fibras foram colocadas numa estufa a 100°C por 30 minutos para remoção da umidade, procedimento escolhido para diminuir os casos de vazios nos corpos de prova. A estufa utilizada é da marca Quimis, modelo Q317M-72, localizada no laboratório de soldagem da EST/UEA.

Figura 13 - Estufa utilizada (a), fibras dentro da estufa (b), temperatura configurada na estufa (c)



Fonte: Autoria própria

3.3.2 Preparação da resina epóxi

Para a produção dos corpos de prova foi utilizada a resina epóxi 2001 e o endurecedor 3154 da fabricante Redelease, trata-se de um adesivo epóxi incolor. A proporção de resina e

endurecedor utilizada foi de 1:2 conforme recomendação do fabricante descrito no rótulo do produto.

Figura 14 - Conjunto resina epoxi e endurecedor



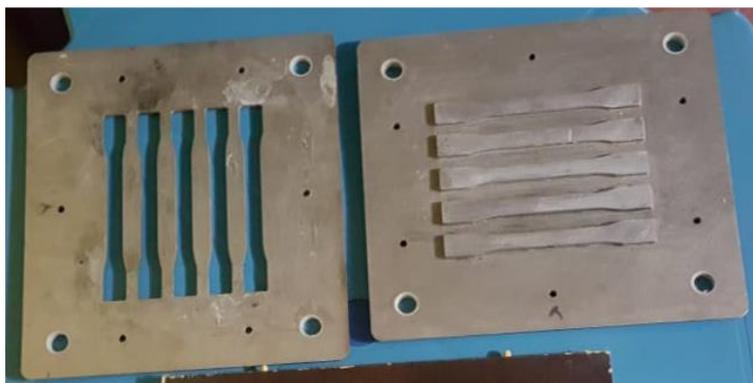
Fonte: Site da empresa Redelease

Cada porção da resina epóxi foi adicionada num recipiente e pesada numa balança de precisão de 0,1g para obter a com a proporção adequada para a mistura e posteriormente misturada manualmente por aproximadamente 15 minutos, este tempo foi definido de forma empírica, realizando tentativas de produzir corpos de provas com o mínimo de bolhas possíveis e contribuindo assim para uma interface fibra-matriz mais forte.

3.3.3 Preparação do molde

O molde utilizado é composto por duas peças metálicas que são fixadas numa parte de madeira que apresente uma superfície lisa para não ocorrerem problemas no momento de desmoldagem, conforme pode ser observado na a seguir.

Figura 15 - Molde metálico utilizado



Fonte: Autoria própria

A peça do lado direito superior possui machos para fazer pressão diretamente no compósito, a do lado esquerdo superior possui cavidades com espessura de 3 milímetros para ser possível alcançar as medidas da norma ASTM D638 - 01

A última parte do molde é uma peça de madeira, que foi fixada com parafusos à peça com cavidades, após a aplicação de desmoldante adequado para resina epóxi em todos eles.

Figura 16 - Desmoldante para resina epóxi



Fonte: Autorial própria

Após 30 minutos da aplicação do desmoldante foi necessário esperar 45 minutos para que o mesmo estivesse suficientemente seco e pronto para o desenvolvimento dos corpos de prova.

Figura 17 - Molde preparado para receber o material compósito

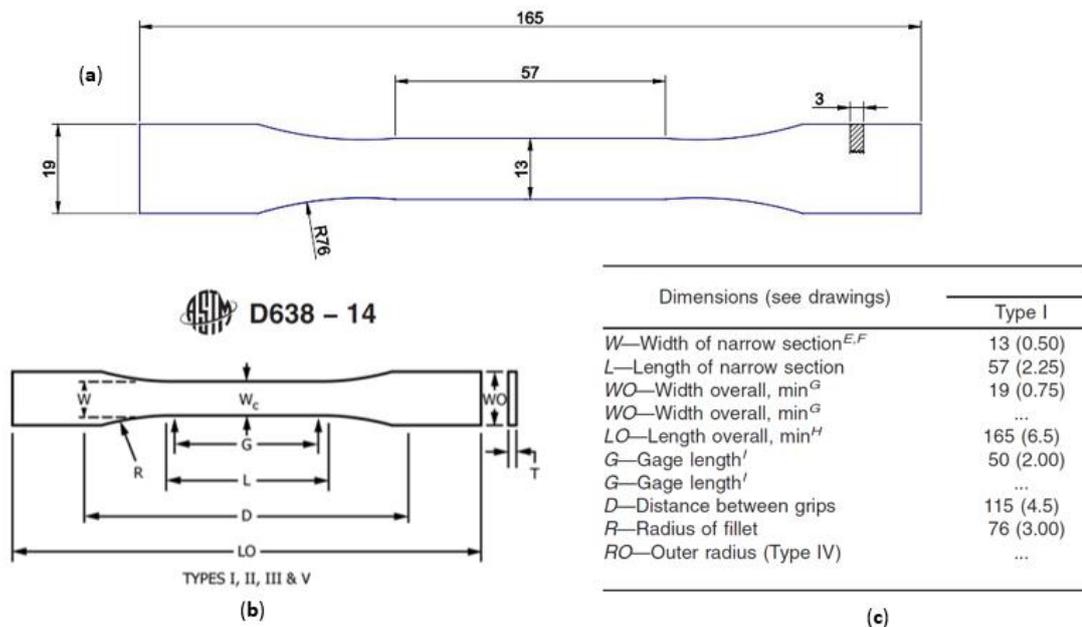


Fonte: Autorial própria

3.3.4 Cálculo das proporções de cada material nos corpos de prova

O corpo de prova foi dimensionado no programa AutoCAD seguindo as dimensões fornecidas pela norma ASTM D638-01, o desenho pode ser observado na figura abaixo.

Figura 18 - Dimensionamento corpo de prova AutoCAD



Fonte: Print screen do autocad no sistema operacional Windows 10(a), norma ASTM D638-14(b) e (c)

Em seguida foi feita a extrusão de 3mm devido a espessura necessária e utilizou-se o comando MASSPROP para que o cálculo do volume fosse feito automaticamente, o resultado pode ser observado na figura 3.4.

Figura 19 - Resultados do comando MASSPROP no AutoCAD

```

----- SOLIDS -----
Mass:          7666.0940
Volume:       7666.0940
Bounding box:  X: -0.0219 -- 164.9998
                Y:  0.0000 -- 19.1842
                Z:  0.0000 --  3.0000
  
```

Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 10

Todas as medidas estavam em milímetros, após a conversão mais conveniente obtêm-se o valor de 7,666 cm³ de volume. Não foi possível encontrar os dados de densidade da mistura de resina epóxi com o endurecedor junto a fabricante em nenhum meio de comunicação, portanto foi necessário utilizar um procedimento experimental e a partir dele definir a quantidade de cada material do compósito.

Primeiramente foram desenvolvidos três corpos de prova com 100% de resina epóxi e cada um foi pesado, o resultado pode ser observado na tabela 3:

Tabela 3 - Massa dos corpos de prova 100% resina epóxi

Corpo 1	13 gramas
Corpo 2	13,5 gramas
Corpo 3	13,3 gramas

Fonte: Elaborada pelo autor

Fazendo uma análise estatística dos resultados das amostras, obteve-se uma média de 13,26 gramas. Para fins de conhecimento calculou-se a densidade da mistura.

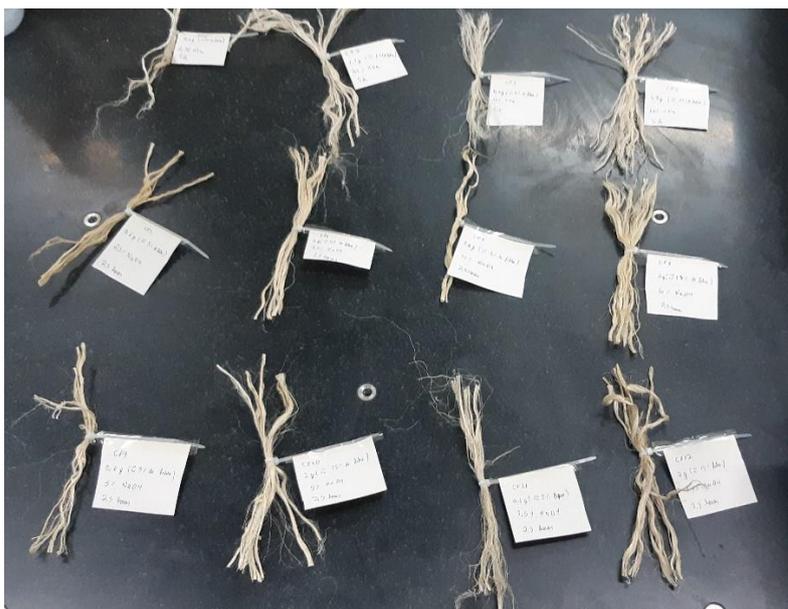
$$Densidade = \frac{Massa (g)}{Volume (cm^3)}$$

$$Densidade = \frac{13,26}{7,66}$$

$$Densidade = 1,73 g/cm^3$$

Como forma de simplificar o cálculo de proporções de cada material, adotou-se a massa média do corpo de prova puramente feito de resina epóxi como sendo 100% da massa da mistura. O seguinte esquema define como foi definido o percentual de 5% de fibra e consequentemente os valores proporcionais. A média aritmética da massa dos 3 corpos de prova foi considerada como 100% da massa do material sem reforço então foi calculado 5% dessa massa e considerado 5% de fibra no material compósito, o equivalente a 0,6 gramas.

Figura 20 - Fibras pesadas e identificadas



Fonte: Autoria própria

Tabela 4 - Composição mássica dos corpos de prova

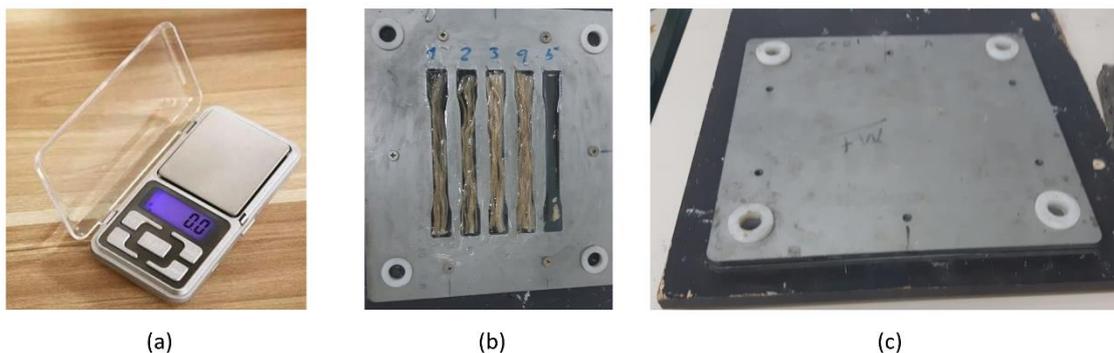
Corpo de prova	Fibra	Proporção de NaOH	Tempo de tratamento
CP1	5% de fibra	2,5 % de NaOH	5h
CP2	15% de fibra	2,5 % de NaOH	5h
CP3	5% de fibra	10 % de NaOH	5h
CP4	15% de fibra	10 % de NaOH	5h
CP5	5% de fibra	2,5 % de NaOH	2,5h
CP6	15% de fibra	2,5 % de NaOH	2,5h
CP7	5% de fibra	10 % de NaOH	2,5h
CP8	15% de fibra	10 % de NaOH	2,5h
CP9	5% de fibra	5 % de NaOH	2,5h
CP10	15% de fibra	5 % de NaOH	2,5h
CP11	5% de fibra	7,5 % de NaOH	2,5h
CP12	15% de fibra	7,5 % de NaOH	2,5h
CP13	5% de fibra	7,5 % de NaOH	5h
CP14	15% de fibra	7,5 % de NaOH	5h
CP15	5% de fibra	5 % de NaOH	5h
CP16	15% de fibra	5 % de NaOH	5h
CP17	5% de fibra	2,5 % de NaOH	10h
CP18	15% de fibra	2,5 % de NaOH	10h
CP19	5% de fibra	5 % de NaOH	10h
CP20	15% de fibra	5 % de NaOH	10h
CP21	5% de fibra	7,5 % de NaOH	10h
CP22	15% de fibra	7,5 % de NaOH	10h
CP23	5% de fibra	10 % de NaOH	10h
CP24	15% de fibra	10 % de NaOH	10h
CP25	5% de fibra	Sem tratamento	Sem tratamento
CP26	10% de fibra	Sem tratamento	Sem tratamento
CP27	15% de fibra	Sem tratamento	Sem tratamento
CP28	20% de fibra	Sem tratamento	Sem tratamento
CP29	0% de fibra	Sem tratamento	Sem tratamento

Fonte: Elaborada pelo autor

3.3.5 Preparação dos corpos de prova

Os materiais dos corpos de prova e a quantidade de resina e endurecedor foram pesados numa balança com precisão de 0,1 gramas, adicionados ao molde conforme planejado na tabela 4 e deixados em cura por 24h até serem desmoldados.

