**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO**
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS**
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**PEDRO HENRIQUE XAVIER DE MESQUITA**

# CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL EM DIFERENTES ORIENTAÇÕES COM AUXÍLIO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS.

MOSSORÓ – RN
2018

PEDRO HENRIQUE XAVIER DE MESQUITA

# CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL EM DIFERENTES ORIENTAÇÕES COM AUXÍLIO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes – UFERSA
Co-orientador: Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar - UFERSA

MOSSORÓ – RN
2018

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M578c Mesquita, Pedro Henrique Xavier de.
Caracterização mecânica de compósitos de matriz epóxi reforçado com fibras de sisal em diferentes orientações com auxílio da correlação digital de imagens / Pedro Henrique Xavier de Mesquita. - 2018.
120 f. : il.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes.
Co-orientador: Zoroastro Torres Vilar.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, 2018.

1. Compósitos. 2. Fibra de sisal. 3. Resina epóxi. 4. Propriedades mecânicas. 5. Correlação Digital de Imagens. I. Codes, Rodrigo Nogueira de, orient. II. Vilar, Zoroastro Torres , co-orient. III. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC´s) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PEDRO HENRIQUE XAVIER DE MESQUITA

# CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL EM DIFERENTES ORIENTAÇÕES COM AUXÍLIO DA CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes – UFERSA
Co-orientador: Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar - UFERSA

Defendida em: 01 / 03 / 2018.

**BANCA EXAMINADORA**

Rodrigo Nogueira de Codes, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente - Orientador

Zoroastro Torres Vilar, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador - Co-orientador

Fabrício José Nóbrega Cavalcante, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Enio Pontes de Deus, Prof. Dr. (UFC)
Membro Examinador Externo

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por sempre iluminar meu caminho, pelo dom da vida e pelo conforto nas horas difíceis.

Aos meus familiares pela construção das fundações que me sustentaram durante essa jornada.

A Luzia Amanda Fernandes Rodrigues por me acalmar e incentivar nos momentos mais complexos da pesquisa.

Aos professores e orientadores Prof. Dr. Rodrigo Nogueira de Codes e Prof. Dr. Zoroastro Torres Vilar pela inspiração para a realização deste trabalho, além de todo o apoio, esclarecimento e esforço.

A todos os colegas de Pós-Graduação do PPgCEM/UFERSA que direta ou indiretamente contribuíram para a realização dessa dissertação, em especial a Fernanda Monique da Silva.

Ao Instituto Federal do Rio Grande do Norte na figura de seus diretores, coordenadores, servidores e alunos. Essa tem sido minha segunda família nos últimos quatro anos.

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPgCEM) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) na figura de seus professores e coordenadores.

## RESUMO

Materiais compósitos são obtidos pela combinação de dois ou mais elementos, onde um deles é denominado matriz, que é contínuo e envolve o outro elemento, chamado de reforço. A grande vantagem da confecção compósitos é a possibilidade de obtenção de um novo material com propriedades que não são apresentadas pelos constituintes, sendo as propriedades dos compósitos dependentes das características de seus constituintes, da quantidade relativa de cada elemento, da distribuição e da interação entre as matérias-primas. O objetivo desse trabalho é avaliar a influência do tratamento químico nas propriedades mecânicas das fibras de sisal e em seus compósitos e a influência da orientação e concentração da fibra nas propriedades mecânicas dos compósitos. Os principais materiais utilizados nessa pesquisa foram a fibra de sisal obtida em seu estado bruto e a resina epóxi. Os compósitos foram fabricados através da técnica de laminação manual. Para o levantamento dos resultados, foram realizados ensaios de tração na fibra, na resina e nos compósitos e ensaios de flexão três pontos na resina e nos compósitos. Nessa pesquisa, os ensaios de tração foram auxiliados pela técnica da correlação digital de imagens, utilizada para retirar informações sobre a deformação dos corpos de prova. Foi observado que os tratamentos químicos de 2%, 5% e 8% de NaOH promovem um aumento na perda de massa das fibras, na sua densidade e nas suas propriedades mecânicas. O tratamento alcalino também promoveu uma melhoria nas propriedades mecânicas do compósito unidirecional. Os resultados também mostraram que, os compósitos unidirecionais apresentam ótimas propriedades quando testado no sentido da fibra [0] e propriedades reduzidas quando testado perpendicularmente à fibra [90]. Já o compósito orientado apresentou o mesmo resultado nas duas configurações testadas: [90,0,0,90] e [0,90,90,0]. Também foram testados três compósitos orientados utilizando três concentrações de fibras diferentes (10%, 20% e 30%), sendo observado um aumento nas propriedades mecânicas do material final à medida que foi aumentada a concentração de fibra.



**Palavras-chave**: Compósitos. Fibra de sisal. Resina epóxi. Propriedades mecânicas. Correlação Digital de Imagens.

## ABSTRACT

Composite materials are obtained by combining two or more elements, one so-called matrix, which is continuous and involves the other element, called reinforcement. The great advantage of composite confection is the possibility of obtaining a new material with properties that are not presented by the constituents. The properties of the composites depend on the characteristics of their constituents, on the relative quantity of each element, on the distribution and on the interaction between the constituent materials. The objective of this work is to evaluate the influence of chemical treatment on the mechanical properties of fiber and its composites and the influence of orientation and fiber concentration on the composites mechanical properties. The main materials used in this research were the sisal fiber obtained in its raw state and the epoxy resin. The composites were manufactured by the manual lamination technique. To obtain the results, tensile tests were performed on the fiber, resin and composites and Three-point flexural test were performed on the resin and composites. In this research, the tensile tests were aided by the digital image correlation technique, used to extract information about the deformation of the test specimens. It was observed that 2%, 5% and 8% NaOH chemical treatments promote an increase in weight loss, density and mechanical properties of the sisal fiber. The alkaline treatment also stimulated an improvement in the mechanical properties of the unidirectional composite. The results also showed that the unidirectional composites have excellent properties when tested in the fiber direction [0] and poor properties when tested orthogonally to the fiber [90]. On the other hand, the oriented composite presented the same tensile result in the two tested configurations: [90,0,0,90] and [0,90,90,0]. Oriented composites were also tested using three different fiber concentrations (10%, 20% and 30%), it was observed a growth in the final material mechanical properties as the fiber concentration was increased.



**Keywords:** Composites. Sisal fiber. Epoxy resin. Mechanical properties. Digital Image Correlation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Classificações dos compósitos de acordo com o tipo de reforço utilizado. ..... 19
Figura 02 – Planos de simetria/principais de um material ortotrópico. ..... 23
Figura 03 – Tração e cisalhamento em um composto de fibra contínua unidirecional. ..... 26
Figura 04 – Diagrama tensão-deformação de um compósito unidirecional tracionado. ..... 32
Figura 05 – Lâmina sofrendo tração de forma transversal à orientação das fibras. ..... 32
Figura 06 – Esboço de um laminado. ..... 34
Figura 07 – Anel Epóxi ..... 39
Figura 08 – Estrutura química de uma resina epóxi (DGEBA). ..... 40
Figura 09 – Esquema da estrutura celular de uma fibra de sisal. ..... 43
Figura 10 – Textura aplicada aos corpos de prova ..... 48
Figura 11 – Fluxograma da metodologia utilizada. ..... 51
Figura 12 – Fibra de sisal antes e depois da cardagem manual e corte ..... 52
Figura 13 – Planejamento experimental. ..... 55
Figura 14 – Planejamento fatorial $2^3$ central composto ..... 56
Figura 15 – Ensaio de tração nas fibras de sisal ..... 58
Figura 16 – Padrões de papel utilizados no ensaio de tração da fibra de sisal. ..... 58
Figura 17 – Molde de madeira e ferramentas utilizadas. ..... 60
Figura 18 – Sequência de empilhamento das camadas e orientação dos corpos de prova. ..... 61
Figura 19 – Montagem do ensaio de tração auxiliado pela correlação digital de imagens. ..... 63
Figura 20 – Montagem do ensaio de flexão. ..... 65
Figura 21 – Compósitos retirados para tração e flexão de acordo com as normas ..... 68
Figura 22 – Correlação digital de imagens para a resina. ..... 70
Figura 23 – Diagrama tensão x deformação para a resina epóxi. ..... 71
Figura 24 – Gráfico de Pareto para a perda de massa. ..... 74
Figura 25 – Superfície de resposta para a perda de massa (em tempo = 75 min). ..... 75
Figura 26 – Gráfico de Pareto para a densidade. ..... 76
Figura 27 – Superfície de resposta para a densidade (em tempo = 75 min). ..... 77
Figura 28 – Análise de variância dos dados de diâmetro das fibras de sisal submetidos a diferentes tratamentos. ..... 79
Figura 29 – Diâmetro das fibras. ..... 79

Figura 30 – Análise de variância dos dados de tensão máxima das fibras de sisal submetidos a diferentes tratamentos. ..... 80
Figura 31 – Análise de variância dos dados de módulo de elasticidade das fibras de sisal submetidos a diferentes tratamentos. ..... 81
Figura 32 – Influência do tratamento químico na deformação máxima das fibras de sisal. ..... 82
Figura 33 – Diagrama tensão x deformação para as fibras tratadas e não tratadas. ..... 83
Figura 34– Correlação digital de imagens para o compósito unidirecional [0]..... 84
Figura 35 – Influência do tratamento químico na tensão máxima dos compósitos unidirecionais [0]. ..... 85
Figura 36 – Resultados semelhantes para o aumento de tensão máxima provocada pelo tratamento químico. ..... 86
Figura 37 – Influência do tratamento químico no módulo de elasticidade dos compósitos unidirecionais [0]. ..... 87
Figura 38 – Resultados semelhantes para o aumento do módulo de elasticidade provocado pelo tratamento químico. ..... 88
Figura 39 – Influência do tratamento químico na deformação máxima dos compósitos [0]. ..... 89
Figura 40 – Diagrama tensão x deformação para os compósitos unidirecionais [0] tratados e não tratados. ..... 89
Figura 41 – Comparação entre as propriedades dos constituintes do compósito [0] sem tratamento. ..... 90
Figura 42 – Correlação digital de imagens para o compósito unidirecional [90]..... 92
Figura 43 – Correlação digital de imagens para o compósito orientado [0 90 90 0]..... 94
Figura 44 – Correlação digital de imagens para o compósito orientado [90 0 0 90]..... 96
Figura 45 – Comparação dos resultados de tensão máxima dos compósito – ensaio de tração. ..... 98
Figura 46 – Comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos compósitos para o ensaio de tração..... 98
Figura 47 – Resultado semelhante para a influência da orientação. ..... 99
Figura 48 – Diagrama tensão x deformação para os compósitos unidirecionais e orientados . ..... 100
Figura 49 – Comparação dos resultados de tensão máxima dos compósito – ensaio de flexão ..... 101
Figura 50 – Comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos compósitos para o ensaio de flexão. ..... 101

Figura 51 – Correlação digital de imagens para o compósito orientado com 10% de fibra... 103
Figura 52 – Correlação digital de imagens para o compósito orientado com 30% de fibra... 104
Figura 53 – Comparação dos resultados de tensão máxima dos compósitos [0 90 90 0] com diferentes concentrações de fibra. ..... 106
Figura 54 – Comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos compósitos [0 90 90 0] com diferentes concentrações de fibra..... 106
Figura 55 – Diagrama tensão x deformação para os compósitos orientados [0 90 90 0] com diferentes concentrações de fibra. ..... 107

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Materiais utilizados como matriz..... 19
Tabela 02 – Características apresentadas pelos compósitos poliméricos..... 21
Tabela 03 – Composição química de algumas fibras naturais. ..... 41
Tabela 04 – Propriedades mecânicas de fibras naturais. ..... 42
Tabela 05 – Propriedades da resina epóxi utilizada segundo o fabricante ..... 53
Tabela 06 – Planejamento fatorial $2^3$ central composto..... 56
Tabela 07 - Número total de corpos de prova utilizados no ensaio de tração dos compósitos. 62
Tabela 08 - Número total de corpos de prova utilizados no ensaio de flexão dos compósitos. 66
Tabela 09 – Densidade da resina epóxi curada..... 69
Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração para a resina epóxi curada. ..... 71
Tabela 11 – Resultados do ensaio de flexão para a resina epóxi curada. ..... 72
Tabela 12 – Perda de massa do sisal após tratamento químico. ..... 72
Tabela 13 – Influência do tratamento químico na densidade do sisal. ..... 73
Tabela 14 – Resultados da perda de massa segundo o planejamento fatorial $2^3$..... 74
Tabela 15 – Resultados para a densidade segundo o planejamento fatorial $2^3$. ..... 76
Tabela 16 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para as fibras. ..... 78
Tabela 17 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos unidirecionais [0]. ..... 85
Tabela 18 – Resultados do ensaio de flexão para os compósitos unidirecionais [0]..... 91
Tabela 19 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos unidirecionais [90]. ..... 93
Tabela 20 – Resultados do ensaio de flexão para os compósitos unidirecionais [90]..... 93
Tabela 21 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos orientados [0 90 90 0]. ..... 94
Tabela 22 – Resultados do ensaio de flexão para os compósitos orientados [0 90 90 0]..... 95
Tabela 23 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos orientados [90 0 0 90]. ..... 96
Tabela 24 – Resultados do ensaio de flexão para os compósitos orientados [90 0 0 90]..... 97
Tabela 25 – Influência da orientação nas propriedades de tração dos compósitos. ..... 97
Tabela 26 – Influência da orientação nas propriedades de flexão dos compósitos. ..... 100
Tabela 27 – Resultados do ensaio de tração para o compósito orientado [0 90 90 0] com 10% de fibra. ..... 103
Tabela 28 – Resultados do ensaio de tração para o compósito orientado [0 90 90 0] com 30% de fibra. ..... 104