Figura 21 - Balança utilizada (a), Molde aberto com resina e fibra (b), Molde fechado aguardando a cura(c)



Fonte: Autoria própria

Inicialmente foi despejada uma fina camada de resina no molde, em seguida o grupo de fibra que havia sido separada para a produção foi colocado longitudinalmente no molde para que finalmente a cavidade do molde fosse preenchida completamente pela resina.

Após 24h de cura os corpos de prova foram removidos do molde, identificados e armazenados até o momento de realização dos ensaios de tração.

Figura 22 - Corpos de prova identificados e armazenados



Fonte: Autoria própria

3.3.6 Ensaios de tração

Para realizar os ensaios de tração foi utilizado a máquina universal de ensaios de tração da marca INSTRON localizada no P&D da Universidade do Estado do Amazonas.

Figura 23 - Máquina de ensaios de tração



Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova após o ensaio de tração podem ser observados na figura 24.

Figura 24 - Corpos de prova pós ensaio de tração



Fonte: Autoria própria

Tabela 5 - Resultados ensaios de tração

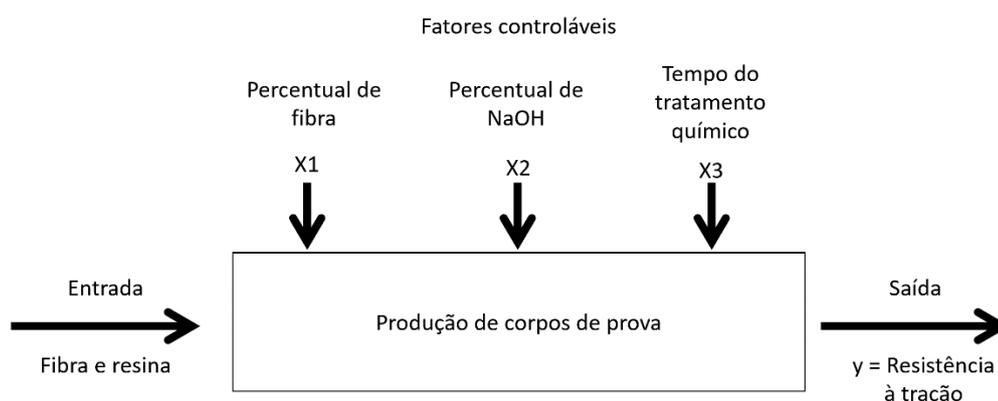
Nº do corpo de prova	Resistência a tração (Mpa)	Modulo de Elasticidade (Mpa)	Elongação (%)
CP1	78,97	3572,50	3,71
CP2	112,59	5028,50	3,80
CP3	94	4029,73	4,26
CP4	131,75	4128,20	5,94
CP5	27,46	3895,45	2,78
CP6	65,58	6094,27	1,79
CP7	45,27	951,8	4,83
CP8	73,87	5169,59	2,41
CP9	48,38	2123,78	7,34
CP10	85,87	1455,17	6,23
CP11	65,23	1149,23	5,83
CP12	74,43	1156,9	9,98
CP13	53,81	1112,42	4,86
CP14	80,64	1315,8	6,53
CP15	36,31	2529,13	4,79
CP16	68,71	1452,59	4,74
CP17	37,47	969,89	3,86
CP18	67	3588,54	7,46
CP19	48,97	2499,58	4,54
CP20	103,62	4841,93	7
CP21	58,07	1202,26	4,83
CP22	93,7	1526,27	6,42
CP23	37,87	2488,63	4,86
CP24	108,19	1373,73	9,93
CP25	49,35	3058,22	4,2459
CP26	67,1	1865,47	4,68017
CP27	90,38	4734,92	6,1208
CP28	138,99	2275,23	6,29
CP29	25,41	3513,04	1,26

Fonte: Elaborada pelo autor

4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Para realizar a análise estatística foi utilizado o software Minitab visando facilitar a visualização dos resultados obtidos nos ensaios de tração. Foi utilizada a ferramenta de DOE (design of experiments) presente no software e foram criadas as condições de contorno conforme proposto pelo objetivo do trabalho.

Figura 25 - Planejamento do experimento



Fonte: Autoria própria

Tabela 6 - Variáveis e níveis DOE

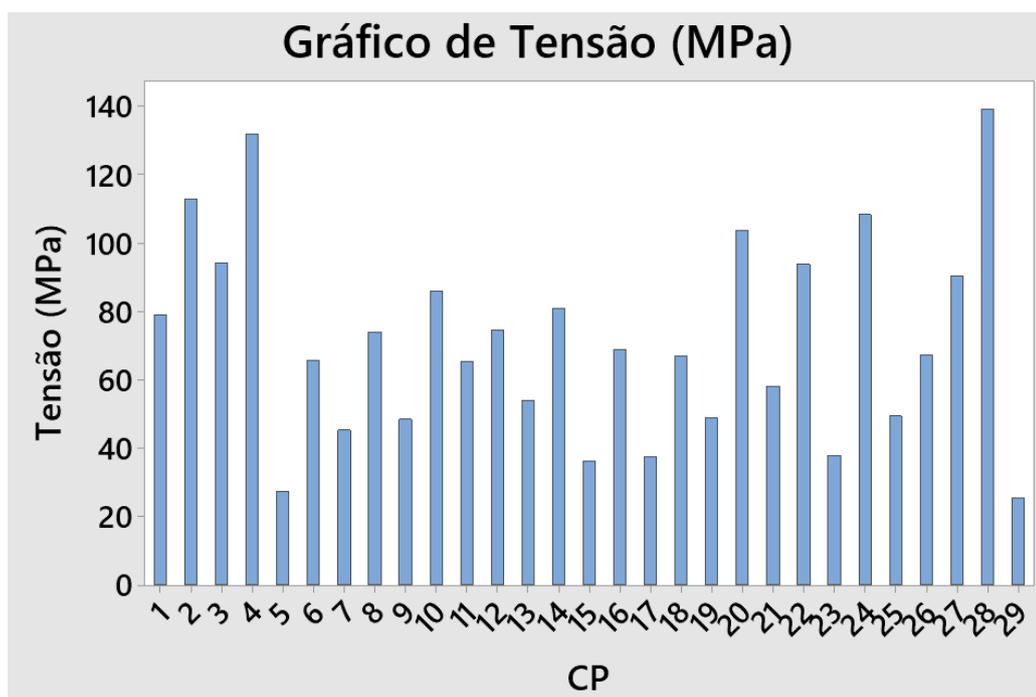
Variáveis de entrada	Valores
Percentual de resina	0%,5%,10%,15% ou 20%
Percentual de NaOH	0%, 2,5%, 5%, 7,5% ou 10%
Tempo na solução de NaOH	0h, 2,5h, 5h ou 10h

Fonte: Autoria própria

Os valores informados nas tabelas 2 e 3 foram combinados no programa Minitab para primeiramente analisar a influência dos fatores controláveis na resposta tensão de ruptura, a tabela pode ser verificada no anexo 1.

Na figura 26 é mostrado o gráfico da tensão de ruptura ordenando o número do corpo de prova de forma crescente, a composição pode ser verificada na tabela 3.

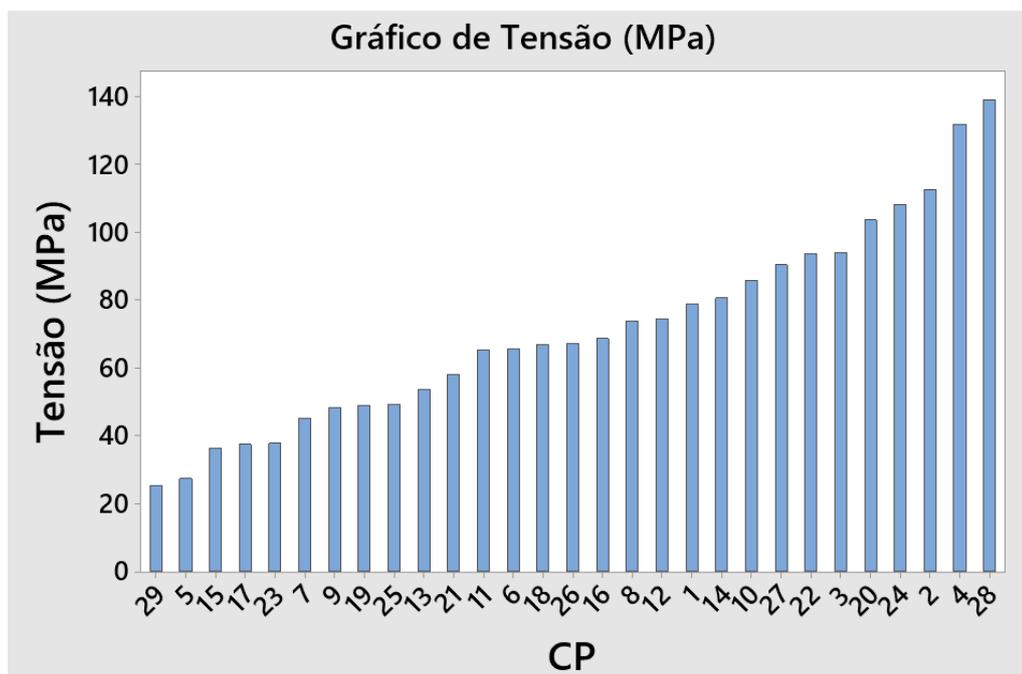
Figura 26 - Tensão de ruptura versus número do corpo de prova crescente



Fonte: Print Screen Minitab

Para uma melhor visualização o gráfico foi ordenado com a tensão de ruptura de forma crescente, conforme pode ser observado na próxima figura 27.

Figura 27 – Tensão de ruptura crescente versus número do corpo de prova



Fonte: Print Screen Minitab

Numa primeira análise deste gráfico pode-se observar uma maior presença de corpos de prova com numeração ímpar com menores valores de tensão de ruptura, todos os corpos de prova com numeração ímpar possuem 5% de fibras de curauá em proporção mássica utilizada como reforço, consequentemente na parte direita do gráfico estão concentrados os corpos de prova com numeração par e que possuem 15% de fibras utilizadas como reforço, um forte indicativo de correlação entre o aumento do percentual de fibra no aumento da tensão máxima de ruptura.

Como primeira análise dos dados obtidos foi realizada a regressão linear considerando as 3 variáveis, o resultado pode ser observado na figura 28 que é um *print screen* da tela do Minitab.

Figura 28 – Regressão linear e termos da equação da tensão de ruptura

Equação de Regressão

$$\text{Tensão} = 25,80 + 4,131 \text{ Fibra} + 1,07 \text{ NaOH} - 0,27 \text{ Tempo}$$

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	25,80	9,78	(5,65; 45,94)	2,64	0,014	
Fibra	4,131	0,670	(2,751; 5,511)	6,16	0,000	1,00
NaOH	1,07	1,15	(-1,30; 3,44)	0,93	0,360	1,21
Tempo	-0,27	1,11	(-2,56; 2,02)	-0,25	0,808	1,21

Fonte: Print Screen Minitab

Verificando os termos da equação pode-se observar que quando as fibras não são adicionadas, corpo de prova 100% de resina epóxi, a resposta da equação é uma tensão de ruptura de 25,80Mpa que é uma resposta bem próxima do valor obtido nos ensaios realizados. Pode-se observar também que o coeficiente parcial da regressão de maior valor está associado ao percentual de fibra, tornando este o maior influenciador na variável dependente.