Tabela 29 – Influência da concentração nas propriedades de tração do compósito orientado [0 90 90 0]. ..... 105
Tabela A1 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para fibras sem tratamento. ..... 118
Tabela A2 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para fibras tratadas com 2% de NaOH. ..... 118
Tabela A3 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para fibras tratadas com 5% de NaOH. ..... 119
Tabela A4 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para fibras tratadas com 8% de NaOH. ..... 119
Tabela A5 – Resultado dos ensaios nos compósitos unidirecionais [0] tratados e não tratados. ..... 120

**SUMÁRIO**


**1 INTRODUÇÃO ..... 13**
**2 OBJETIVOS ..... 17**
2.1 OBJETIVO GERAL ..... 17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 17
**3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 18**
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS ..... 18
3.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS ..... 20
3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO (FIBRAS LONGAS) ..... 22
**3.3.1 Análise macromecânica de uma lâmina ortotrópica ..... 22**
**3.3.2 Análise micromecânica de uma lâmina ortotrópica ..... 28**
**3.3.3 Análise macromecânica de um laminado ..... 33**
3.4 MATRIZ POLIMÉRICA ..... 37
**3.4.1 Resina epóxi ..... 38**
3.5 FIBRAS NATURAIS ..... 40
**3.5.1 Fibra de sisal ..... 42**
3.6 ADESÃO NA INTERFACE MATRIZ/ FIBRA ..... 44
**3.6.1 Tratamento alcalino das fibras ..... 45**
3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA ..... 46
**3.7.1 Ensaio de Tração ..... 46**
**3.7.2 Correlação digital de imagem (CDI) ..... 46**
**3.7.3 Ensaio de flexão três pontos ..... 49**
**4 MATERIAIS E MÉTODOS ..... 51**
4.1 MATERIAIS ..... 52
**4.1.1 Fibra de sisal ..... 52**
**4.1.2 Resina Epóxi ..... 52**
**4.1.3 Reagentes ..... 53**
4.2 MÉTODOS ..... 54
**4.2.1 Preparação das fibras de sisal ..... 54**
**4.2.2 Determinação da perda de massa e densidade da fibra de sisal ..... 54**
**4.2.3 Determinação do diâmetro da fibra de sisal ..... 57**
**4.2.4 Ensaio de tração na fibra ..... 57**
**4.2.5 Determinação da densidade da resina curada e dos compósitos ..... 59**

**4.2.6 Preparação dos compósitos ..... 59**
**4.2.7 Ensaio de tração nos compósitos e na resina curada ..... 61**
**4.2.8 Ensaio de flexão nos compósitos e na resina curada ..... 65**
**5 RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 67**
5.1 OBSERVAÇÕES SOBRE A PRODUÇÃO MANUAL DOS COMPÓSITOS ..... 67
5.2 CARACTERIZAÇÃO DA RESINA ..... 68
**5.2.1 Densidade da resina ..... 68**
**5.2.2 Ensaio de tração na resina ..... 69**
**5.2.3 Ensaio de flexão na resina ..... 71**
5.3 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO ..... 72
**5.3.1 Perda de massa e densidade da fibra de sisal ..... 72**
**5.3.2 Ensaio de tração das fibras ..... 78**
**5.3.3 Propriedades mecânicas do compósito unidirecional ..... 83**
5.4 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS ..... 90
**5.4.1 Propriedades mecânicas do compósito unidirecionais [0] ..... 91**
**5.4.2 Propriedades mecânicas do compósito unidirecionais [90] ..... 91**
**5.4.3 Propriedades mecânicas do compósito orientado [0 90 90 0] ..... 93**
**5.4.4 Propriedades mecânicas do compósito orientado [90 0 0 90] ..... 95**
**5.4.5 Comparação dos resultados ..... 97**
5.5 INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE FIBRA ..... 102
**5.5.1 Propriedades mecânicas do compósito orientado com 10% de fibra ..... 102**
**5.5.2 Propriedades mecânicas do compósito orientado com 30% de fibra ..... 103**
**5.5.3 Comparação dos resultados ..... 105**
**6 CONCLUSÕES ..... 109**
**7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ..... 111**
**8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 112**
**APÊNDICE ..... 118**

# 1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o meio ambiente tem aumentado a busca por materiais ecologicamente corretos, geralmente, oriundos de fontes renováveis e que causem pouco ou nenhum impacto ambiental. Dentre os muitos “materiais verdes” estudados atualmente, destacam-se os compósitos de matriz polimérica reforçados com fibras vegetais.

Materiais compósitos são obtidos pela combinação de dois ou mais componentes, onde um deles forma a matriz, que é contínua e envolve o outro elemento, chamado de reforço. Os compósitos são produzidos visando obter um material com características específicas e propriedades intermediárias àquelas apresentadas pelos elementos individualmente (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

Os materiais usados como reforço nos compósitos poliméricos provocam mudanças favoráveis nas suas propriedades mecânicas, como aumento da resistência à tração, dureza e resistência ao impacto (ALBANO *et al*., 2002). Compósitos de matriz polimérica, destinados a aplicações estruturais, utilizam como elemento de reforço a fibra de carbono, a fibra de vidro e a fibra aramida (MARINUCCI, 2011).

A substituição de fibras sintéticas por fibras vegetais, como reforço em compósitos poliméricos é algo que vem sendo amplamente estudado. Joseph e Varghese *et al*. (1996) estudaram as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos de diferentes matrizes reforçados com fibras curtas de sisal, avaliando a influência do comprimento da fibra e da fração volumétrica. Neste estudo foi compreendido que os diferentes tipos de matriz polimérica (polietileno, fenólica, poliéster e epóxi) apresentaram graus de afinidades diferentes com a fibra, e consequentemente a influência das fibras nas propriedades dos compósitos variaram significativamente.

Milanese (2008) propôs o desenvolvimento de compósitos de matriz poliméricas reforçados por fibras naturais e vidro para uso como material de reforço nas ligações de estruturas em madeira, observando um aumento significativo nas resistências à tração e flexão encontradas para todos os laminados produzidos. Mais especificamente, o laminado fenólica/vidro apresentou a maior resistência à tração, seguido pelos laminados poliuretano/vidro, fenólica/sisal e poliuretano /sisal, respectivamente.

Cerchiaro (2010) estudou a viabilidade da substituição de fibras de vidro por fibras de sisal, em compósitos com resinas poliéster termofixas, produzidos por moldagem manual. Concluindo que os compósitos de fibras naturais têm potencial para substituir o vidro em muitas

aplicações que não requerem capacidades de carga muito altas. Destaca-se que o reduzido custo da fibra de sisal comparado a outros reforços permite uma alta competitividade dentro do mercado consumidor.

Silva (2012) avaliou as propriedades mecânicas de um compósito híbrido de matriz polimérica (Resina Poliéster Ortoftálica), reforçado com tecidos bidirecionais de sisal e fibras de vidro E, em relação a um compósito polimérico reforçado apenas com mantas de fibras de vidro do tipo E. Neste estudo foi observado que o material compósito híbrido (HVS) possui uma boa resistência específica à tração, ficando próximo ao do laminado compósito de fibras de vidro (MV), mais detalhadamente os compósitos HVS apresentaram uma redução de 14,6% na resistência específica em relação as compósitos MV.

Holanda (2013) comparou as propriedades mecânicas de compósitos à base de resina epóxi reforçado com fibras de sisal alinhadas unidirecionalmente e com compósitos de mesma matriz utilizando fibras em sobreposição. Neste estudo foi observado que a configuração de sobreposição teve melhor módulo de elasticidade, apresentando aumento de 13,4% no módulo de elasticidade à tração e de 39,8% no módulo de elasticidade à flexão. Quanto a resistência máxima à tração o melhor resultado foi do compósito alinhado unidirecionalmente, que apresenta aumento de 26,5% em relação a configuração de sobreposição.

Martins neto (2016) utilizou mantas de sisal para obtenção de um compósito tendo como matriz uma resina poliéster ortoftálica. Em seu trambalho, as mantas de fibras de sisal utilizadas tinham, respectivamente, 5%, 10% e 15% da massa do compósito. O compósito foi obtido e caracterizado mecânica e termicamente para as formulações escolhidas. Os compósitos obtidos apresentaram resistência mecânica de tração e flexão inferiores à da matriz, sendo o compósito que apresentou melhores propriedades mecânicas nos ensaios realizados foi o com 15 % de fibras do sisal da massa do compósito. O resultado mais expressivo do compósito estudado deu-se para a absorção de energia de impacto, muito superior à da matriz utilizada. Outras propriedades de destaque foram a absorção em óleo e a densidade.

Dessa forma a principal motivação para esses estudos encontra-se nas características das fibras sintéticas, que, apesar de possuírem excelentes propriedades mecânicas e térmicas, possuem um custo elevado, são abrasivas aos equipamentos de processamento, têm alta densidade, não são biodegradáveis e apresentam difícil reciclagem (MOTHÉ; ARAUJO, 2004). Além de não possuírem nenhuma das características citadas anteriormente, as fibras naturais não passam por processos de síntese industrial, o que implica em uma economia de energia e na redução da emissão de gás $CO_2$ (MONTEIRO *et al*., 2012).

Impulsionado pela mesma motivação, este trabalho mostra o estudo da influência da variação da orientação e da concentração de fibras longas de sisal em compósitos de matriz epóxi, moldados pelo método de laminação manual, utilizando quatro camadas de fibras, visto que não existem estudos a respeito dessa influência.

No Brasil, existe uma grande variedade de fibras vegetais com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas como a fibra de sisal, côco, juta, rami, curauá, fibra de bagaço de cana de açúcar e soja, são exemplos de fibras nativas brasileiras (MARINELLI *et al*., 2008). O uso de sisal como reforço é particularmente interessante já que seus compósitos possuem elevada resistência ao impacto, à tração e à flexão quando comparados a compósitos reforçados por outras fibras vegetais (JOSEPH *et al*., 1999).

Dentre os diversos tipos de fibras vegetais existentes, esse trabalho propõem a utilização da fibra de sisal. Tal material, obtido das folhas da planta Agave sisalana, apresenta grande importância e atualmente corresponde a cerca de 50% do mercado mundial. No Brasil, cerca de um milhão de pessoas que vivem na região nordeste dependem dessa plantação (SATYANARAYANA *et al*., 2007).

A principal desvantagem na utilização de fibras naturais como reforço reside na falta de adesão fibra-matriz. Esse problema é intensificado quando se trabalha com fibras lignocelulósicas que são altamente hidrofílicas e matrizes poliméricas hidrofóbicas. Essa combinação de propriedades resulta no surgimento de um compósito com uma péssima adesão fibra-matriz (SUSHEEL KALIA, B.S. KAITH, 2007), prejudicando assim o comportamento mecânico do compósito. Felizmente esse problema pode ser resolvido através de tratamentos químicos. Joseph e Thomast *et al*. (1996), mostraram vários tratamentos químicos que podem ser utilizados para alterar as propriedades das fibras.

A crescente preocupação com questões ambientais, a evolução da utilização de fibras vegetais como reforço em compostos poliméricos, a inexistência de pesquisas envolvendo a avaliação de compósito poliméricos reforçados com fibras de sisal utilizando diferentes conjuntos de orientações, a grande disponibilidade da fibra de sisal no Nordeste e seu potencial para atuar como fonte de renda na zona rural, são justificativas para a execução desde trabalho.

Essa dissertação foi dividida em seis capítulos principais: ntrodução, Objetivos, Revisão Bibliográfica, Materiais e Métodos, Resultados e Discussões, Conclusões e Sugestões para trabalhos futuros. O Capítulo 1 contém uma introdução ao tema da pesquisa, o capítulo 2 apresenta os objetivos gerais e específicos do trabalho, o capítulo 3 apresenta a informação necessária a respeito dos constituintes utilizados no compósito e sua importância, abordando também o comportamento mecânico do material estudado. O Capítulo 4 detalha como foi

realizado o trabalho experimental, os materiais utilizados, como foi realizada a caracterização mecânica dos materiais e todos os procedimentos empregados. O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados da caracterização dos materiais estudados. O Capítulo 6 é dedicado às conclusões decorrentes das discussões realizadas. O capítulo 7 apresenta as sugestões para os trabalhos futuros.