Figura 29 - Sumário do modelo de regressão linear para tensão de ruptura no Minitab

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
19,5409	60,86%	56,17%	13025,4	46,60%	263,01	267,24

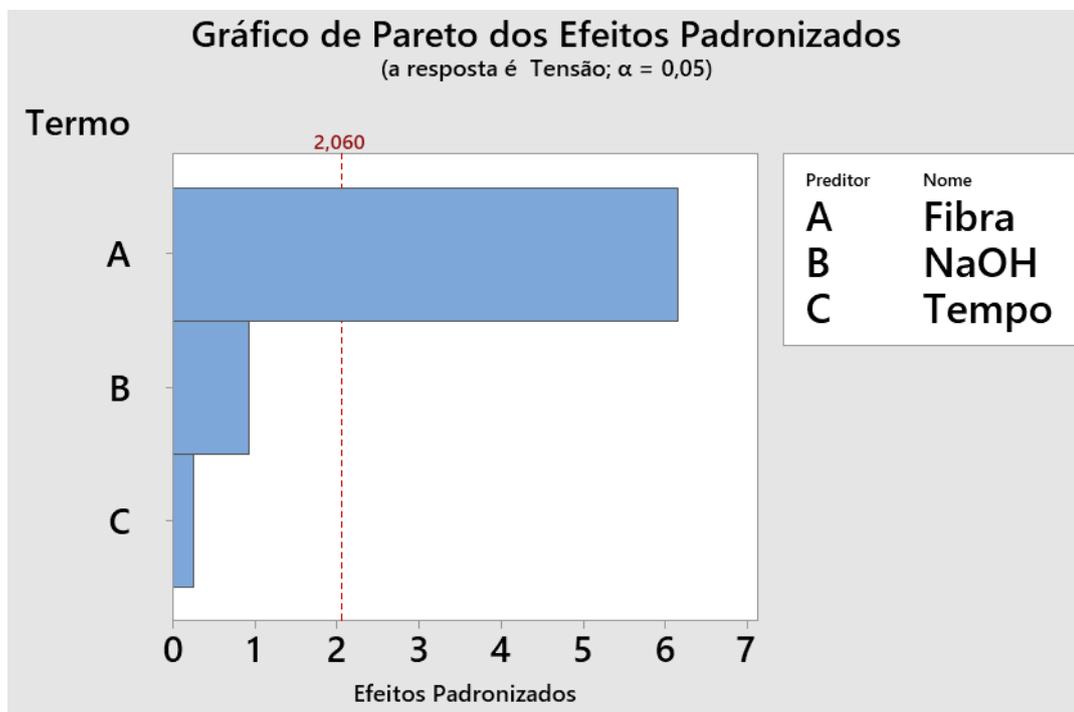
Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM Seq.	Valor F	Valor-P
Regressão	3	14846,6	60,86%	14846,6	4948,9	12,96	0,000
Fibra	1	14505,0	59,46%	14505,0	14505,0	37,99	0,000
NaOH	1	318,7	1,31%	332,0	318,7	0,83	0,370
Tempo	1	22,9	0,09%	22,9	22,9	0,06	0,808
Erro	25	9546,1	39,14%	9546,1	381,8		
Total	28	24392,7	100,00%				

Fonte: Print Screen Minitab

Da ANOVA gerada pelo programa verifica-se que o modelo a regressão consegue explicar 60,86% das respostas com um erro de $\pm 19,54$ MPa e uma confiança de 95%. Nos fatores controláveis o percentual de fibra possui Valor-P de aproximadamente 0, o que significa uma grande correlação entre o percentual de fibra e a tensão de ruptura. Por outro lado, a variável de concentração de NaOH apresentou um valor-P maior que 0,05 o que corresponde a 37% dos resultados apresentados pela concentração de NaOH na solução aquosa tenham sido obtidos por acaso, portanto existe uma correlação fraca para a intensidade do tratamento influenciar no valor de resistência à tração. O parâmetro tempo que as fibras ficaram na solução aquosa apresentou valor-p de 0,808 que é considerado muito alto, representando 80,8% de chance dos resultados apresentados tenham sido obtidos por acaso

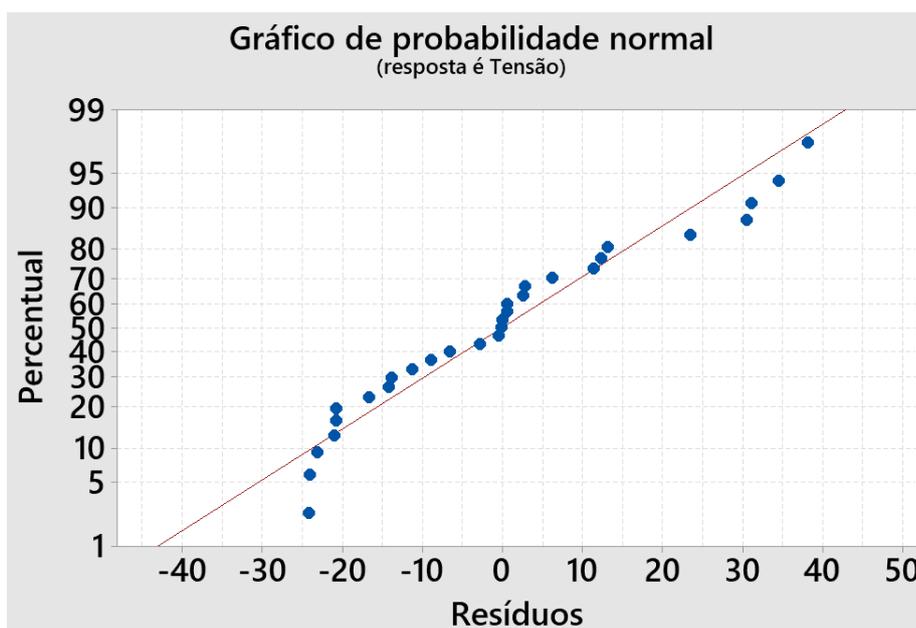
Figura 30 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para a resposta tensão de ruptura



Fonte: Print Screen Minitab

Avaliando o gráfico de Pareto para efeitos padronizados na figura 30 pode-se verificar que somente o parâmetro de percentual da fibra cruza a linha de referência para uma significância de 0,05, considerando assim a única variável que influencia na resposta de limite de resistência à tração com 95% de confiança.

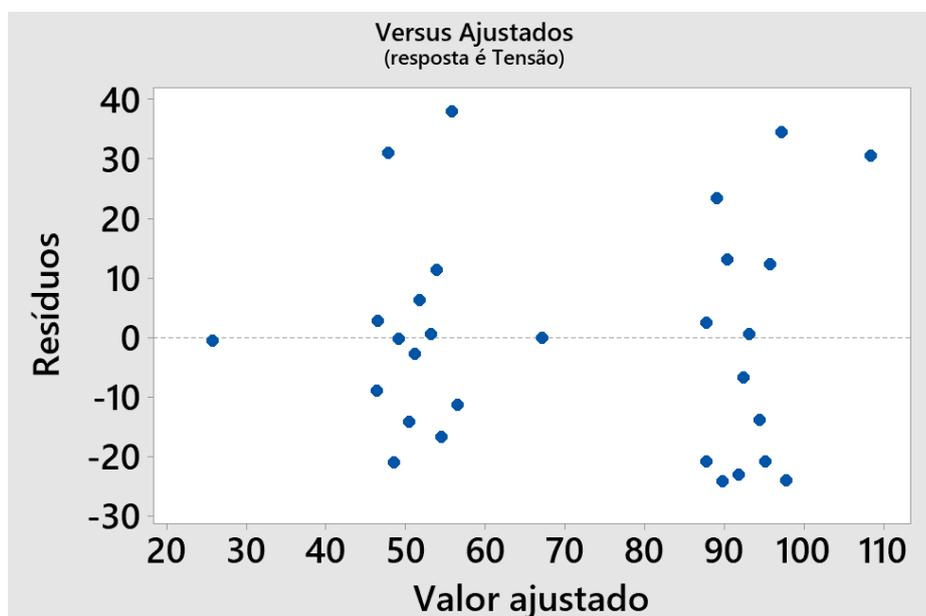
Figura 31 - Probabilidade Normal versus resíduos para tensão de ruptura



Fonte: Print Screen Minitab

Na figura 31 é possível observar o gráfico de probabilidade normal dos resíduos, os pontos estão seguindo em geral uma linha reta, não há nenhuma evidência de não normalidade, outliers ou variáveis não identificadas.

Figura 32 - Resíduos versus valor ajustado para tensão de ruptura

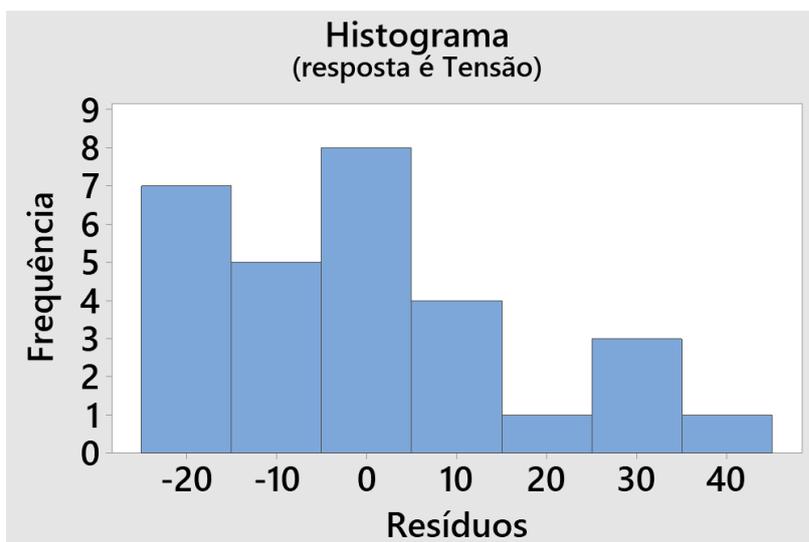


Fonte: Print Screen Minitab

É possível observar no gráfico de resíduos versus valor ajustado que existe uma concentração de resultados na faixa de 40MPa a 60MPa e também na faixa de 90 a 100MPa, isto acontece devido ao coeficiente de regressão parcial da fibra que é o mais significativo na

fórmula (ver figura 28), portanto concentrando os corpos de prova com 5% de fibra no primeiro grupo e com 15% de fibra no segundo grupo. O ponto mais à esquerda representa o corpo de prova puramente com resina (CP29) enquanto o ponto mais centralizado representa o corpo de prova com 10% de fibras que não passaram por nenhum tipo de tratamento (CP26).

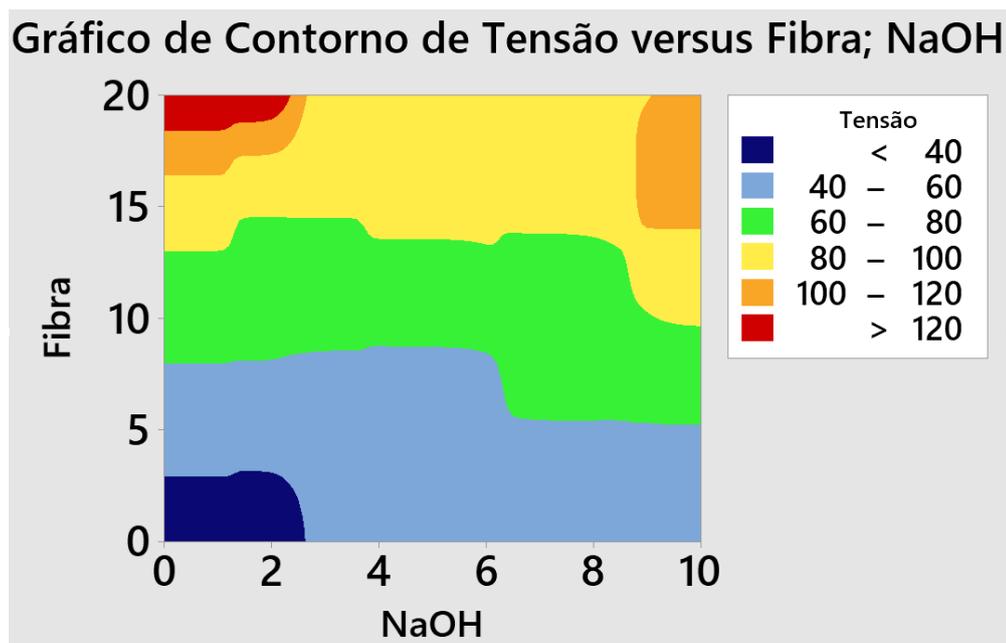
Figura 33 - Histograma dos resíduos



Fonte: Print Screen Minitab

Verificando o histograma dos resíduos em relação a frequência é possível observar que os negativos tiveram maior frequência, porém menores módulos comparando aos positivos.

Figura 34 - Gráfico de contorno de Tensão de ruptura versus percentual de fibra e percentual de NaOH

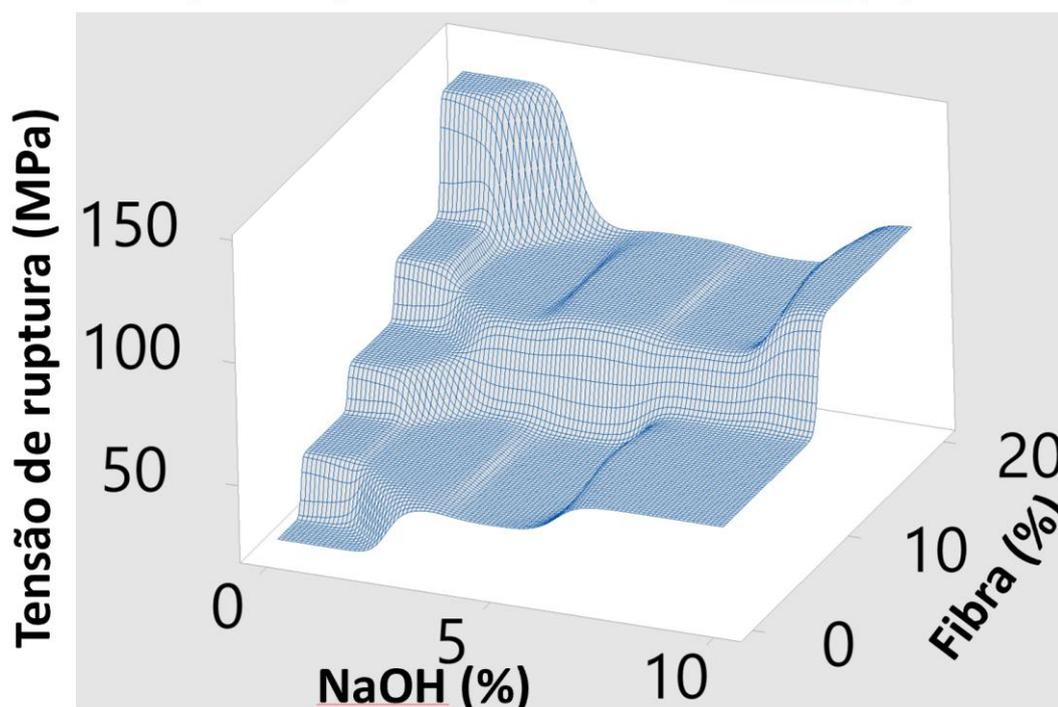


Fonte: Print Screen Minitab

Analisando-se a figura 34 é possível observar que existe múltiplas respostas, isto é, determinando-se valores para as variáveis de entrada do percentual de fibra e concentração de NaOH na solução aquosa é possível estimar a faixa de valores correspondentes para a propriedade mecânica tensão de ruptura. Por exemplo, para um material com 15% de fibra que for submetido a um tratamento químico com NaOH na concentração de 10% é de se prever que a tensão de ruptura obtida esteja entre 100 MPa e 120MPa. De maneira análoga é possível estimar valores para outros tipos de combinações.

Figura 35 - Gráfico de superfície, Tensão de ruptura x Percentual de fibra x Percentual de NaOH

Gráfico de superfície[Tensão de ruptura x NaOH (%) x Fibra (%)]



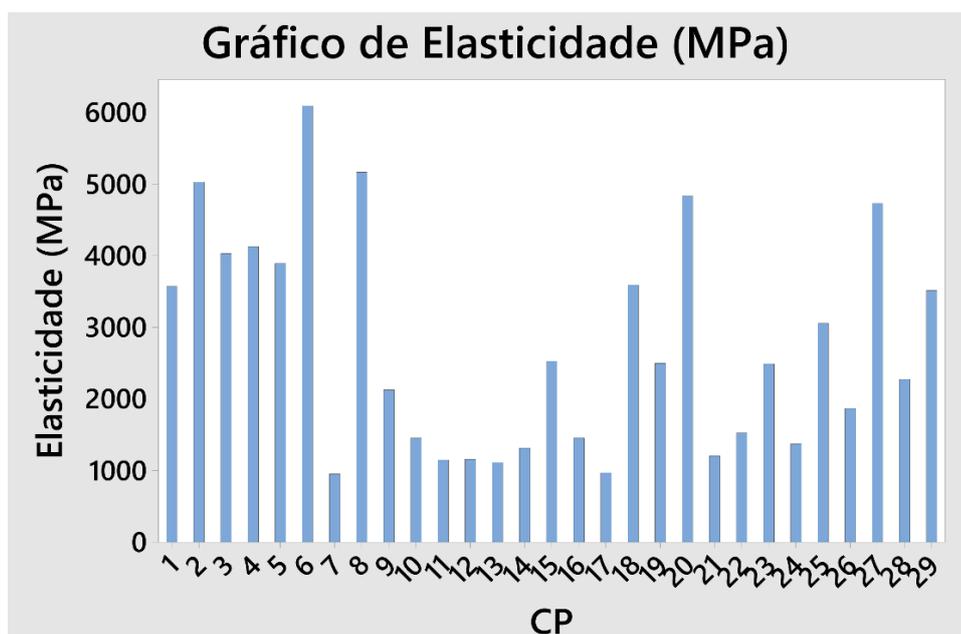
Fonte: Print Screen Minitab

A figura 35 mostra o gráfico de superfície analisando somente os fatores: proporção de fibra e concentração de NaOH por serem os com maior influência na variável dependente, tensão de ruptura.

Os valores informados nas tabelas 2 e 3 foram combinados no programa Minitab para primeiramente analisar a influência dos fatores controláveis na resposta módulo de elasticidade em MPa, a tabela pode ser verificada no anexo 02.

Na figura 36 é mostrado o gráfico do módulo de elasticidade ordenando o número do corpo de prova de forma crescente, a composição pode ser verificada na tabela 3.

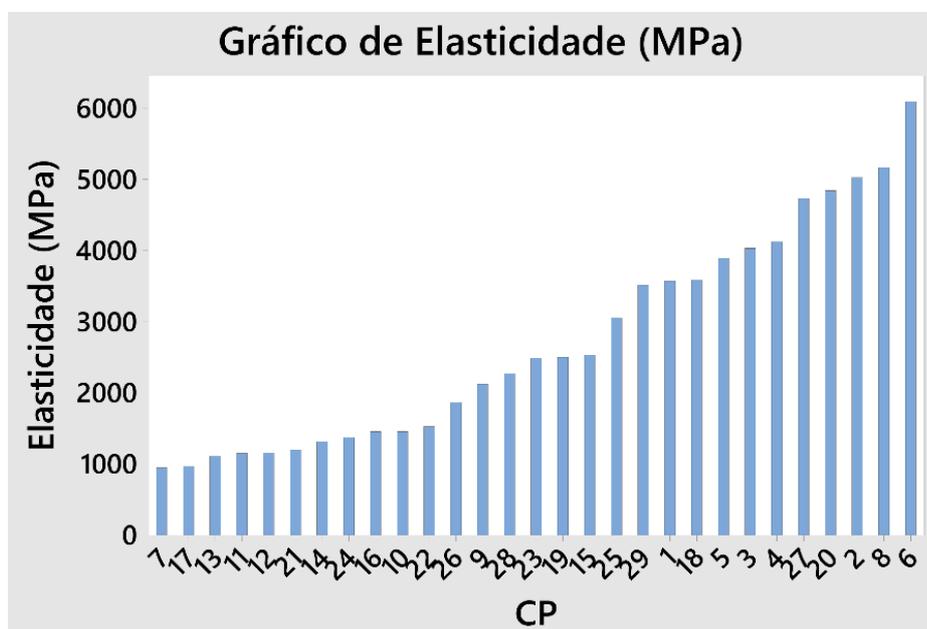
Figura 36 - Módulo de elasticidade versus número do corpo de prova crescente



Fonte: Print Screen Minitab

Para uma melhor visualização o gráfico foi ordenado com o módulo de elasticidade de forma crescente, conforme pode ser observado na próxima figura 37.

Figura 37 - Módulo de elasticidade crescente versus número do corpo de prova



Fonte: Print Screen Minitab

Numa primeira análise deste gráfico pode-se observar uma maior dispersão entre corpos de prova com 5% e 15% de proporção mássica.

Como primeira análise dos dados obtidos foi realizada a regressão linear considerando as 3 variáveis, o resultado pode ser observado na figura 38 que é um *print screen* da tela do Minitab.

Figura 38 - Regressão Linear e termos da equação para Módulo de Elasticidade

Equação de Regressão

$$\text{Elasticidade} = 2811 + 57,7 \text{ Fibra} - 100,0 \text{ NaOH} - 29,5 \text{ Tempo}$$

Coefficientes

Termo	Coef	EP de		Valor-T	Valor-P	VIF
		Coef	IC de 95%			
Constante	2811	755	(1256; 4365)	3,72	0,001	
Fibra	57,7	51,7	(-48,8; 164,2)	1,12	0,275	1,00
NaOH	-100,0	88,8	(-283,0; 82,9)	-1,13	0,271	1,21
Tempo	-29,5	85,8	(-206,2; 147,2)	-0,34	0,734	1,21

Fonte: Print Screen Minitab

Verificando os termos da equação pode-se observar que o coeficiente parcial de regressão de maior módulo está associado à concentração de NaOH na solução aquosa com um sinal negativo indicando a diminuição do módulo de elasticidade conforme o acréscimo do mesmo na solução da mesma forma como o tempo que a fibra permanece na solução diminui a variável de resposta. Por outro lado, o percentual de fibra no compósito ficou como o segundo fator mais influente na resposta da equação e contribuindo para o aumento do módulo de elasticidade.

Figura 39 - Sumário do modelo de regressão para Módulo de Elasticidade

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1508,18	11,71%	1,11%	77092564	0,00%	515,09	519,31

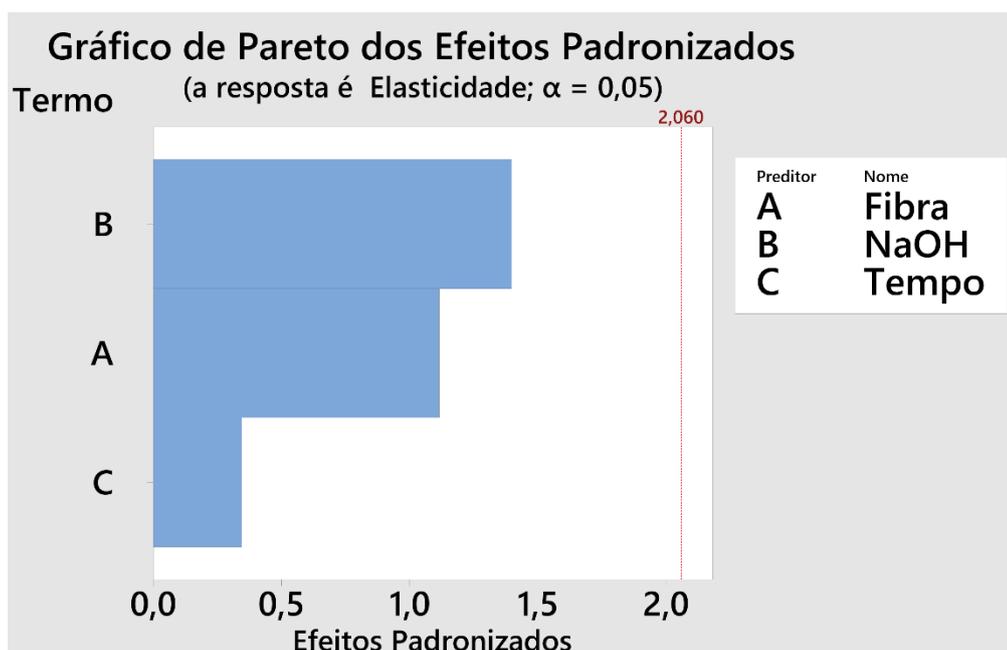
Análise de Variância

Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM Seq.	Valor F	Valor-P
Regressão	3	7540095	11,71%	7540095	2513365	1,10	0,366
Fibra	1	2829377	4,39%	2829377	2829377	1,24	0,275
NaOH	1	4441730	6,90%	2885484	4441730	1,95	0,175
Tempo	1	268989	0,42%	268989	268989	0,12	0,734
Erro	25	56865367	88,29%	56865367	2274615		
Total	28	64405462	100,00%				

Fonte: Print Screen Minitab

Verificando o valor-p das variáveis a concentração e NaOH apresenta o menor valor, entretanto é consideravelmente maior que 0,05, assim como o valor-p para percentual de fibra e tempo na solução. Analisando o valor de R² observa-se que possui um valor extremamente baixo o que indica que a regressão não consegue se ajustar bem aos valores obtidos.