# 2 OBJETIVOS

## 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral a confecção e a caracterização mecânica de compósitos poliméricos baseados em resina epóxi reforçada com fibras de sisal e moldados por laminação manual.

## 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Confeccionar e caracterizar os compósitos utilizando quatro camadas de fibras sisal com dois tipos de orientações diferentes, visando avaliar a influência da variação do direcionamento das fibras nas características mecânicas do compósito;

Confeccionar e caracterizar os compósitos utilizando diferentes frações volumétricas fibra/resina epóxi, buscando avaliar a influência da concentração de fibras sobre as características mecânicas dos compósitos;

Estudar as propriedades mecânicas da fibra de sisal, através de ensaio de tração, submetidas a tratamento químico com diferentes concentrações de hidróxido de sódio, visando avaliar a influência da variação da concentração NaOH sobre as características mecânicas da fibra;

Caracterizar as propriedades mecânicas da resina epóxi e do compósito com os ensaios de tração e flexão três pontos, auxiliados pela técnica da correlação digital de imagens.

# 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Um compósito pode ser entendido como um material oriundo da combinação macroscópica de pelo menos duas fases distintas. Através dessa combinação é possível obter propriedades especiais que nenhum de seus constituintes apresentam isoladamente (LEVY NETO e PARDINI, 2006). Os compósitos podem ser provenientes da interação de diferentes matérias, sendo que as possibilidades de combinação dependem das condições de processamento e da compatibilidade entre os componentes (VASCO, 2014).

A maioria dos materiais compósitos são formados pela união de apenas duas fases, uma chamada de matriz, que é continua e envolve o outro elemento, chamado de fase dispersa (ou reforço). Essas duas fases são quimicamente diferentes e são separados por uma interface distinta. É importante salientar que as propriedades dos compósitos estão diretamente associadas às propriedades dos elementos constituintes do material, tais como propriedades da fibra e da matriz, concentração volumétrica, interface e adesão fibra/matriz, disposição das camadas e orientação, bem como pela geometria do reforço (tal como forma e tamanho) (MARINUCCI, 2011).

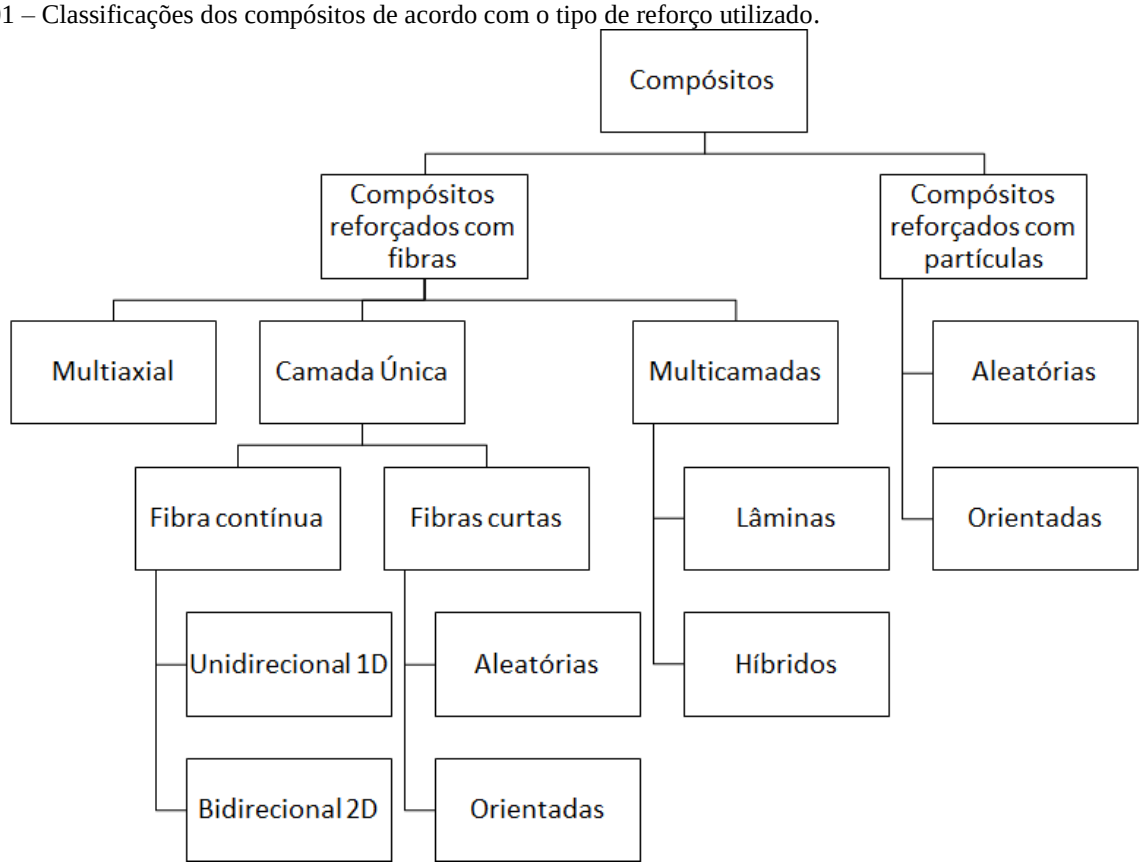
Os reforços em um compósito podem ser divididos em dois grandes grupos: fibras e partículas (LEVY NETO e PARDINI, 2006), que por sua vez podem assumir diferentes combinações. A Figura 01 mostra uma classificação dos compósitos de acordo com o tipo de reforço utilizado, enquanto que a Tabela 01 mostra vários materiais que podem ser utilizados como matriz.

Para fabricação de compósitos estruturais, as matrizes mais comumente utilizadas são as poliméricas termofixas, como as resinas epóxi, poliéster, fenólica e viniléster. Componentes que necessitam de grande escala de produção e requisitos de resistência inferiores utilizam, em geral, os polímeros termoplásticos. Para matrizes metálicas utiliza-se o alumínio, o níquel e o titânio, enquanto que, para matrizes cerâmicas, o carbeto de silício, o nitreto de silício e a alumina. (MARINUCCI, 2011).

Entre os materiais mostrado na Tabela 01 os polímeros termorrígidos (epóxis, poliésteres e ésteres vinílicos), são mais comumente utilizados como matrizes em compósitos reforçados com fibras contínuas ou longas, principalmente devido à sua baixa viscosidade que

facilita o processamento. (MALLICK, 2007). O foco dessa dissertação são os compósitos poliméricos laminados em multicamadas e reforçados com fibras, onde as camadas apresentam orientações previamente definidas.

Figura 01 – Classificações dos compósitos de acordo com o tipo de reforço utilizado.




Fonte: Retirado de Levy Neto e Pardini, 2006.

Tabela 01 – Materiais utilizados como matriz.

| **Tipos de matrizes** | **Exemplos** |
|---|---|
| Polímeros | Polímeros termorrígidos: Epóxis: utilizados principalmente em aplicações aeroespaciais e aeronáuticas. Poliésteres, ésteres vinílicos: comumente usados em aplicações automotivas, marítimas, químicas e elétricas. |
| | Polímeros termoplásticos: Nylons (tais como nylon 6 e nylon 6,6), poliésteres termoplásticos (tais como PET, PBT), policarbonato (PC). |
| Metais | Alumínio e suas ligas, ligas de titânio, ligas de magnésio, ligas à base de cobre, superligas à base de níquel, aço inoxidável. Adequados para aplicações de alta temperatura (faixa de temperatura: 300 ºC – 500 ºC) |
| Cerâmicas | Óxido de alumínio ($Al_2O_3$), carbono, carboneto de silício (SiC), nitreto de silício ($Si_3N_4$). Adequados para aplicações de alta temperatura |

Fonte: adaptado de MALLICK, 2007.

## 3.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Os compósitos de matriz polimérica têm encontrado um grande número de aplicações, graças as vantagens que os polímeros apresentam em relação aos demais materiais, como fácil processamento, baixo custo, alta produtividade e versatilidade. As aplicações variam desde as indústrias aeroespacial e automotiva, passando por aplicações militares e da construção civil. Esta diversidade de aplicações também se deve ao elevado número de combinações distintas entre um material de reforço e as matrizes poliméricas (HOLANDA, 2013).

Em compósitos reforçados com fibras o reforço tem geometria com alta razão comprimento/diâmetro, conhecida como coeficiente de forma. Geralmente, define-se fibras curtas como aquelas que apresentam coeficiente de forma menor que 100. (MARTINS NETO, 2016).

É importante notar que geralmente o reforço particulado atua mais como enchimento, com a finalidade de diminuir o custo de produção do compósito, sem provocar mudança significativa nas propriedades do material final. Por outro lado, a utilização do reforço fibroso normalmente promove aumento significativo da resistência mecânica e na rigidez das matrizes poliméricas (HOLANDA, 2013). A vantagem das partículas nos compósitos é o aumento de rigidez, apesar de não promover o aumento de resistência. Outro objetivo é a modificação das propriedades da matriz para atender necessidades como melhora das propriedades térmicas e elétricas, aumento da resistência a abrasão e garantir o desempenho do material a temperaturas elevadas (MARINUCCI, 2011).

Compósitos de fibras descontínuas (fibra picada) proporcionam a vantagem de oferecer resistência em praticamente todas as direções do laminado, sendo por isso, muitas vezes, denominados de quasi-isotrópicos. No entanto, apresentam resistência mecânica bem inferior aos compósitos que utilizam reforços contínuos. Nos compósitos com fibras longas, as camadas na peça ou no componente são distribuídas ao longo da estrutura segundo orientações pré-determinadas, constituindo o que se chama de lâminas, unidades básicas na formação de um componente, cuja estrutura global, obtida por um conjunto justaposto de lâminas de materiais e orientações selecionadas pelo projetista, é denominada laminado. (MARINUCCI, 2011).

Os compósitos reforçados com materiais fibrosos normalmente são preparados a partir de fibras de alto módulo de elasticidade e resistência mecânica, embutidas ou ligadas na matriz com interfaces distintas entre elas. Nesses materiais as fibras são os elementos que suportam as solicitações mecânicas, enquanto as matrizes mantêm as fibras na localização e na orientação

desejada, distribuindo a carga para as fibras e protegendo as mesmas de danos ambientais (HOLANDA, 2013).

Quando se trabalha com compósitos poliméricos reforçados com fibras, parâmetros como as características da fibra (resistência e módulo de elasticidade, diâmetro, comprimento, fração volumétrica e alinhamento), resistência e estabilidade química da matriz polimérica e a interação ou aderência existente entre a fibra e a matriz apresentam grande influência nas propriedades mecânicas do compósito (JOSEPH *et al*, 1996; SILVA, 2014). A Tabela 02 apresenta as principais características dos compósitos poliméricos.

Tabela 02 – Características apresentadas pelos compósitos poliméricos

| | |
|---|---|
| Resistência Química | Materiais com excepcional inércia química, permitindo sua utilização em ambientes agressivos quimicamente. |
| Durabilidade | Material de alta durabilidade em consequência de sua composição e das ligações poliméricas cruzadas formadas durante o processo de moldagem. |
| Resistência Mecânica | Apresentam excelente resistência mecânica devido a suas características e a variedade de combinações que podem ser realizadas entre as resinas e os materiais de reforço. |
| Resistência às Intempéries | Grande resistência aos problemas causados pelos ventos, a umidade, o sol e as mudanças térmicas. |
| Facilidade na Manutenção | Sujeitos a fáceis e simples técnicas de manutenção. |

Fonte: Retirado de MARTINS NETO, 2016.

Como citado anteriormente, o comprimento da fibra possui influência nas propriedades finais do compósito. Fibras longas são fáceis para orientar e processar, enquanto que fibras curtas não podem ser inteiramente controladas para a orientação apropriada. As fibras longas fornecem muitas vantagens sobre as fibras curtas, tais como resistência ao impacto e estabilidade dimensional (MILANESE, 2012).

A seguir, é apresentado de forma resumida os princípios matemáticos que regem o comportamento mecânico de compósitos reforçados com fibras longas.