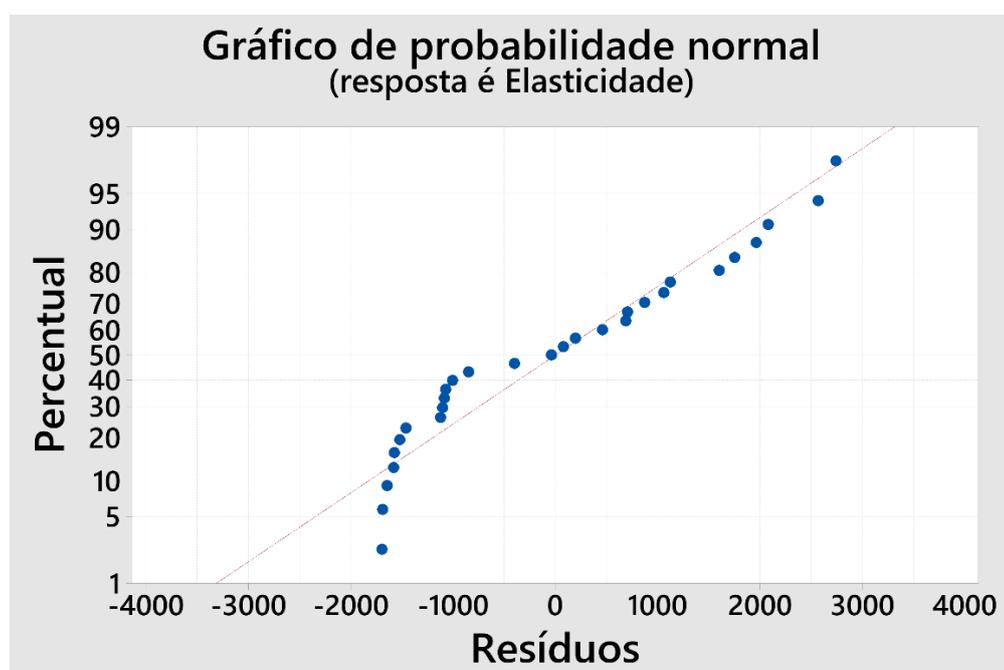
Figura 40 - Gráfico de Pareto para módulo de Elasticidade



Fonte: Print Screen Minitab

Avaliando o gráfico de Pareto para efeitos padronizados na figura 40 pode-se verificar que nenhum fator controlável cruza a linha de referência para uma significância de 0,05, não podendo afirmar que alguma variável influencia na resposta módulo de elasticidade com pelo menos 95% de confiança.

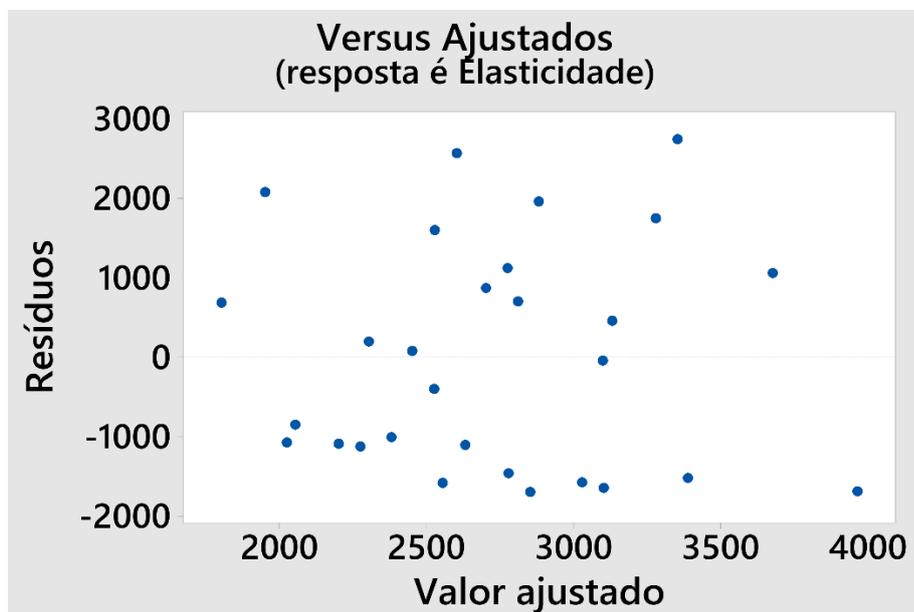
Figura 41 - Probabilidade normal para resíduos do Módulo de Elasticidade



Fonte: Print Screen Minitab

Na figura 41 é possível observar o gráfico de probabilidade normal dos resíduos, os pontos estão seguindo em geral uma linha reta, não há nenhuma evidência de não normalidade, outliers ou variáveis não identificadas.

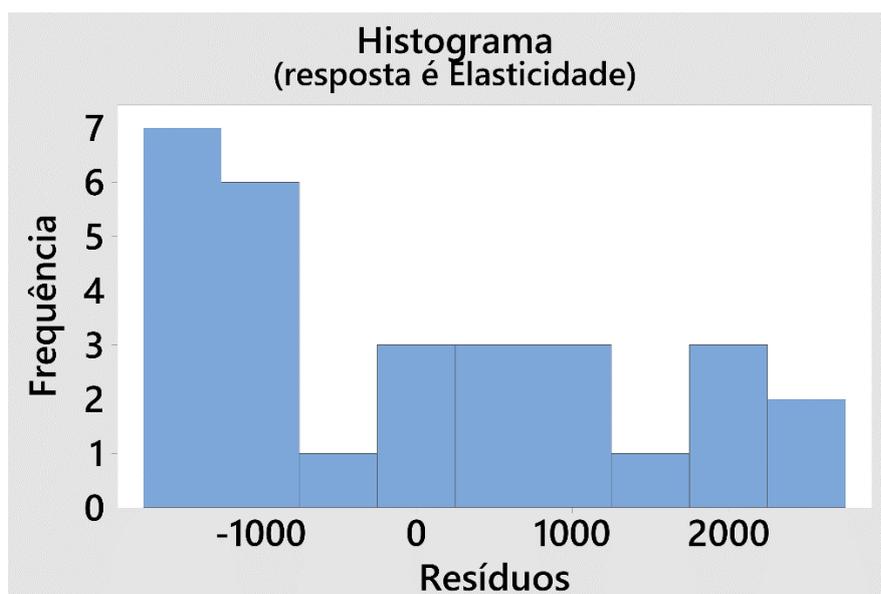
Figura 42 - Resíduos do Módulo de Elasticidade versus valor ajustado



Fonte: Print Screen Minitab

É possível observar no gráfico de resíduos versus valor ajustados que os resíduos são aleatoriamente distribuídos e têm variância constante, sem nenhum padrão reconhecível nos pontos.

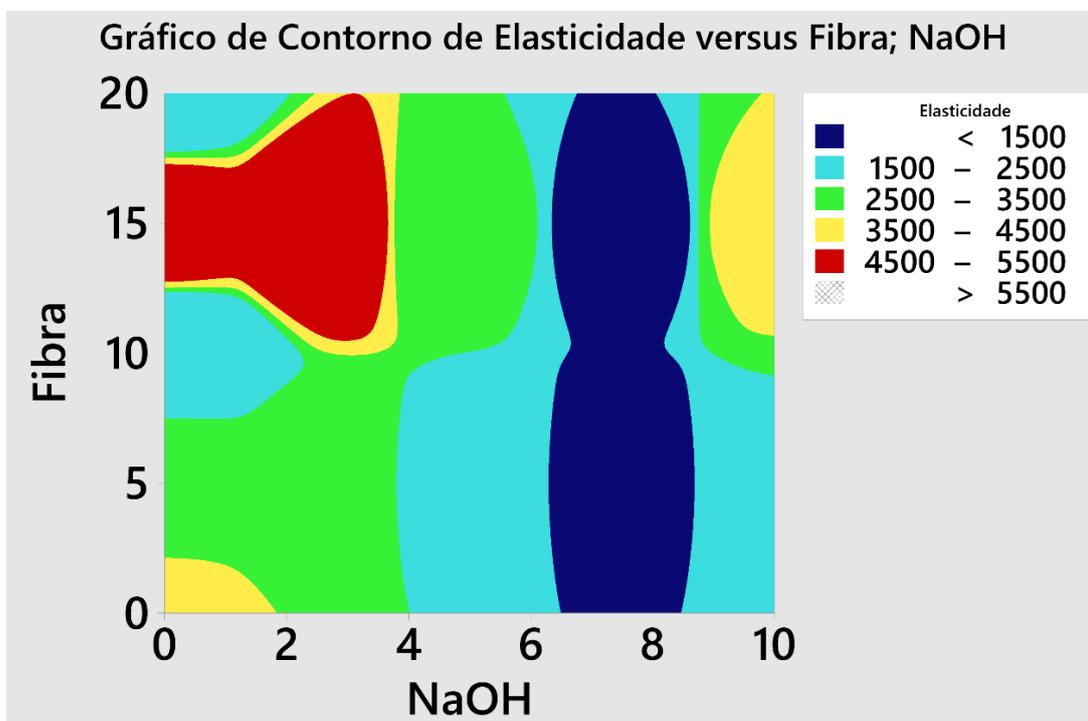
Figura 43 - Histograma do Módulo de Elasticidade versus resíduos



Fonte: Print Screen Minitab

Verificando o histograma dos resíduos em relação a frequência é possível observar que os resíduos negativos tiveram maior frequência, porém menores valores em reação aos resíduos positivos.

Figura 44 - Gráfico de contorno do Módulo de Elasticidade x Percentual de fibra x Percentual de NaOH

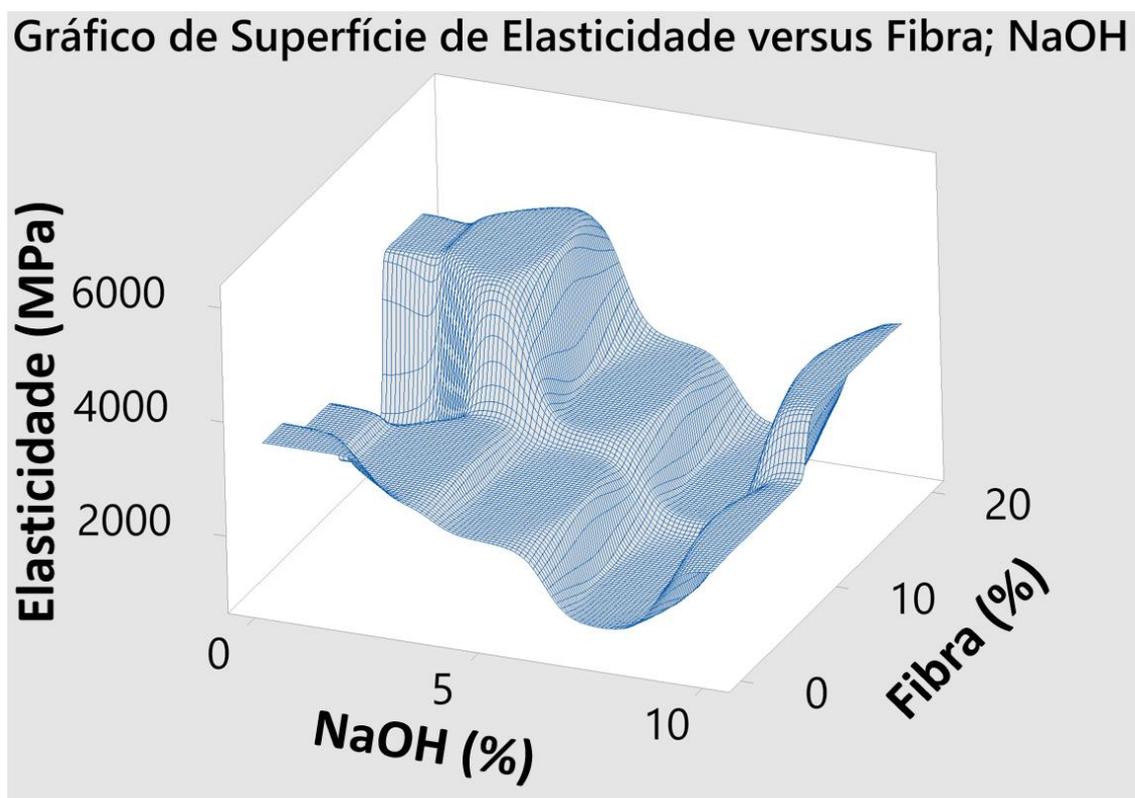


Fonte: Print Screen Minitab

Analisando-se a figura 44 é possível observar que existe múltiplas respostas, isto é, determinando-se valores para as variáveis de entrada do percentual de fibra e concentração de NaOH na solução aquosa é possível estimar a faixa de valores correspondentes para a propriedade mecânica módulo de elasticidade. Por exemplo, para um material com 15% de fibra que for submetido a um tratamento químico com NaOH na concentração de até 2,5% é de se prever que o módulo de elasticidade obtido esteja entre 4000 MPa e 5000MPa. De maneira análoga é possível estimar valores para outros tipos de combinações.