## 3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO (FIBRAS LONGAS)

A mecânica dos materiais estuda as tensões e deformações em estruturas de engenharia sujeitas a cargas mecânicas e térmicas. Um pressuposto comum na mecânica de materiais convencionais, como aço e alumínio, é que as suas propriedades não dependem da localização (materiais homogêneos) e da orientação dos esforços (materiais isotrópicos). Os compósitos reforçados com fibras, por outro lado, são microscopicamente não-homogêneos e ortotrópicos. (MALLICK, 2007). Podemos definir uma lâmina como sendo uma camada fina de um material compósito que é geralmente de uma espessura da ordem de 0,125 mm. Já um laminado é construído através do empilhamento de um número predefinido de lâminas. (KAW, 2006).

O projeto e a análise de tais estruturas laminadas exigem o conhecimento das tensões e deformações que agem no laminado, porém, as lâminas são os blocos construtivos de um laminado, de modo que a compreensão da análise mecânica de uma lâmina é fundamental para a compreensão da análise mecânica de um laminado. (KAW, 2006).

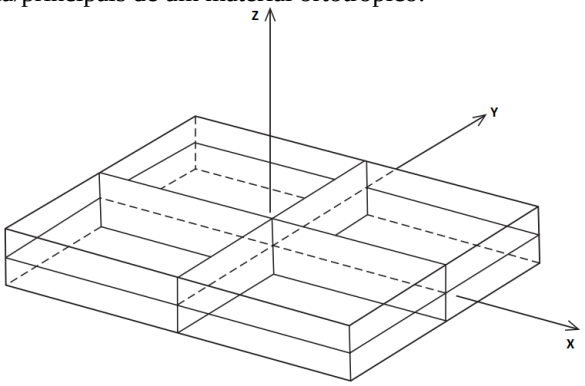
A mecânica de materiais compósitos reforçados com fibras é estudada em dois níveis: a micromecânica, no qual a interação dos materiais constituintes é examinada numa escala microscópica, e o nível macromecânico, no qual a resposta de um material compósito reforçado com fibras a cargas mecânicas e térmicas é examinada numa escala macroscópica. Nesse nível supõe-se que o material seja homogêneo. Equações de elasticidade ortotrópicas são usadas para calcular tensões e deflexões. As equações que descrevem as características elásticas e térmicas de uma lâmina são, em geral, baseadas em formulações micromecânicas. (MALLICK, 2007).

### 3.3.1 Análise macromecânica de uma lâmina ortotrópica

Em um material isotrópico, as propriedades são as mesmas em todas as direções. Assim, o material contém um número infinito de planos de simetria passando por um ponto (MALLICK, 2007), ou seja, a análise macromecânica desses materiais independe do sistema de coordenadas ortogonal utilizado (LEVY NETO e PARDINI, 2006). Os compósitos reforçados com fibras, em geral, contêm três planos ortogonais de simetria (os planos x-y, y-z e x-z mostrados na Figura 02), e são classificados como materiais ortotrópicos, ou seja, suas

propriedades são únicas e independentes nas três direções mutuamente perpendiculares. (MALLICK, 2007).

Figura 02 – Planos de simetria/principais de um material ortotrópico.




Fonte: Adaptado de MALLICK, 2007.

A diferença entre materiais isotrópicos e ortotrópicos pode ser evidenciada no comportamento mecânico desses materiais quanto submetidos a tensões normais: Em materiais isotrópicos esse tipo de esforço provoca alongamento na direção de aplicação e contrações nas duas direções transversais, independente de qual seja a direção da tensão normal. Um comportamento similar é observado em materiais ortotrópicos somente se as tensões normais forem aplicadas em uma das direções principais do material. (MALLICK, 2007).

As diferenças também estão presentes nas equações básicas que regem o comportamento elástico de cada material. Em materiais isotrópicos as relações entre tensão e deformação na região elástica podem ser descritas por três constates, conhecidas como: Módulo de elasticidade (E), módulo de cisalhamento (G) e coeficiente de Poisson ($\nu$) (MALLICK, 2007). Para um material isotrópico a relação deformação-tensão estabelecida pela lei de Hooke para um estado de tensão tridimensional pode ser expressa na forma matricial e em coordenadas cartesianas como mostrado na Equação 1 (KAW, 2006):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{v}{E} & -\frac{v}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{v}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v}{E} & -\frac{v}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix}}_{Matriz\ de\ flexibilidade} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \qquad (eq.1)$$

Invertendo a Equação 1 podemos obter a relação tensão-deformação, Equação 2, para um estado de tensão tridimensional:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{E(1-v)}{(1-2v)(1+v)} & \frac{vE}{(1-2v)(1+v)} & \frac{vE}{(1-2v)(1+v)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{vE}{(1-2v)(1+v)} & \frac{E(1-v)}{(1-2v)(1+v)} & \frac{vE}{(1-2v)(1+v)} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{vE}{(1-2v)(1+v)} & \frac{vE}{(1-2v)(1+v)} & \frac{E(1-v)}{(1-2v)(1+v)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix}}_{Matriz\ de\ rigidez} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \qquad (eq.2)$$

Nas Equações 1 e 2 temos as seguintes denominações de variáveis:

- $\varepsilon_i$ é a deformação normal na direção especificada;
- $\gamma_i$ é a distorção angular na direção especificada;
- $\sigma_i$ é a tensão normal na direção especificada;
- $\tau_i$ é a tensão de cisalhamento na direção especificada;

É importante lembrar que o módulo de cisalhamento (G) relaciona-se com o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson ($v$) através da Equação 3 (LEVY NETO e PARDINI, 2006):

$$G = \frac{E}{2(1+v)} \qquad (eq.3)$$

Para materiais ortotrópicos são necessárias nove constantes elásticas independentes para caracterizar o seu comportamento elástico. As nove constates são: $E_x$, $E_y$, $E_z$, $G_{xy}$, $G_{zx}$, $G_{yz}$, $\nu_{xy}$, $\nu_{xz}$ e $\nu_{yz}$ (MALLICK, 2007). Para um material ortotrópico a relação deformação-tensão estabelecida pela lei de Hooke para um estado de tensão tridimensional pode ser expressa na forma matricial e em coordenadas cartesianas como mostrado na Equação 4 (KAW, 2006):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{zx}}{E_Z} & -\frac{\nu_{zy}}{E_Z} & \frac{1}{E_Z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix}}_{Matriz\ de\ flexibilidade} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \qquad (eq.4)$$

Invertendo a Equação 4 podemos obter a relação tensão-deformação, Equações 5 e 6, para um estado de tensão tridimensional:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1-\nu_{yz}\nu_{zy}}{E_yE_z\Delta} & \frac{\nu_{yx}+\nu_{yz}\nu_{zx}}{E_yE_z\Delta} & \frac{\nu_{zx}+\nu_{yx}\nu_{zy}}{E_yE_z\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{yx}+\nu_{yz}\nu_{zx}}{E_yE_z\Delta} & \frac{1-\nu_{xz}\nu_{zx}}{E_xE_z\Delta} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{xy}\nu_{zx}}{E_xE_z\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{zx}+\nu_{yx}\nu_{zy}}{E_yE_z\Delta} & \frac{\nu_{zy}+\nu_{xy}\nu_{zx}}{E_xE_z\Delta} & \frac{1-\nu_{xy}\nu_{yx}}{E_xE_y\Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{yz} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{zx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix}}_{Matriz\ de\ rigidez} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \qquad (eq.5)$$

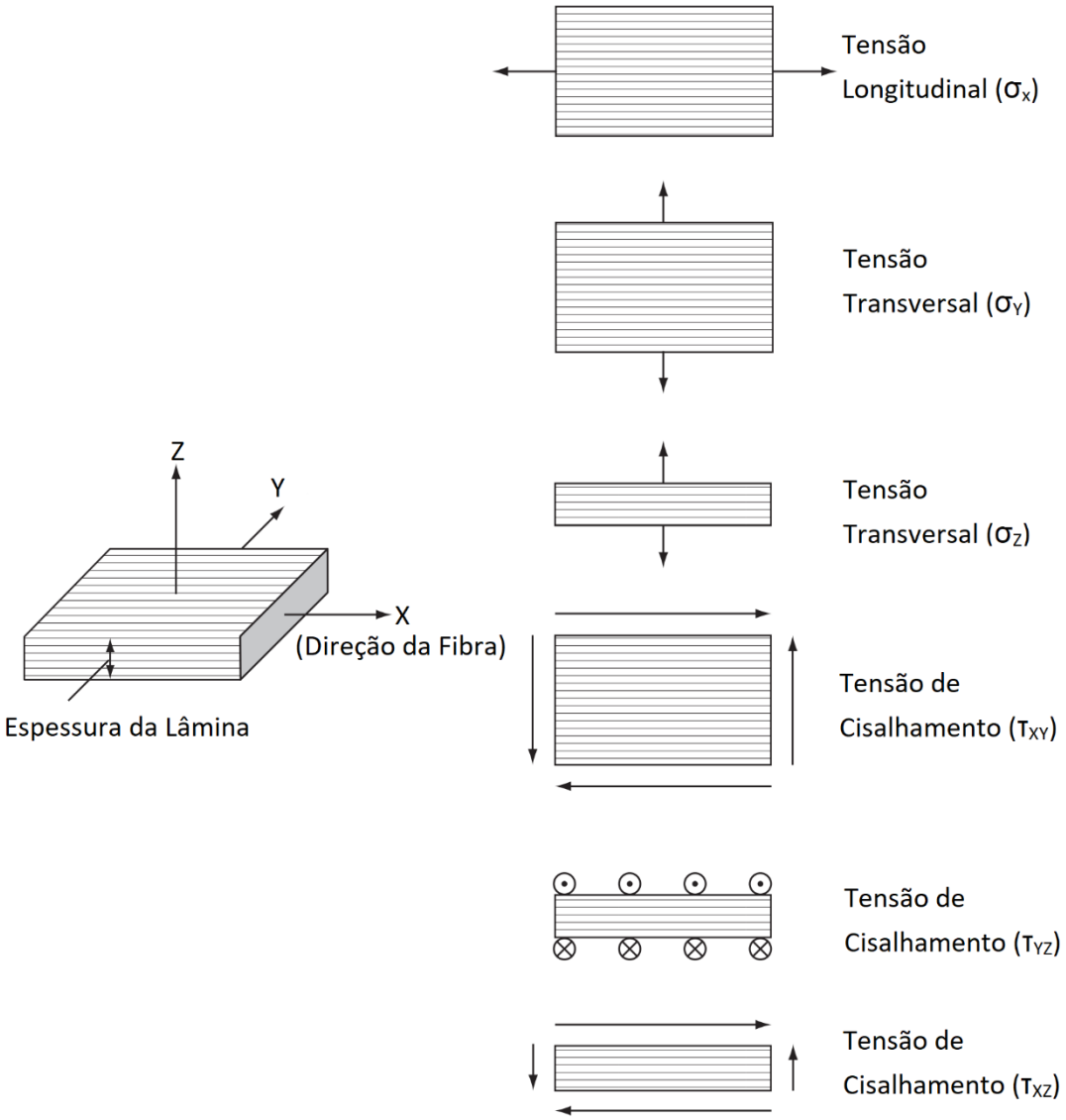
Onde

$$\Delta = \frac{1-\nu_{xy}\nu_{yx}-\nu_{yz}\nu_{zy}-\nu_{xz}\nu_{zx}-2\nu_{yx}\nu_{zy}\nu_{xz}}{E_xE_yE_z} \qquad (eq.6)$$

Lâminas com fibras orientadas em um único sentido são uma classe especial de materiais ortotrópicos. Como mostrado na Figura 03, onde as fibras estão orientadas na direção

x, as propriedades elásticas são iguais nas direções y e z, portanto $E_y = E_z$, $\nu_{xy} = \nu_{xz}$ e $G_{xy} = G_{xz}$. Além disso, $G_{yz}$ pode ser expresso em termos de $E_y$ e $\nu_{yz}$, como mostrado na Equação 7. Dessa forma, o número de constantes elásticas independentes para uma lâmina com fibras unidirecionais reduz-se a 5, são elas: $E_x$, $E_y$, $\nu_{xy}$, $\nu_{yz}$ e $G_{xy}$. Esses compósitos são frequentemente chamados de transversalmente isótropos (MALLICK, 2007).

Figura 03 – Tração e cisalhamento em um composto de fibra contínua unidirecional.




Fonte: Adaptado de MALLICK, 2007.

$$G_{yz} = \frac{E_y}{2(1 + \nu_{yz})} \qquad (eq.7)$$

Note que $v_{yx} \neq v_{xy}$ e $v_{zx} \neq v_{xz}$ e $v_{zx} \neq v_{yx}$. Porém, $v_{yx}$ e $v_{xy}$ estão relacionados pela Equação 8 e, portanto, $v_{yx}$ não é uma constante elástica independente. (MALLICK, 2007).

$$v_{yx} = \left(\frac{E_y}{E_x}\right) v_{xy} \qquad (eq.8)$$

O número de variáveis independentes pode ser diminuído se for assumido um estado de tensão plano. Essa análise 2D é um caso particular da análise 3D e pode ser empregada quando uma das dimensões do componente é desprezível em relação às outras duas (LEVY NETO e PARDINI, 2006). Se uma lâmina for fina (espessura bem menor que largura e comprimento) e não apresentar tensões fora do plano pode-se assumir um estado de tensão plano, onde $\sigma_z = 0$, $\tau_{yz} = 0$ e $\tau_{zx} = 0$. Nesse caso a relação deformação-tensão estabelecida pela lei de Hooke pode ser expressa na forma matricial e em coordenadas cartesianas como mostrado na Equação 9 (KAW, 2006):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{v_{xy}}{E_x} & 0 \\ -\frac{v_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \qquad (eq.9)$$

Invertendo a Equação 9 podemos obter a relação tensão-deformação, Equação 10, para um estado de tensão plano:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_x}{1 - v_{yx}v_{xy}} & \frac{v_{xy}E_y}{1 - v_{yx}v_{xy}} & 0 \\ \frac{v_{xy}E_y}{1 - v_{yx}v_{xy}} & \frac{E_y}{1 - v_{yx}v_{xy}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \qquad (eq.10)$$

A relação acima pode ser escrita na forma da Equação 11:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{21} = Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \qquad (eq.11)$$

A matriz [Q] da Equação 11 é chamada de matriz de rigidez reduzida.

### 3.3.2 Análise micromecânica de uma lâmina ortotrópica

A micromecânica é uma técnica de homogeneização que permite o cálculo das propriedades elásticas de um compósito através do conhecimento das propriedades elásticas dos seus constituintes, desde que as frações volumétricas dos mesmos sejam conhecidas (LEVY NETO e PARDINI, 2006). A seguir são apresentadas algumas definições básicas necessárias para o modelamento das propriedades de uma lâmina unidirecional.

#### 3.3.2.1 Fração volumétrica

O volume total de uma lâmina de compósito se divide em três componentes: O volume de fibras ($v_f$), o volume de matriz ($v_m$) e o volume de vazios ($v_v$). Onde o último corresponde ao volume de bolhas de ar e de gases que emanam da resina durante a cura. Assim o volume total ($v_t$) é dado pela Equação 12 (LEVY NETO e PARDINI, 2006):

$$v_t = v_f + v_m + v_v \qquad (eq.12)$$

Dessa forma, pode-se definir as frações volumétricas de fibras ($V_f$) de matriz ($V_m$) e de vazios ($V_v$), respectivamente, como mostrado na Equação 13:

$$V_f = \frac{v_f}{v_t}\ ; V_m = \frac{v_m}{v_t};\ V_v = \frac{v_v}{v_t} \qquad (eq.13)$$

Quando se deseja fazer estimativas rápidas, e sabendo por experiências anteriores que a fração volumétrica de vazios é muito pequena (em compósitos estruturais de boa qualidade essa fração deve ser inferior a 1 %) ela pode ser desprezada (LEVY NETO e PARDINI, 2006). Dessa forma a Equação 11 pode ser reduzida para a Equação 14:

$$v_t = v_f + v_m \qquad (eq.14)$$

3.3.2.2 Fração mássica e densidade

Na análise micromecânica, as propriedades elásticas são estimadas em função das frações volumétricas dos constituintes, entretanto, o que se mede diretamente nos laboratórios são as massas dos componentes. Com essa informação em mãos pode-se obter o volume dos mesmos. Para finalidades práticas podemos assumir que a massa total de uma lâmina ($m_t$) é dada pela soma da massa de fibra ($m_f$) e de matriz ($m_m$) (LEVY NETO e PARDINI, 2006), como mostrado na Equação 15:

$$m_t = m_f + m_m \qquad (eq.15)$$

As frações mássicas de fibras ($M_f$) e da matriz ($M_m$) são obtidas respectivamente pelas relações mostradas na Equação 16:

$$M_f = \frac{m_f}{m_t} \; ; V_m = \frac{m_m}{m_t} \qquad (eq.16)$$

A densidade teórica do composto ($\rho_c$) em termos de frações de massa pode ser encontrada como mostrado na Equação 17 (KAW, 2006):

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m} \qquad (eq.17)$$

Onde $\rho_f$ é a densidade da fibra e $\rho_m$ é densidade da matriz.

#### 3.3.2.3 Volume de vazios

Vazios podem surgir em um compósito durante a sua fabricação, isso faz com que a densidade teórica do composto seja maior do que a densidade real, além disso, a presença de vazios em um composto é prejudicial às suas propriedades mecânicas. (KAW, 2006). O volume de vazios ($v_v$) pode ser calculado através da Equação 18 (KAW, 2006):

$$v_v = \frac{m_c}{\rho_{ce}}\left(\frac{\rho_c - \rho_{ce}}{\rho_c}\right) \qquad (eq.18)$$

Onde $m_c$ é a massa do compósito e $\rho_{ce}$ é a densidade real ou experimental.

#### 3.3.2.4 Determinação dos módulos elásticos e tensões máximas de uma lâmina

Existem quatro módulos de elasticidade que podem ser determinados para uma lâmina unidirecional: módulo de elasticidade longitudinal ($E_1$), módulo de elasticidade transversal ($E_2$), coeficiente de Poisson ($v_{12}$) e o Módulo de cisalhamento no plano ($G_{12}$). Também podem ser determinados cinco parâmetros de tensão máxima para uma lâmina unidirecional: Tração máxima longitudinal $(\sigma_1^T)_{ult}$; compressão máxima longitudinal $(\sigma_1^C)_{ult}$; tração máxima transversal $(\sigma_2^T)_{ult}$; compressão máxima transversal $(\sigma_2^C)_{ult}$; tensão de cisalhamento máxima no plano $(\tau_{12})_{ult}$. (Kaw, 2006).

A seguir é mostrado as equações deduzidas através da abordagem da força dos materiais, mostrado em Kaw, 2006. Nessa abordagem são estabelecidas algumas hipóteses simplificadoras:

- A união entre fibras e matriz é perfeita;
- Os módulos de elasticidade, diâmetros e espaços entre as fibras são uniformes;
- As fibras são contínuas e paralelas;
- A fibra e a matriz respeitam a lei de Hooke da elasticidade;
- As fibras possuem força uniforme;
- Os compósitos não possuem vazios;

- A Fibra e matriz apresentam comportamento isotrópicos e são homogêneos;
- A deformação máxima para a matriz é maior do que para a fibra (caso dos compósitos de matriz polimérica);
- Não existem tensões residuais.

Através dessas hipóteses a abordagem da força dos materiais propõem que o módulo de elasticidade longitudinal ($E_x$) é dado pela Equação 19 (KAW, 2006):

$$E_x = E_f V_f + E_m V_m \qquad (eq.19)$$

Onde $E_f$ é o módulo de elasticidade da fibra e $E_m$ é o módulo de elasticidade da matriz. A equação 18 é conhecida também como regra das misturas (KAW, 2006). A mesma abordagem prevê que o módulo de elasticidade transversal ($E_y$) pode ser calculado através da Equação 20:

$$\frac{1}{E_y} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \qquad (eq.20)$$

E que o coeficiente de Poisson ($v_{xy}$) pode ser encontrado através da Equação 21:

$$v_{xy} = v_f V_f + v_m V_m \qquad (eq.21)$$

Conforme abordagem da força dos materiais, mostrado na Figura 04, as fibras suportam a maior parte da carga em um compósito de matriz polimérica, portanto assume-se que quando as fibras falham o compósito inteiro falha. Dessa forma a tensão máxima longitudinal de um compósito é dada pela Equação 22 (KAW, 2006):

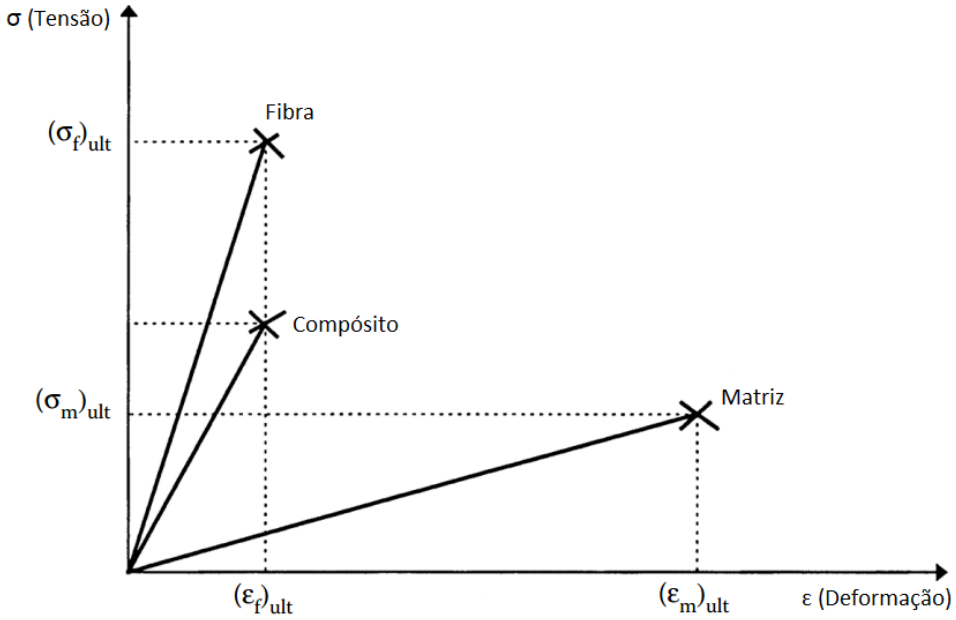
$$(\sigma_x^T)_{ult} = (\sigma_f)_{ult} V_f + (\varepsilon_f)_{ult} E_m (1 - V_f) \qquad (eq.22)$$

Onde $(\sigma_f)_{ult}$ é a tensão máxima suportada pela fibra e $(\varepsilon_f)_{ult}$ é a deformação máxima da fibra. Seguindo a mesma abordagem e assumindo que a falha de uma lâmina tracionada transversalmente à orientação das fibras é devida à ruptura da matriz, nessas condições a deformação máxima é dada pela Equação 23 (KAW, 2006):

$$\left(\varepsilon_y^T\right)_{ult} = \left[\frac{d}{s}\frac{E_m}{E_f} + \left(1 - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{s}}\right)\right]\left(\varepsilon_m^T\right)_{ult} \qquad (eq.23)$$

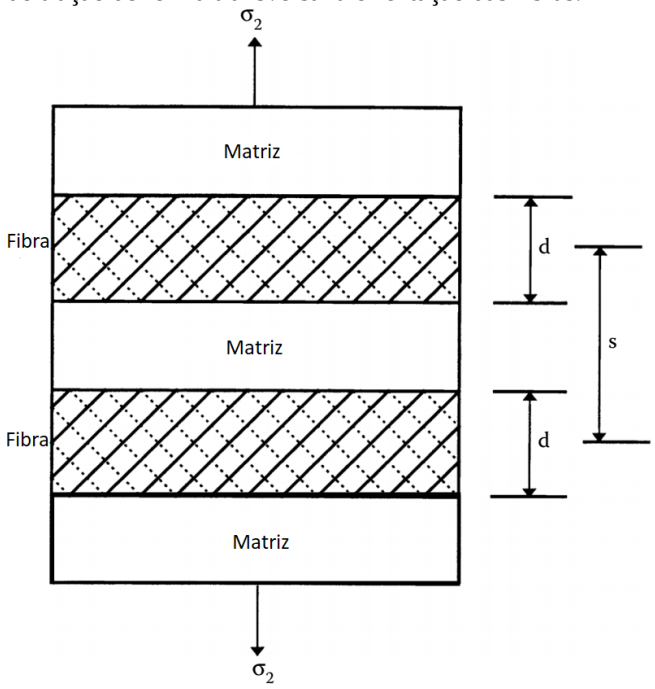
Onde $\left(\varepsilon_m^T\right)_{ult}$ é a deformação máxima da matriz, d é o diâmetro das fibras e s é a distância entre os centros da fibra, conforme mostra a Figura 05.

Figura 04 – Diagrama tensão-deformação de um compósito unidirecional tracionado.




Fonte: Adaptado de KAW, 2006.

Figura 05 – Lâmina sofrendo tração de forma transversal à orientação das fibras.




Fonte: Adaptado de KAW, 2006.

Dessa forma a tensão máxima transversal de um compósito é dada pela Equação 24 (KAW, 2006):

$$\left(\sigma_y^T\right)_{ult} = E_y\left(\varepsilon_y^T\right)_{ult} \qquad (eq.24)$$

### 3.3.3 Análise macromecânica de um laminado

Um laminado é construído através do empilhando de um determinado número de lâminas na direção da espessura. Exemplos de alguns tipos especiais de laminados e o código de laminação padrão são mostrados a seguir: (MALLICK, 2007).