Vale destacar ainda a região que representa a concentração de 7,5% de hidróxido de sódio na solução aquosa, nessa faixa foram obtidos os menores valores de modulo de elasticidade, com todos abaixo de 1,5GPa. Por outro lado, o tratamento na concentração de 2,5% de hidróxido de sódio na solução aquosa obteve a faixa de maiores módulos de elasticidade, sendo aumentado proporcionalmente ao percentual de fibra nos compósitos.

Figura 45 - Gráfico de superfície para Módulo de Elasticidade x Percentual de fibra x Percentual de NaOH



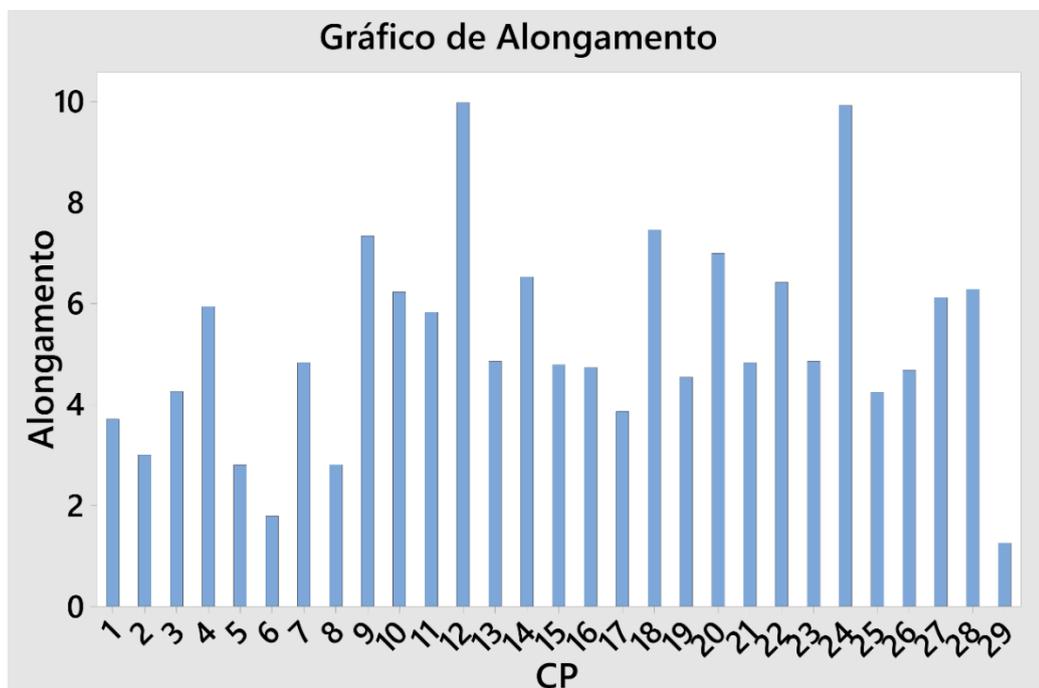
A figura 45 mostra o gráfico de superfície analisando somente os fatores: proporção de fibra e concentração de NaOH por serem os com maior influência na variável dependente, módulo de elasticidade. É possível verificar que a diminuição de NaOH na solução melhora essa variável de resposta.

Conforme fora avaliado no gráfico de contorno, é possível visualizar com mais clareza a região de 7,5% de concentração de hidróxido de sódio na solução aquosa, onde apresenta um considerável aumento quando a concentração é aumentada para 10% e um leve ganho com o aumento do percentual de fibra nessa faixa. A faixa de concentração de hidróxido de sódio com 5% apresentou leve aumento no módulo de elasticidade com o aumento percentual de fibras, semelhante ao que aconteceu na faixa de 10% de NaOH. A faixa de concentração de hidróxido de sódio em 2,5% obteve ganho considerável com o aumento percentual de fibra.

Os valores informados nas tabelas 2 e 3 foram combinados no programa Minitab para analisar a influência dos fatores controláveis na resposta alongamento (%), a tabela pode ser verificada no anexo 2.

Na figura 46 é mostrado o gráfico do alongamento ordenando o número do corpo de prova de forma crescente, a composição pode ser verificada no anexo 3.

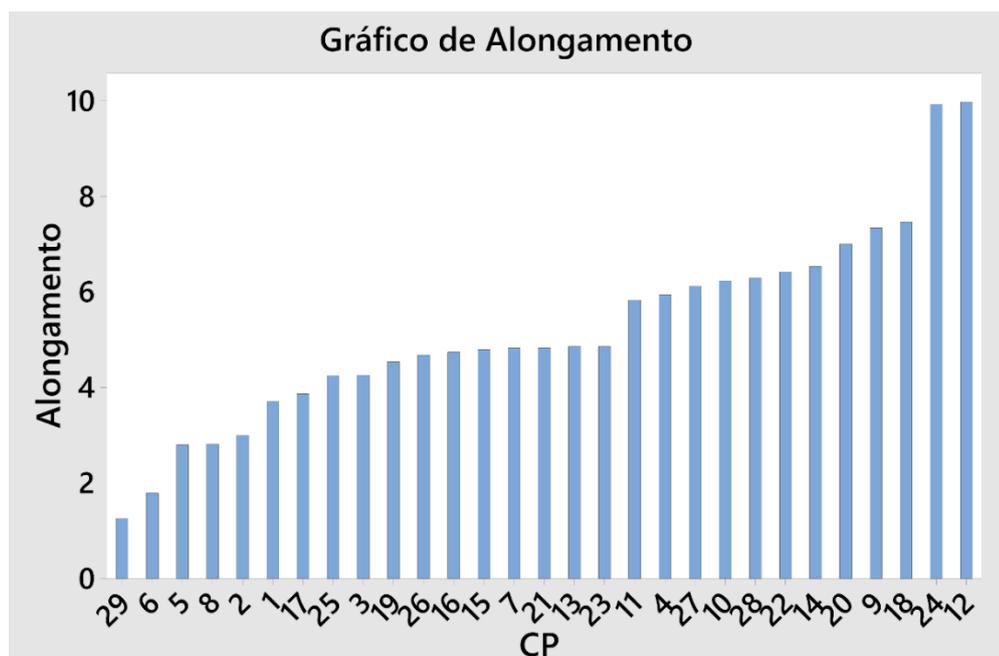
Figura 46 - Alongamento versus número do corpo de prova crescente



Fonte: Print Screen Minitab

Para uma melhor visualização o gráfico foi ordenado com o alongamento de forma crescente, conforme pode ser observado na próxima figura 47.

Figura 47 - Alongamento crescente versus número do corpo de prova



Fonte: Print Screen Minitab

Numa primeira análise deste gráfico pode-se observar uma maior dispersão entre corpos de prova com 5% e 15% de proporção mássica, nenhuma conclusão pode ser tirada previamente.

Figura 48 -Regressão Linear e temos da equação para Alongamento

Equação de Regressão

$$\text{Alongamento} = 2,440 + 0,1603 \text{ Fibra} + 0,146 \text{ NaOH} + 0,084 \text{ Tempo}$$

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	IC de 95%	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	2,440	0,899	(0,588; 4,291)	2,71	0,012	
Fibra	0,1603	0,0616	(0,0334; 0,2872)	2,60	0,015	1,00
NaOH	0,146	0,106	(-0,072; 0,364)	1,38	0,179	1,21
Tempo	0,084	0,102	(-0,126; 0,295)	0,82	0,418	1,21

Fonte: Print Screen Minitab

Verificando-se os termos da equação pode-se observar que o coeficiente parcial de maior valor está associado ao percentual de fibra no material, e com um valor ligeiramente inferior podemos ver o valor associado à concentração de NaOH na solução aquosa, o coeficiente parcial de menor significância é o tempo de permanência na solução aquosa, todos os coeficiente contribuem positivamente para o aumento do alongamento.

Figura 49 - Sumário do modelo de Regressão Linear da Ealsticidade

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	PRESQ	R2(pred)	AICc	BIC
1,79610	30,66%	22,34%	107,362	7,69%	124,57	128,80

Análise de Variância

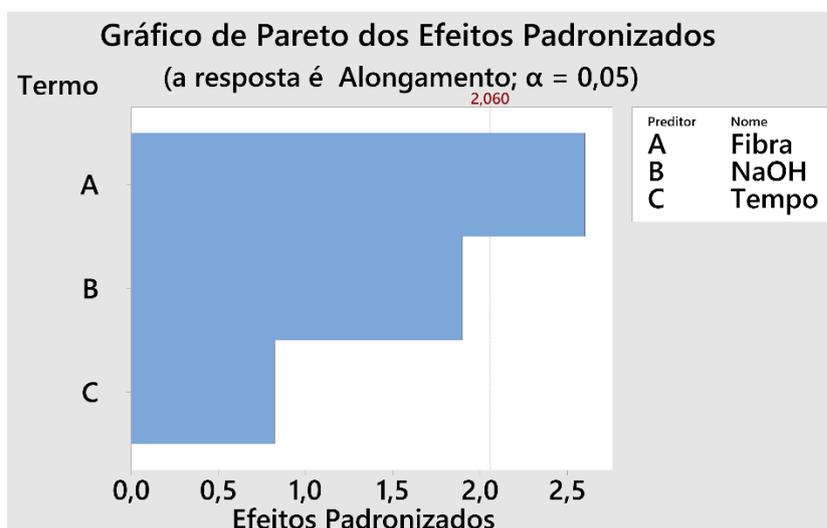
Fonte	GL	SQ Seq	Contribuição	SQ (Aj.)	QM Seq.	Valor F	Valor-P
Regressão	3	35,661	30,66%	35,661	11,887	3,68	0,025
Fibra	1	21,848	18,78%	21,848	21,848	6,77	0,015
NaOH	1	11,628	10,00%	6,159	11,628	3,60	0,069
Tempo	1	2,185	1,88%	2,185	2,185	0,68	0,418
Erro	25	80,649	69,34%	80,649	3,226		
Total	28	116,310	100,00%				

Fonte: Print Screen Minitab

Verificando o valor-p da variável percentual de fibra é menor que 0,05, representando um bom indicador de confiabilidade acima de 95% para a influência dessa variável no alongamento. Em seguida o valor-p da concentração de NaOH é ligeiramente superior ao valor de 0,05, portanto existe 6,9% de chance deste parâmetro ter influenciado aleatoriamente no

resultado. Com bem menos influência sobre a resposta pode-se observar o valor-p do tempo de permanência na solução com 41,8% de chance de ter influenciado aleatoriamente na resposta de alongamento

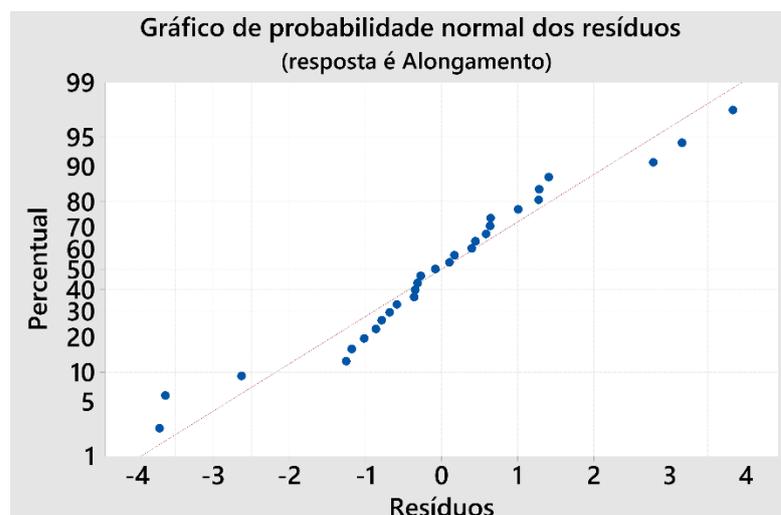
Figura 50 - Gráfico de Pareto para Alongamento



Fonte: Print Screen Minitab

Avaliando o gráfico de Pareto para efeitos padronizados na figura 50 pode-se verificar que somente o parâmetro de percentual da fibra cruza a linha de referência para uma significância de 0,05, considerando assim a única variável que influencia na resposta de limite de resistência à tração com 95% de confiança. Porém o parâmetro de percentual de NaOH chegou bem perto da linha de referência e também merece destaque como influenciador da resposta de alongamento