- Laminado Angle-ply que apresenta os ângulos de orientação das fibras em camadas alternativas dispostos da seguinte forma: $/\theta/-\theta/\theta/-\theta \; com \; \theta \neq 0 \; ou \; 90º$
- Laminado cross-ply que apresenta as fibras dispostas segundo a sequência $/0º/90º/0º/90º$ .
- Laminado simétrico que apresenta uma orientação simétrica em relação à linha central do laminado, ou seja, para cada camada acima do plano médio, existe uma camada idêntica a uma distância igual abaixo do plano médio.

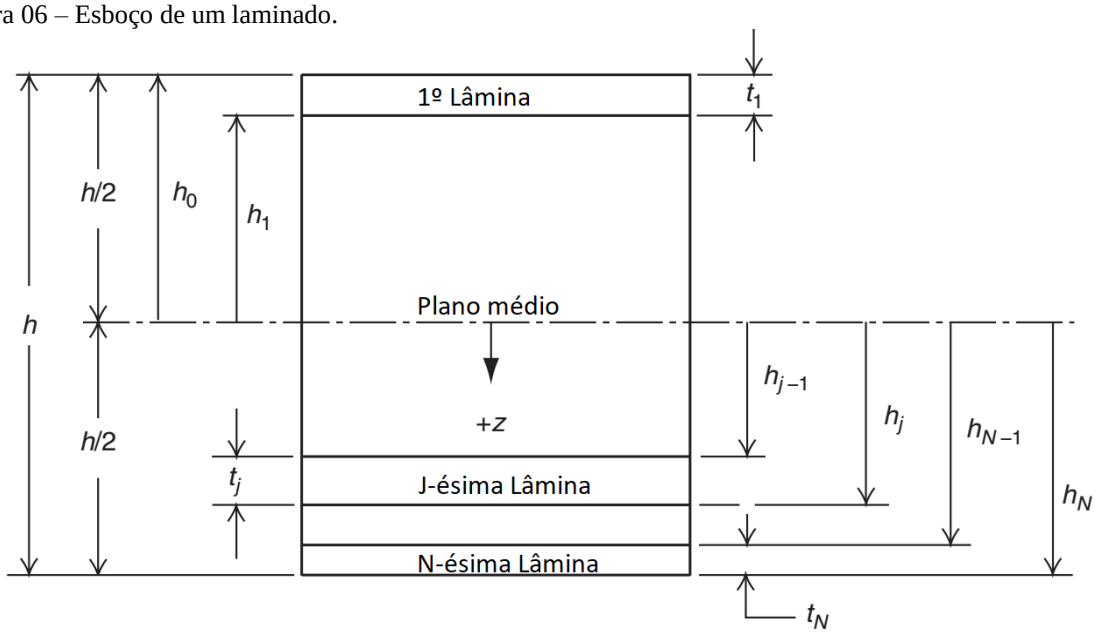
Na análise macromecânica de um laminado alguns pressupostos básicos são utilizados (MALLICK, 2007):

1. Laminado é fino e largo (espessura da largura).
2. Existe uma ligação perfeita entre várias laminas.
3. A distribuição da deformação na direção da espessura é linear.
4. Todas as laminas são macroscopicamente homogêneas e se comportam de forma linear elástica.

Um esboço de um laminado é mostrado na Figura 06. O plano médio do laminado contém os eixos xy, e o eixo z define a direção da espessura. A espessura total do laminado é

h, e a espessura de várias laminas é representada por $t_1$, $t_2$, $t_3$ e assim por diante. O número total de laminas é N.

Figura 06 – Esboço de um laminado.




Fonte: Adaptado de MALLICK, 2007.

Seguindo as hipóteses acima, as deformações das lâminas estão linearmente relacionadas com a distância ao plano médio através da Equação 25 (MALLICK, 2007):

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {\varepsilon_x}^0 \\ {\varepsilon_y}^0 \\ {\gamma_{xy}}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \qquad (eq.25)$$

Onde:

${\varepsilon_x}^0$ e ${\varepsilon_y}^0$ = Deformação normal do plano médio no laminado;

${\gamma_{xy}}^0$ = Deformação angular do plano médio no laminado;

$k_x$ e $k_y$ = Curvaturas de flexão do laminado;

$k_{xy}$ = Curvatura de torção do laminado;

z = Distância do plano médio na direção da espessura.

Podemos encontrar a tensão para um laminado através da Equação 26:

$$\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \tau_{xy}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & Q_{16}\\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26}\\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}{\varepsilon_x}^0\\ {\varepsilon_y}^0\\ {\gamma_{xy}}^0\end{bmatrix}+z\begin{bmatrix}Q_{11} & Q_{12} & Q_{16}\\ Q_{12} & Q_{22} & Q_{26}\\ Q_{16} & Q_{26} & Q_{66}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}k_x\\ k_y\\ k_{xy}\end{bmatrix} \qquad (eq.26)$$

A força aplicada e o momento resultante em um laminado estão relacionados às tensões e curvaturas do meio plano pelas Equações 27, 28, 29, 30 e 31 (MALLICK, 2007):

$$\begin{bmatrix}N_x\\ N_y\\ N_{xy}\end{bmatrix}=[A]\begin{bmatrix}{\varepsilon_x}^0\\ {\varepsilon_y}^0\\ {\gamma_{xy}}^0\end{bmatrix}+[B]\begin{bmatrix}k_x\\ k_y\\ k_{xy}\end{bmatrix} \qquad (eq.27)$$

e

$$\begin{bmatrix}M_x\\ M_y\\ M_{xy}\end{bmatrix}=[B]\begin{bmatrix}{\varepsilon_x}^0\\ {\varepsilon_y}^0\\ {\gamma_{xy}}^0\end{bmatrix}+[D]\begin{bmatrix}k_x\\ k_y\\ k_{xy}\end{bmatrix} \qquad (eq.28)$$

Onde;

$N_x$ = Força normal resultante na direção x (por unidade de largura);

$N_y$ = Força normal resultante na direção y (por unidade de largura);

$N_{xy}$ = Força de cisalhamento resultante (por unidade de largura);

$M_x$ = Momento de flexão resultante no plano yz (por unidade de largura);

$M_y$ = Momento de flexão resultante no plano xz (por unidade de largura);

$M_{xy}$ = Momento de torção resultante (por unidade de largura)

[A] = Matriz de rigidez extensional para o laminado (unidade: N/m).

$$[A]=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12} & A_{16}\\ A_{12} & A_{22} & A_{26}\\ A_{16} & A_{26} & A_{66}\end{bmatrix} \qquad (eq.29)$$

[B] Matriz de rigidez do acoplamento para o laminado (unidade: N/m).

$$[B] = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \qquad (eq.30)$$

[D] Matriz de rigidez de curvatura para o laminado (unidade: N/m).

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \qquad (eq.31)$$

Os elementos nas matrizes [A], [B] e [D] são calculados a partir das Equações 32, 33 e 34 respectivamente (MALLICK, 2007):

$$A_{mn} = \sum_{j=1}^{N} (\bar{Q}_{mn})_j (h_j - h_{j-1}) \qquad (eq.32)$$

$$B_{mn} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{N} (\bar{Q}_{mn})_j ({h^2}_j - {h^2}_{j-1}) \qquad (eq.33)$$

$$D_{mn} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{N} (\bar{Q}_{mn})_j ({h^3}_j - {h^3}_{j-1}) \qquad (eq.34)$$

Onde;

N = Número total de laminas no laminado;

$(\bar{Q}_{mn})_j$ = elementos na matriz [Q] da lâmina número j;

$h_{j-1}$= Distância do plano médio para o topo da lâmina número j;

$h_j$ = Distância do plano médio ao fundo da lâmina número j.

Para laminados simétricos que utilizam apenas fibras nas direções transversais e longitudinais (laminamos simétricos) pode-se provar as relações mostradas nas Equações 35 e 36 (KAW, 2006):

$$[A] = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & 0 \\ A_{12} & A_{22} = A_{11} & 0 \\ 0 & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \qquad (eq.35)$$

$$[B] = 0 \qquad (eq.36)$$

As propriedades elásticas para esse tipo de laminado podem ser calculadas através das Equações 37, 38 e 39:

$$E_x = E_y = \frac{A_{11}^2 - A_{12}^2}{hA_{11}} \qquad (eq.37)$$

$$v_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{11}} \qquad (eq.38)$$

$$G_{xy} = \frac{A_{11} - A_{12}}{2h} \qquad (eq.39)$$

## 3.4 MATRIZ POLIMÉRICA

A escolha da matriz a ser empregada depende da aplicação final do compósito. Para utilização do material em baixas temperaturas, até 200°C, são usadas geralmente as resinas poliméricas, enquanto que as matrizes metálicas são recomendadas em aplicações em que se requer temperaturas de até 800°C. Compósitos de matriz cerâmica podem ser utilizados em temperaturas superiores a 1000°C. (MARINUCCI, 2011).

Polímeros são macromoléculas caracterizadas por seu tamanho, estrutura química e interações intra e intermoleculares. São constituídos por unidades estruturais repetitivas (denominadas meros), unidas entre si por ligações covalentes. O processo pelo qual os

monômeros são ligados uns aos outros para gerar cadeias compostas por unidades repetidas (polímero) é conhecido como polimerização (MANO e MENDES, 1999).

Os polímeros podem ser classificados de acordo com as características de fusibilidade e/ou solubilidade, em termoplásticos e termorrígidos. Os termoplásticos são aqueles que fundem por aquecimento e solidificam por resfriamento, de modo reversível, podendo ser moldados por diversas vezes. Esses polímeros também podem ser dissolvidos em solventes adequados. Os polímeros termorrígidos assumem estrutura reticulada tridimensional, com ligações cruzadas, portanto após a cura esses materiais tornam-se infusíveis (MANO e MENDES, 1999).

Os polímeros termorrígidos são mais utilizados para uso estrutural em materiais compósitos por apresentarem algumas vantagens em relação aos termoplásticos, tais como estabilidade térmica, elevada rigidez, alta estabilidade dimensional, boas propriedades de isolamento térmico e elétrico, resistência à fluência e deformação sob carregamento. Esses materiais podem também ser misturados fisicamente com fibras em método de processamento bastante simples (MARTINS NETO, 2016).

Polímeros termofixos ou termorrígidos, na sua maioria, são líquidos à temperatura abaixo de 50°C, o que propícia a vantagem de serem processados quando ainda líquidos, na temperatura ambiente. Necessitam de baixo investimento nos meios de produção por dispensar equipamentos como injetoras e extrusoras. A solidificação é obtida pela adição de agentes de cura ao polímero, podendo ocorrer também pela ação de temperatura.Exemplo de polímeros termofixos são as resinas epóxi, poliéster insaturado, viniléster e fenólica. (MARINUCCI, 2011).

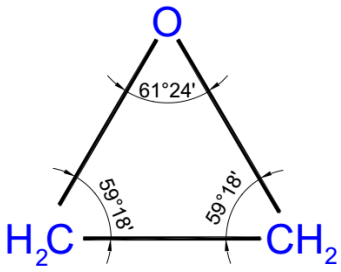
Polímeros termofixos apresentam propriedades mecânicas e elásticas superiores aos ter-plásticos e exibem uma ótima estabilidade dimensional, além de possuírem excelente resistência ao ataque de produtos químicos. Uma grande desvantagem, se comparado aos materiais metálicos, é a sua baixa temperatura de utilização, na faixa de 150°C, assim como não ser um material reprocessável. (MARINUCCI, 2011).

### 3.4.1 Resina epóxi

As resinas epóxi são definidas como polímeros termorrígidos de alto desempenho caracterizados pela presença de pelo menos dois grupos epóxi terminais (grupos oxirano ou

etoxilina) por molécula (LEVY NETO e PARDINI, 2006). O anel epóxi é formado por dois átomos de carbono ligados a um átomo de oxigênio por meio de uma ligação covalente simples. A Figura 07 mostra a estrutura química de um anel epóxi.

Figura 07 – Anel Epóxi




Fonte: Retirado de GONÇALVES, 2015.