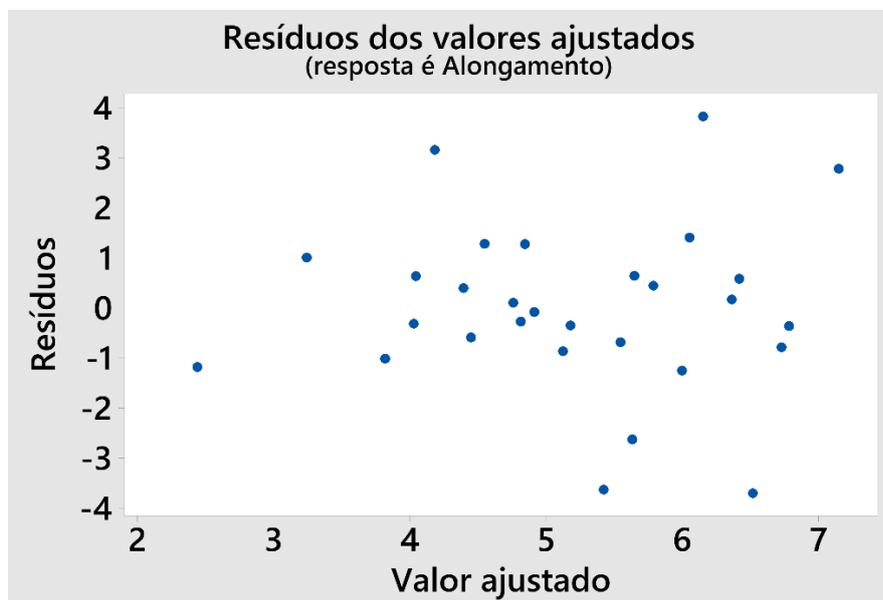
Figura 51 - Probabilidade normal para resíduos do Alongamento



Fonte: Print Screen Minitab

Na figura 51 é possível observar o gráfico de probabilidade normal dos resíduos, os pontos estão seguindo em geral uma linha reta, porém é notada a presença de alguns outliers nos extremos do gráfico.

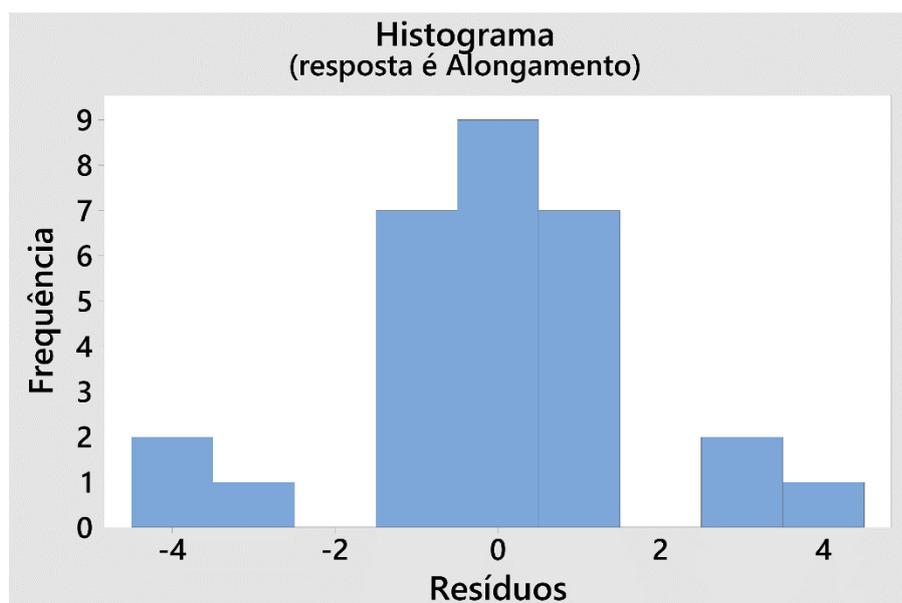
Figura 52 -Resíduos versus valor ajustado do Alongamento



Fonte: Print Screen Minitab

É possível observar no gráfico de resíduos versus valor ajustados que os resíduos são aleatoriamente distribuídos, porém com presença de outliers nos valores ajustados mais altos.

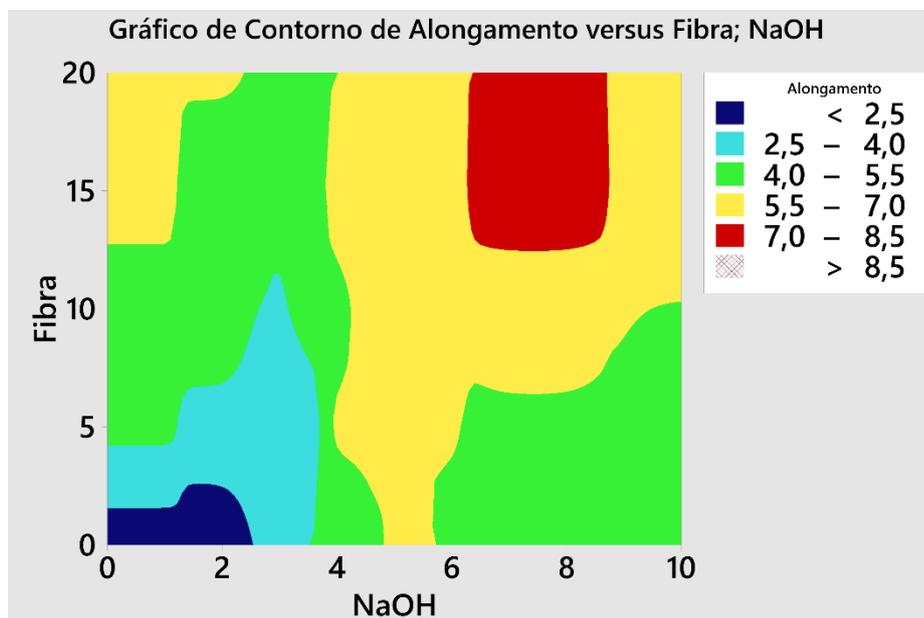
Figura 53 - Histograma dos resíduos do Alongamento



Fonte: Print Screen Minitab

Verificando o histograma dos resíduos em relação a frequência é possível observar que a quantidade de resíduos positivos e negativos ficou distribuída igualmente, além disso nenhum resíduo ocupou a faixa de 1,5 até 2,5 nos dois lados do gráfico.

Figura 54 - Gráfico de contorno Alongamento x Percentual de fibra x Percentual de NaOH

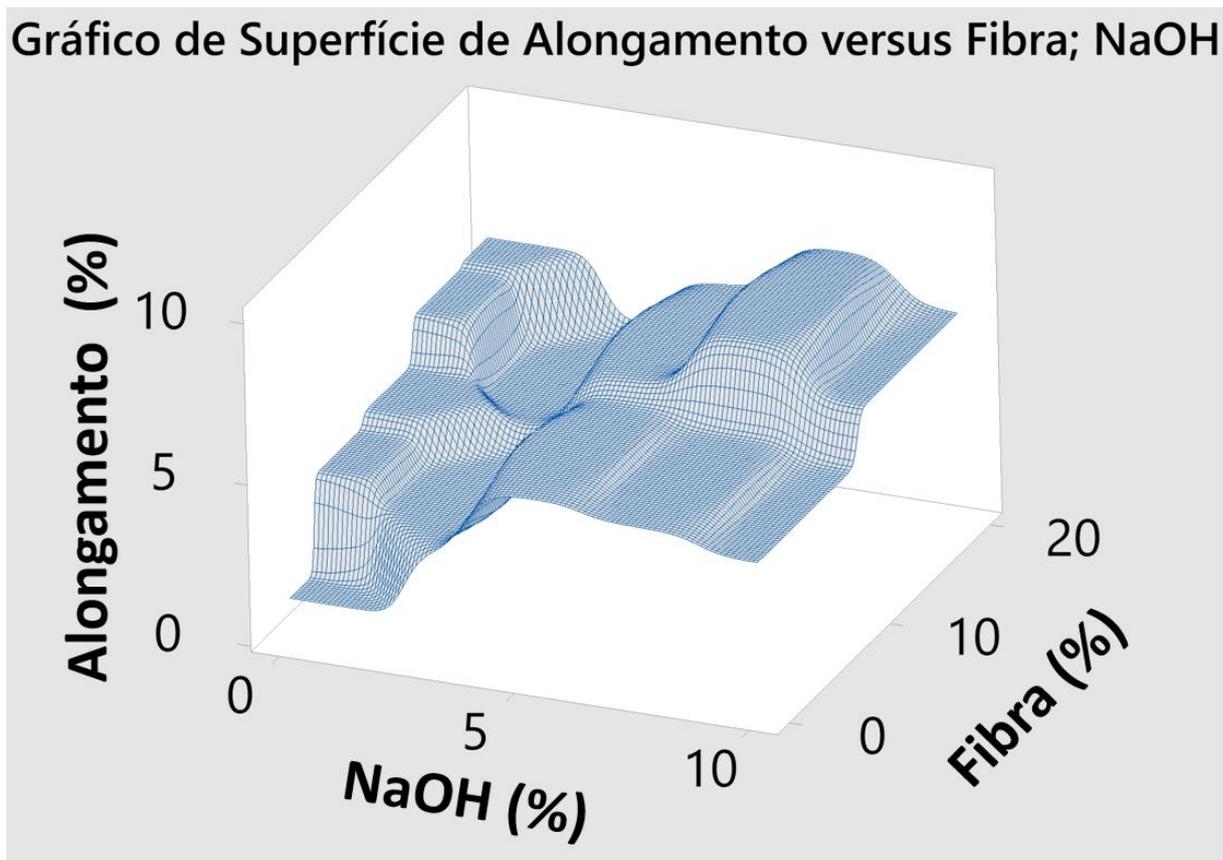


Fonte: Print Screen Minitab

Analisando-se a figura 54 é possível observar que existe múltiplas respostas, isto é, determinando-se valores para as variáveis de entrada do percentual de fibra e concentração de NaOH na solução aquosa é possível estimar a faixa de valores correspondentes para a propriedade mecânica alongamento percentual. Por exemplo, para um material com 15% de fibra que for submetido a um tratamento químico com NaOH na concentração de 7,5% até 10% é de se prever que o alongamento esteja entre 6% e 8%. De maneira análoga é possível estimar valores para outros tipos de combinações.

A região que representa o corpo de prova sem a adição de fibras apresentou o menor valor de alongamento percentual, com o incremento de fibras e da concentração de hidróxido de sódio na solução aquosa é possível observar o alongamento aumentando junto com essas duas variáveis e alcançando os maiores valores na região de 7,5% de NaOH e 15% de fibra. As regiões adjacentes a essa faixa obtiveram valores semelhantes.

Figura 55 - Gráfico de superfície: Alongamento x Percentual de fibra x Percentual de NaOH



Fonte: Print Screen Minitab

A figura 55 mostra o gráfico de superfície analisando somente os fatores: proporção de fibra e concentração de NaOH por serem os com maior influência na variável dependente, módulo de elasticidade. É possível verificar que o aumento da proporção mássica de fibra e a maior concentração de NaOH na solução aquosa aumentam gradativamente o alongamento do material.

5 SÍNTESE CONCLUSIVA

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho pode-se concluir que as variáveis controláveis tiveram influência nas variáveis de resposta analisadas, promovendo uma melhor adesão fibra/matriz e potencializando os resultados de um material simples comparado a um material compósito para a resistência à tração.

A resposta da tensão de ruptura obteve uma grande influência da variável percentual mássico das fibras no compósito, o percentual de NaOH na solução aquosa teve influência mediana e o tempo de permanência na mistura apresentou uma fraca correlação com os resultados obtidos. O material composto puramente por resina epóxi apresentou o resultado de tensão de ruptura de 25,41MPa, enquanto o valor máximo do compósito foi registrado em 131,75MPa que é 5,18 vezes maior utilizando 15% de percentual de fibra, 10% de NaOH na solução aquosa e tempo de permanência de 5h. É importante ressaltar que ainda há espaço para melhorar os resultados com um aumento do percentual de fibras, existe um ponto de inflexão onde o aumento do percentual de fibras não conseguirá mais elevar o a resistência à tração, porém pela tendência dos dados analisados ainda há espaço para incrementar entre 5% e 10% de fibras no compósito. Desta forma para otimizar a tensão de ruptura sugere-se utilizar corpos de prova com percentual mássico de fibras de 15% ou mais, já no tratamento químico caso seja utilizado uma concentração de NaOH próxima de 10% manter as fibras na solução por aproximadamente 5h, outra alternativa é diminuir a intensidade de NaOH com um tempo de permanência de 10h, ocorrendo assim uma compensação entra a intensidade do tratamento e o tempo exposto para que a lignina e hemicelulose sejam corretamente removidas sem danificar a estrutura da fibra.