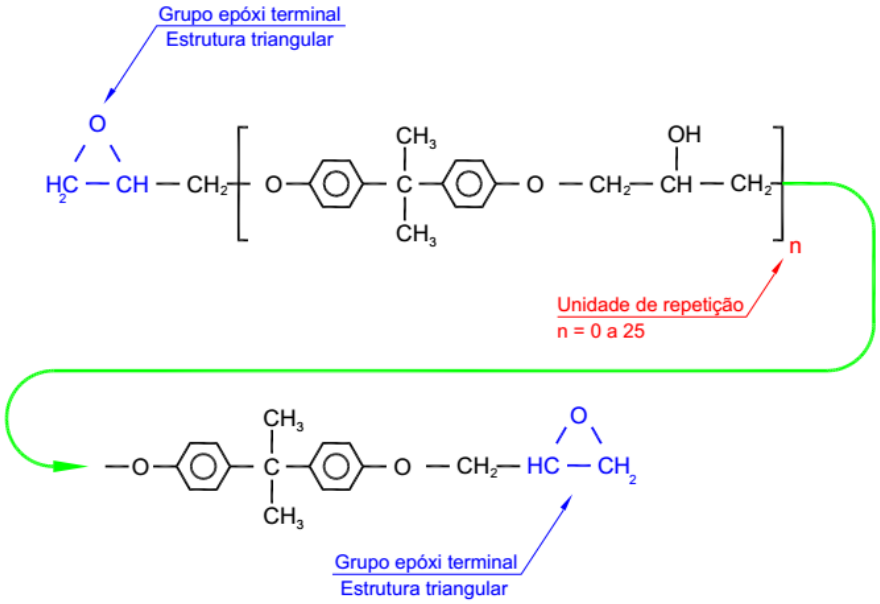
A resinas epóxi apresentam algumas características como: baixa viscosidade, alta velocidade de cura, baixa contração durante a cura, alto poder adesivo e aderência, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência química e térmica (RODRIGUES, 1991).

As resinas epóxis mais utilizadas têm como base o diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA) e são sintetizados a partir de uma reação entre a epicloidrina e o bisfenol-A. (LEVY NETO e PARDINI, 2006). Na Figura 08 é mostrada a estrutura básica do DGEBA. As características finais dessas resinas podem ser controladas pela quantidade de bisfenol-A usado (características como tenacidade, rigidez, e resistência a altas temperaturas) pelas ligações químicas feitas pelo éter (resistência química) e pelos grupos hidroxila e epóxi presentes (propriedades adesivas e reatividade com diversos agentes químicos de cura) (KERSTING, 2004).

Para que ocorra a polimerização da resina epóxi é necessário adicionar um agente de cura. O tipo de agente de cura utilizado afeta o tipo de reação de polimerização que ocorre, influencia a cinética da cura, o tempo de processamento e de gel e as propriedades finais do material curado (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

Os endurecedores comumente usados para converter epóxis em resinas termofixas incluem anidridos e aminas, entre outros reagentes (KERSTING, 2004). Para facilitar o processamento e modificar as propriedades das resinas curadas, outros agentes podem ser incluídos na sua composição, como cargas, solventes, diluentes, plastificantes e aceleradores (RODRIGUES, 1991).

Figura 08 – Estrutura química de uma resina epóxi (DGEBA).




Fonte: Retirado de GONÇALVES, 2015.

Entre as principais aplicações da resina epóxi podemos citar: fabricação de tintas, para diversos fins, adesivos para metal, cerâmica e vidro; produção de moldes e matrizes para ferramentas industriais; fabricação de compósitos com fibra de vidro, de carbono ou de poliamida aromática, para indústria aeronáutica; manufatura de componentes de equipamentos elétricos e circuitos impressos e encapsulamento de componentes eletrônicos (MANO; MENDES, 1999).

## 3.5 FIBRAS NATURAIS

Nos últimos anos, um grande interesse mundial tem surgido pelo desenvolvimento de novas tecnologias que possibilitem a utilização de produtos com menor impacto ambiental. Neste contexto, os materiais plásticos sintéticos têm recebido atenção devido a sua não-biodegradabilidade e a dificuldade de reciclagem. Em busca de uma solução para esse problema, várias pesquisas e trabalhos na área de compósitos poliméricos buscam a aplicação de reforços naturais, principalmente quanto à utilização de fibras naturais. (MARINELLI *et al*., 2008).

As fibras naturais podem ser classificadas quanto a sua origem em: fibras animais, vegetais e minerais. Destaque deve ser dado à utilização de fibras naturais de origem vegetal,

em razão da enorme variedade de plantas disponíveis na biodiversidade (MARINELLI *et al*., 2008).

As fibras vegetais podem ser classificadas de acordo com a sua origem em: folhas (curauá, palmeira, abacaxi, sisal, banana) semente (algodão), casca (linho, juta) frutas (coco, ceiba pentandra), capim (alfa, bagaço, bambu) e haste (palha). As fibras duras (folhas e casca) são os mais comumente usados em compósitos (KALIA, S.; KAITH, B.S; KAUR, 2009).

As fibras vegetais possuem natureza lignocelulósica e, portanto, possuem como principais constituintes a celulose, hemicelulose e lignina. A quantidade de celulose nesses materiais pode variar dependendo da espécie e da idade da planta. A celulose é um polímero de natureza hidrofílico, portanto, todas as fibras vegetais também são de natureza hidrofílica (MOHANTY *et al*., 2000). Além destes componentes, são encontrados compostos inorgânicos e moléculas extraíveis com solventes orgânicos, como pectinas, carboidratos simples, terpenos, alcaloides, saponinas, polifenólicos, gomas, resinas, gorduras e graxas, entre outros (SILVA *et al*., 2009). A Tabela 03 apresenta valores médios de constituintes químicos de algumas das fibras vegetais. Enquanto que a Tabela 04 apresenta alguns valores de propriedades mecânicas de fibras naturais e fibras convencionalmente utilizadas como reforço em materiais compósitos.

As fibras vegetais podem ser consideradas como compósitos de fibrilas de celulose mantidas coesas por uma matriz constituída de lignina e hemicelulose, cuja função é agir como barreira natural à degradação microbiana e servir como proteção mecânica. As características estruturais da fibra vegetal estão relacionadas à natureza da celulose e à sua cristalinidade (SILVA *et al*., 2009).

Tabela 03 – Composição química de algumas fibras naturais.

| Fonte da fibra | Composição (%) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Celulose | Hemicelulose | Lignina | Extrato |
| Madeira de Lei | 43-47 | 25-35 | 16-24 | 2-8 |
| Madeira conífera | 40-44 | 25-29 | 25-31 | 1-5 |
| Fibra de coco | 32-43 | 10-20 | 43-49 | 4 |
| Algodão | 95 | 2 | 1 | 0.4 |
| Linho (retorcido) | 71 | 21 | 2 | 6 |
| Linho (sem restrições) | 63 | 12 | 3 | 13 |
| Juta | 71 | 14 | 13 | 2 |
| Rami | 76 | 17 | 1 | 6 |
| Sisal | 73 | 14 | 11 | 2 |

Fonte: Adaptado de (THAKUR, 2014).

Tabela 04 – Propriedades mecânicas de fibras naturais.

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

Fonte: (LEVY NETO e PARDINI, 2006).

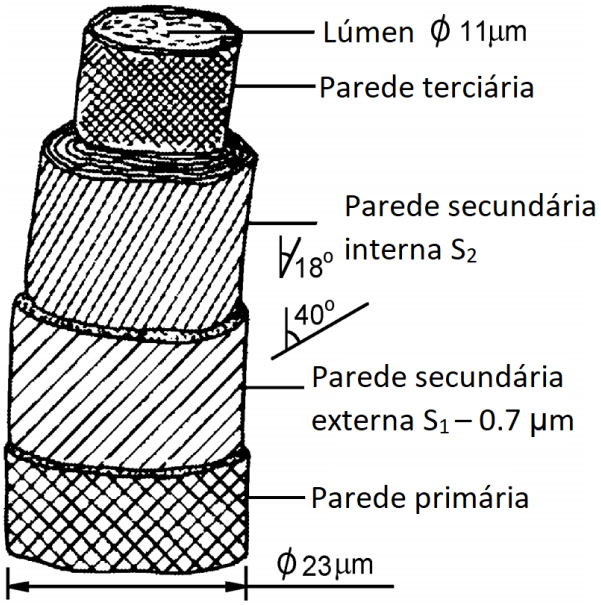
Em geral, as principais vantagens das fibras naturais vegetais são: sua disponibilidade pode ser considerada ilimitada por serem materiais renováveis, menos abrasivas que as fibras artificiais usualmente utilizadas como reforço, portanto, geram um menor desgaste dos equipamentos envolvidos no seu processamento; materiais biodegradáveis e apresentam baixo custo, em relação aos reforços atualmente empregados (MARINELLI *et al*., 2008).

### 3.5.1 Fibra de sisal

Entre as fibras vegetais empregadas como reforço em compósitos de matriz polimérica, uma das mais citadas na literatura nas últimas décadas é o sisal (LEVY NETO e PARDINI, 2006). As fibras de sisal são obtidas das folhas da planta Agave sisalana e, atualmente, o sisal é uma das fibras vegetais mais extensamente cultivadas sendo responsável por metade da produção total de fibras têxteis. Isso ocorre graças às facilidades apresentadas para o cultivo da planta como curto período de crescimento e facilidade de cultivo em diversas condições climáticas, principalmente, em regiões com baixa precipitação pluviométrica e solos arenosos ou similares. (JOSEPH *et al*., 1999).

A fibra de sisal é na verdade um feixe de fibras ocas, cujas paredes celulares são reforçadas com celulose orientada em espiral em uma matriz de hemicelulose e lignina. Assim, a parede celular é um compósito de matriz lignocelulósicas reforçada por microfibras helicoidais de celulose (LI *et al*., 2000). A lignina mantém a água nas fibras, atua como uma proteção a ataques biológicos e como um reforço para dar resistência ao tronco contra forças de gravidade e vento. A hemicelulose encontrada nas fibras naturais acredita-se ser um compatibilizador entre celulose e lignina (KALIA, S.; KAITH, B.S; KAUR, 2009). A Figura 09 mostra um esboço esquemático da parede celular das fibras de sisal.

Figura 09 – Esquema da estrutura celular de uma fibra de sisal.




Fonte: Adaptado de (JOSEPH *et al*., 1999)

A parede celular na fibra não é uma membrana homogênea. Cada fibra possui uma estrutura de camadas complexas formada por uma parede primária fina, que é a primeira camada depositada durante o crescimento celular, que circunda uma parede secundária. A parede secundária é constituída por três camadas e a camada do meio, que apresenta maior espessura, determina as propriedades mecânicas da fibra. Essa camada intermediária consiste em uma série de microfibrilas celulares formadas a partir de moléculas de celulose de cadeia longa enroladas helicoidalmente. O ângulo entre o eixo da fibra e as microfibrilas é chamado de ângulo microfibrilar (KALIA, S.; KAITH, B.S; KAUR, 2009).

A fibra de sisal após ser industrializada pode ser convertida em fios, barbantes, cordas, tapetes, sacos, bolsas, chapéus e artesanato. Também pode ser utilizada na fabricação de pasta celulósica, empregada na confecção do papel Kraft e de outros tipos de papéis finos (VASCO, 2014). As fibras de sisal também têm sido muito utilizadas como reforço em compósitos poliméricos graças as suas características particulares, como elevada resistência ao impacto, além de moderadas propriedades de tração e flexão que são, na maioria das vezes, superiores a outras fibras lignocelulósicas (DARROS, 2013).

O Brasil produz mais de 50% da produção mundial de sisal, sendo um dos principais países produtores do mundo. Além disso, o Brasil continua sendo o maior exportador dentro do ranking mundial. No Rio Grande do Norte, mais de 60% das áreas cultivadas com sisal concentram-se na região de João Câmara (HOLANDA, 2013).

## 3.6 ADESÃO NA INTERFACE MATRIZ/ FIBRA

Um dos parâmetros mais importantes em materiais compósitos é a interface entre o reforço e a matriz. A interface é a região na qual ocorre o contato entre os componentes do compósito e é a principal responsável pela transferência da solicitação mecânica da matriz para o reforço. A adesão inadequada entre as fases envolvidas na interface pode comprometer o desempenho dos compósitos (MARTINS NETO, 2016).

Importantes aplicações tecnológicas dos materiais requerem que os mesmos sejam aderentes a outras substâncias. Adesão pode ser entendida como a atração entre substâncias, sendo, portanto, uma manifestação de forças atrativas entre os átomos e/ou superfícies. A adesão entre matriz e reforços fibrosos é dependente de alguns fatores, entre eles pode-se destacar (LEVY NETO e PARDINI, 2006):

- A presença de grupos funcionais superficiais da fibra;
- Orientação, arranjo atômico, cristalinidade e propriedades químicas do reforço;
- Conformação molecular e constituição química da matriz;
- Difusidade dos elementos de cada constituinte;
- Arranjo geométrico das fibras.

As fibras vegetais são hidrofílicas, uma vez que possuem natureza lignocelulósica, que contêm grupos hidroxilos fortemente polarizados. As principais limitações do uso de fibras vegetais como reforços em matrizes poliméricas incluem baixa adesão interfacial entre a fibra polar (hidrofílica) e a matriz não polar (hidrofóbica) (KALIA, S.; KAITH, B.S; KAUR, 2009).