A resposta do Módulo de Elasticidade apresentou correlação média com o percentual mássico de fibras do compósito e com o percentual de NaOH na solução aquosa, já o tempo de permanência na solução apresentou correlação fraca. Os corpos de prova com menores módulos de elasticidade em sua maioria possuem 5% de percentual de fibra, concentração de NaOH entre 7,5% e 10% e o tempo de permanência não apresentou nenhuma tendência que possa se destacar, na outra extremidade a maioria dos corpos de prova com os maiores módulos de elasticidade possuem 15% de percentual de fibra, percentual de NaOH entre 2,5% e 5% e tempo de permanência menor que 5h. Para otimização desse resultado é de suma importância uma intensidade equilibrada a concentração de NaOH e o tempo de permanência na solução.

A resposta para o alongamento apresentou correlação alta para percentual de fibra, médio para concentração de NaOH e fraco para o tempo de permanência. Baixos percentuais de fibras combinados com baixa concentração de NaOH resultam em baixos alongamentos, independentemente do tempo. Na outra extremidade da análise, altos percentuais de fibras combinados com alta concentração de NaOH e tempo alto de permanência no geral apresentaram os maiores alongamentos registrados.

Sendo assim, os compósitos de resina epóxi reforçados com fibras de curauá apresentam um bom potencial para substituir as fibras sintéticas de vidro, tendo ainda espaço para melhora da interface fibra/matriz para que propriedades mecânicas melhores sejam obtidas.

6 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

1. Realizar outros tipos de ensaios mecânicos.
2. Diminuir o número de níveis de variáveis, preferencialmente para somente dois níveis.
3. Realizar de 3 a 5 réplicas para cada configuração do corpo de prova.
4. Obter informações sobre o curauá desde o plantio, e os processos de transporte e armazenagem até serem adquiridos.
5. Utilizar outras marcas de resina com diferentes viscosidades.

REFERÊNCIAS

ANDRADE CT, C. F. D. M. L. E. O. C. T. D. **Dicionário de polímeros**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

ASHBEE, K. H. G. **Fundamental Principles of Fiber Reinforced Composites**. **Technomic Pub**, Lancaster, n. 2, 1993.

BEVITORI, A. B. I.; SILVA, L. A.; LOPES, F. P. D. Comportamento mecânico em tração de compósitos de matriz poliéster reforçada com fibras de juta. **19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.**, 2010.

BOTELHO, R. S. **Influência do método de preparação da fibra de Curauá nas propriedades**. Universidade do Estado do Amazonas. Manaus, p. 59. 2017.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia De Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 5ªed. 589p, 2002.

CARASCHI, J. C.; LEÃO, A. L. Avaliação das propriedades mecânicas dos plásticos reciclados provenientes de resíduos sólidos urbanos. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 24, p. 1599-1602, Setembro 2002. ISSN 6.

DA SILVA JUNIOR, O. G. **Produção e caracterização de compósitos à base de fibras de curauá, amido termoplástico e polietileno, utilizando-se a termografia**. Universidade do Estado de Minas Gerais. Minas Gerais, p. 129. 2013.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. New York: Oxford University Press, 1994. 395 p.

DE PAIVA, J. M.; F., F. Matriz termofixa fenólica em compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana-de-açúcar. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 1999.

ERENO, D. Fibra para toda obra. **Site da Fapesp, boletim eletrônico n. 104**, 2004. Disponível em: http://www.fapesp.br/agencia/boletim_dentro.php?data%5Bid_materia_boletim%5D=2621 >. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

FAO. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A AGRICULTURA E A ALIMENTAÇÃO. **http://www.fao.org/natural-fibres-2009/home/es/**, 2009. Disponível em: <http://www.fao.org/natural-fibres-2009/es>>. Acesso em: 08 Dezembro 2017.

FERREIRA, A. S. **Características estruturais e propriedades de compósitos poliméricos reforçados com fibras longas de curauá**. UFN. Campo dos goytacazes, p. 166. 2009.

GEHLEN, L. R. **Efeito da Utilização de Fibras Lignocelulósicas (Açaí e Curauá) em compósitos com matriz de resina Poliéster insaturado**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, p. 104. 2014.

GONZAGA, F. M. **Estudo da influência do tratamento alcalino/mecânico nas propriedades mecânicas de compósitos de fibras curtas de sisal/epóxi.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 54. 2014.

JACOB, J. M.; THOMAS, S. Biofibres and biocomposites. **Carbohydrate polymers**, v. 71, n. 3, p. 343-364, 2008.

JUVANDES, L. . M. A. T. E. F. J. A. **Materiais compósitos no reforço de estruturas de betão.** Universidade do Porto (FEUP). Porto, p. 112. 1996.

JUVANDES, L. F. P. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de “CFRP”.** Universidade do Porto. Porto. 1999.

JUVANDES, L.; MARQUES, A. T.; FIGUEIRAS, J. A. Analysis and Performance of Fiber Composites. **John Wiley & Sons**, Nova York, 1990.

KERSTING, D. D. F. **Avaliação de resinas epóxi para fabricação de materiais compósitos pelo processo de pultrusão.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 102. 2004.

LEÃO, R. M. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno.** Universidade de Brasília. [S.l.], p. 74. 2012.

MADSEN, B. **Properties of plant fiber yarn polymer composites: An experimental study.** Technical University of Denmark. [S.l.], p. 151. 2004.

OTA, W. N. **Análise de compósitos de polipropileno e fibras de vidro utilizados pela indústria automotiva nacional.** Universidade Federal do Paraná. [S.l.], p. 90. 2004.

PICANÇO, M. S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá.** Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUCRJ. Rio de Janeiro, p. 101. 2005.

PIRES, J. S. C. **FIBRAS NATURAIS: Características químicas e potenciais aplicações.** Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Botucatu, p. 60. 2009. (s.n).

PIRES, J. S. C. **NATURAL FIBERS: CHEMICAL CHARACTERISTICS AND POTENTIAL APPLICATIONS.** Universidade Estadual Paulista. Botucatu, p. 50. 2009.

ROLIM, A. M. **A reciclagem de Resíduos Plásticos Pós-consumo em oito empresas do Rio Grande do Sul.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 142. 2000.

SANTOS, A. M. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno / fibras de vidro e coco para aplicações em engenharia.** Universidade Federal do Paraná. [S.l.], p. 76. 2006.

SANTOS, E. F. **Efeitos de agentes de acoplamento em compósitos de polipropileno com fibras de coco.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. [S.l.], p. 81. 2007.

SANTOS, N. S. S. **Análise experimental e teórica do comportamento mecânico sob carregamento quase-estático de compósitos reforçados com fibra vegetais.** Universidade Estadual de Campinas. [S.l.], p. 107. 2010.

SEGUNDO, J. E. D. V.; VILAR, E. O. Grafeno: Uma revisão sobre propriedades, mecanismos de produção e potenciais aplicações em sistemas energéticos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, cAMPINA GRANDE, v. 11, n. 2, p. 54-57, Fervereiro 2017.

SILVA, C. A. **Sustainable Design of automotive components through jute fiber composites: an integrated approach**. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa. Lisboa, p. 226. 2010.

SILVA, R. Aplicação de Fibras Lignocelulósicas na Química de Polímeros e em compósitos. **Química Nova**, Maringá, v. 32, p. 661-671, Abril 2009. ISSN 3.

SINGH, B. Studies on polymer composites based on sisal polyester and glass modified sisal fibers, filler and unsaturated polyester resin. **Research and Industry**, v. 39, n. 1, p. 38-42, 1994. ISSN 1.

SOBRINHO, L. L. **Desenvolvimento de matriz polimérica para material compósito visando o reforço de dutos de aço**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 137f. 2005.

SPERLING, L. H. Introduction to Physical Polymer Science. **John Wiley & Sons**, n. 4th edition, p. p. 765., 2006.

TOMCZAK, F.; SATYANARAYANA, K. G.; SYDENSTRICKER, T. H. D. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: Part III – morphology and properties of Brazilian curauá fibers. **Composites: Part A**, n. 37, p. p. 2227-2236, 2007.

ANEXOS

Tabela A 1- Tabela Tensão de ruptura

CP	Fibra(%)	NaOH (%)	Tempo (h)	Tensão (MPa)
1	5	2,5	5,0	78,97
2	15	2,5	5,0	112,59
3	5	10,0	5,0	94,00
4	15	10,0	5,0	131,75
5	5	2,5	2,5	27,46
6	15	2,5	2,5	65,58
7	5	10,0	2,5	45,27
8	15	10,0	2,5	73,80
9	5	5,0	2,5	48,38
10	15	5,0	2,5	85,87
11	5	7,5	2,5	65,23
12	15	7,5	2,5	74,43
13	5	7,5	5,0	53,81
14	15	7,5	5,0	80,64
15	5	5,0	5,0	36,31
16	15	5,0	5,0	68,71
17	5	2,5	10,0	37,47
18	15	2,5	10,0	67,00
19	5	5,0	10,0	48,97
20	15	5,0	10,0	103,62
21	5	7,5	10,0	58,07
22	15	7,5	10,0	93,70
23	5	10,0	10,0	37,87
24	15	10,0	10,0	108,19
25	5	0,0	0,0	49,35
26	10	0,0	0,0	67,10
27	15	0,0	0,0	90,38
28	20	0,0	0,0	138,99
29	0	0,0	0,0	25,41

Fonte: print screen minitab

Tabela A 2 - Tabela Módulo de Elasticidade

CP	Fibra (%)	NaOH (%)	Tempo (h)	Elasticidade (MPa)
1	5	2,5	5,0	3572,50
2	15	2,5	5,0	5028,50
3	5	10,0	5,0	4029,73
4	15	10,0	5,0	4128,20
5	5	2,5	2,5	3895,45
6	15	2,5	2,5	6094,20
7	5	10,0	2,5	951,80
8	15	10,0	2,5	5169,59
9	5	5,0	2,5	2123,78
10	15	5,0	2,5	1455,17
11	5	7,5	2,5	1149,23
12	15	7,5	2,5	1156,90
13	5	7,5	5,0	1112,42
14	15	7,5	5,0	1315,80
15	5	5,0	5,0	2529,13
16	15	5,0	5,0	1452,59
17	5	2,5	10,0	969,89
18	15	2,5	10,0	3588,54
19	5	5,0	10,0	2499,58
20	15	5,0	10,0	4841,93
21	5	7,5	10,0	1202,26
22	15	7,5	10,0	1526,27
23	5	10,0	10,0	2488,63
24	15	10,0	10,0	1373,73
25	5	0,0	0,0	3058,22
26	10	0,0	0,0	1865,47
27	15	0,0	0,0	4734,92
28	20	0,0	0,0	2275,23
29	0	0,0	0,0	3513,04

Fonte: Print screen minitab

Tabela A 3 - Tabela Alongamento

CP	Fibra (%)	NaOH (%)	Tempo (h)	Alongamento
1	5	2,5	5,0	3,71000
2	15	2,5	5,0	3,00000
3	5	10,0	5,0	4,26000
4	15	10,0	5,0	5,94000
5	5	2,5	2,5	2,80000
6	15	2,5	2,5	1,79000
7	5	10,0	2,5	4,83000
8	15	10,0	2,5	2,81000
9	5	5,0	2,5	7,34000
10	15	5,0	2,5	6,23000
11	5	7,5	2,5	5,83000
12	15	7,5	2,5	9,98000
13	5	7,5	5,0	4,86000
14	15	7,5	5,0	6,53000
15	5	5,0	5,0	4,79000
16	15	5,0	5,0	4,74000
17	5	2,5	10,0	3,86000
18	15	2,5	10,0	7,46000
19	5	5,0	10,0	4,54000
20	15	5,0	10,0	7,00000
21	5	7,5	10,0	4,83000
22	15	7,5	10,0	6,42000
23	5	10,0	10,0	4,86000
24	15	10,0	10,0	9,93000
25	5	0,0	0,0	4,24590
26	10	0,0	0,0	4,68017
27	15	0,0	0,0	6,12080
28	20	0,0	0,0	6,29000
29	0	0,0	0,0	1,26000

Fonte: Print screen minitab