Para melhorar a adesão na interface, geralmente, se torna necessário modificar a superfície da fibra vegetal ou adicionar agentes de acoplamento (ou adesão) à matriz. Muitas abordagens diferentes têm sido exploradas para melhorar essa interação, entre elas está a modificação química da fibra antes do processamento do compósito, seja via esterificação, eterificação, tratamento com silano e através de meios físicos, como plasma. De maneira geral, a proteína retirada das fibras para que haja compatibilidade interfacial é a lignina. (VASCO, 2014).

Além de passar por pré-tratamento as fibras vegetais devem ser secas para que se tenha um grau de adesão aceitável entre fibra e matriz. A secagem das fibras é necessária para evitar

a influência negativa da presença de umidade na interface entre fibras e os diferentes constituintes (MARTINS NETO, 2016).

### 3.6.1 Tratamento alcalino das fibras

O tratamento alcalino, também chamado de mercerização, é um tratamento simples e eficiente para melhorar a adesão da matriz polimérica com os reforços lignocelulósicos (ORUE *et al*., 2016). O tratamento alcalino extrai a lignina e a hemicelulose, resultando em mudanças na estrutura, na morfologia, nas dimensões e nas propriedades mecânicas das fibras (PIRES *et al*., 2012).

O tratamento alcalino reduz o diâmetro da fibra removendo os materiais amorfos da superfície da fibra e aumenta a rugosidade da superfície. Assim, a remoção de materiais amorfos expõe a celulose e os seus grupos hidroxilo e conduz a uma maior ligação entre a superfície da fibra e a matriz polimérica, aumentando assim as propriedades mecânicas e térmicas dos compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais (KRISHNAIAH *et al*., 2017). O tratamento alcalino também provoca a fibrilação (quebra do feixe de fibras compostas em fibras menores) e aumenta o número de possíveis locais reativos permitindo uma melhor molhabilidade das fibras. A mercerização também tem um efeito na composição química das fibras vegetais, grau de polimerização e orientação molecular dos cristalitos de celulose devido à cimentação de substâncias como lignina e hemicelulose que foram removidas durante o processo de mercerização. Como resultado, a mercerização tem um efeito duradouro nas propriedades mecânicas das fibras vegetais, principalmente na resistência e rigidez da fibra (KALIA, S.; KAITH, B.S; KAUR, 2009).

O tratamento alcalino remove certa quantidade de lignina, cera e óleos encontrados na superfície externa da parede celular da fibra. A adição de solução aquosa de NaOH na fibra promove a ionização do grupo OH-. Embora esse tratamento aumente a adesão com a matriz polimérica, deve-se diminuir a concentração do hidróxido de sódio para não comprometer a resistência da fibra (HOLANDA, 2013).

## 3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

### 3.7.1 Ensaio de Tração

O ensaio de tração consiste em submeter o material a um esforço crescente que tende a alongá-lo até a ruptura. Neste ensaio a peça é fixada numa máquina que aplica os esforços crescentes na direção axial e ao mesmo tempo mede a deformação sofrida pelo material. Os esforços ou cargas também são medidos na própria máquina de ensaio. (AUGUSTO, 1982).

A precisão de um ensaio de tração depende da precisão dos aparelhos de medida que se dispõe e da utilização adequada do equipamento. Fatores como velocidade do ensaio e temperatura podem alterar os resultados obtidos. A velocidade do ensaio é geralmente dada pelos métodos de ensaios estabelecidos pelas diferentes associações de normas técnicas; quando, porém, se realiza um ensaio de tração para fins de estudo ou pesquisa essa velocidade pode ser alterada, conforme o caso. É importante notar que não é preciso no ensaio que o corpo de prova seja trabalhado até a ruptura, pois com pequenas deformações se podem conseguir uma precisão maior na tensão do que quando são atingidas grandes deformações do material, onde a leitura dos valores numéricos fica mais difícil, devido à grande variação da deformação em função da tensão aplicada. (SOUZA 1982).

Quando um corpo de prova é submetido a um ensaio de tração, pode-se construir um diagrama da tensão (ordenadas) pela deformação (abcissas). É importante notar que a tensão e a deformação aqui utilizadas são as de engenharia (medidas em relação à área inicial e ao comprimento inicial, respetivamente). (HIBBELER 2010).

Como o auxílio da correlação de imagens iremos montar um diagrama para cada corpo de prova ensaiado. Dentro desse diagrama podem-se destacar algumas propriedades importantes, entre elas: Tenacidade, módulo de elasticidade e limite de resistência à tração.

### 3.7.2 Correlação digital de imagem (CDI)

O teste de tração é o método mais simples e eficaz para determinar as propriedades mecânicas dos materiais. Em um teste de tração, existem muitos métodos para medição de

deformação, que podem ser divididos em métodos com e sem contato. Os métodos de contato incluem principalmente a técnica strain-gauge e a utilização de extensômetros mecânicos. Como um método muito maduro, a técnica strain-gauge pode convenientemente obter a deformação linear, anexando um medidor de deformação à superfície da amostra. Embora essa técnica forneça uma precisão de medição de deformação muito alta, sua faixa de medição de deformação é geralmente inferior a 2% de toda área do corpo de prova, o que não é adequado para medir a grande deformação de um material dúctil. Um extensômetro mecânico, por sua vez, pode ser facilmente danificado quando ocorre a falha da amostra. Um extensômetro óptico, como a correlação digital de imagem (CDI), tem um grande potencial para substituir os métodos convencionais de contato, visto que podem fornecer medições sem contato e um campo completo de deformação e, portanto, desempenham um papel cada vez mais importante na medição de deformação. (ZHU et al., 2018).

O CDI baseia-se no princípio de comparar os padrões luminosos na superfície da amostra deformada e não deformada ou entre dois estados de deformação. Para este fim, uma grade virtual de subconjuntos de um tamanho e forma selecionados, formando uma distribuições de valores de cinza, é sobreposta na superfície preexistente do corpo de prova ou artificialmente pulverizado. Essa distribuição de cinza é então "observada" durante a deformação por um sistema de câmera ótica. Desta forma, a informação sobre a distribuição de deformação local no plano é obtida sem conhecer o comportamento constitutivo do material a priori. Além disso, esse método é independente da geometria da amostra e também pode ser aplicado a peças e geometrias complexas para obter informações sobre o comportamento de deformação dos componentes em serviço real. (JERABEK; MAJOR; LANG, 2010). Enquanto as deformações 2D podem ser medidas com uma câmera, as deformações em 3D requerem o uso de duas câmeras medindo as mudanças na superfície deformada em diferentes ângulos (ORELL et al., 2018).

A Correlação Digital de Imagens (CDI) é um método óptico que emprega técnicas de rastreamento e registro de mudanças em imagens para medições precisas em domínios 2D e 3D. Esta é uma técnica muito utilizada em uma série de aplicações da ciência e engenharia para medir campos cinemáticos (deslocamentos e deformações) a partir da comparação de imagens em instantes diferentes de um ensaio (PENNAFORT *et al*., 2014).

A análise de correlação de imagens utilizando o Matlab foi aprofundada e desenvolvida pelos franceses François Hild e Stepháne Roux em 2008 com a criação de um código de cálculo chamado Correli $Q4^{LMT}$. Tal código tem diversas aplicações e pode substituir extensômetros e strain gages com obtenção de deslocamentos e deformações locais não só em um ponto, mas ao

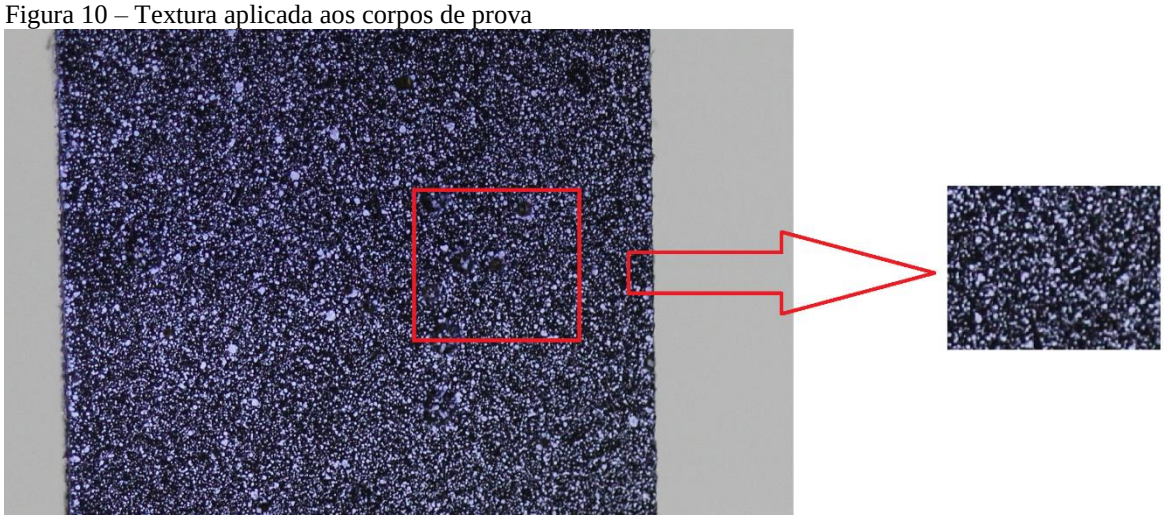
longo de toda uma superfície. O método é baseado numa aproximação de multiescalas para determinar o deslocamento, e para isto o programa procura pela máxima correlação entre pequenas áreas extraídas da imagem de referência e uma imagem qualquer do corpo de prova deformado (HILD, 2008).

O procedimento para a utilização desse programa envolve a utilização de uma câmera de alta definição e que tenha a capacidade de capturar fotos em alta velocidade de um ensaio, haja vista que é necessária uma grande quantidade de imagens em diversos instantes do ensaio para que este possa ser analisado adequadamente. Obviamente quanto maior o número de imagens mais detalhada será esta análise, além disto, o número de imagens vai depender da velocidade de deformação do ensaio.

A utilização da técnica de CDI compreende basicamente três etapas consecutivas (PENNAFORT *et al*., 2014):

- Preparação do corpo de prova, onde o mesmo precisa ser limpo para melhor aderência da tinta que será aplicada de forma a obter uma textura (Figura 10), ou seja, um campo onde existirá uma espécie de malha;
- Registro de imagens através de uma máquina fotográfica, da superfície do corpo de prova, em diferentes instantes ao longo do carregamento;
- Processamento das imagens obtidas, utilizando um programa de computador com os algoritmos de correlação de imagens implementados, obtendo-se os campos cinemáticos (deslocamento e deformação) desejados.

Figura 10 – Textura aplicada aos corpos de prova



Fonte: autoria própria, 2018.

A técnica da correlação de imagens digitais se baseia na comparação de duas imagens, uma chamada de referência e outra correspondendo ao estado deformado do corpo de prova

analisado. O princípio da correlação de imagens é de “encontrar” a mesma zona presente em uma imagem na outra, baseando-se no fato de que a distribuição dos valores de nível de cinza de uma área retangular, por exemplo, na imagem original corresponde à mesma distribuição de valores de nível de cinza na imagem de destino, procurando na imagem deformada o lugar onde se atinge o máximo de semelhança.

O cálculo do campo de deformação produzido pelo programa de correlação de imagens é baseado nos seguintes a passos:

1. Discretização de uma imagem quadrada, chamada de região de interesse (ROI) em pequenas áreas quadradas chamadas "zonas de interesse" (ZOI);
2. O uso da função de correlação para cada ZOI entre a imagem distorcida e a imagem de referência, para calcular o seu deslocamento (em pixel(s));
3. Cálculo direto do campo de deformação associado. Os pontos (1) e (2) são repetidos para cada imagem distorcida.

### 3.7.3 Ensaio de flexão três pontos

O ensaio de flexão em três pontos consiste na aplicação de uma carga no centro de um corpo de prova apoiado em dois pontos. A carga aplicada aumenta lentamente até a ruptura do corpo de prova. A resposta do ensaio consiste no valor da carga aplicada versus o deslocamento do ponto central. O valor da carga obtido varia conforme o material seja dúctil ou frágil. No caso de materiais dúcteis considera-se a força obtida no limite de elasticidade. Quando se trata de materiais frágeis, considera-se a força registrada no limite de ruptura (RIBEIRO, 2011).

Entre as propriedades levantadas através do ensaio de flexão três pontos podemos destacar:

A tensão de flexão máxima que é dada pela Equação 40 (HIBBELER, 2010):

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}.c}{I} \qquad eq.40$$

Onde:

$\sigma_{max}$ é a tensão de flexão máxima;

c é a Distancia da linha neutra a superfície do corpo de prova;

I é o momento de inércia do corpo de prova;

$M_{max}$ é o momento fletor máximo que para a flexão três pontos é dado pela Equação 41

$$M_{max} = \frac{P_{max}.L}{4} \qquad eq.41$$

Onde:

$P_{max}$ é a força máxima aplicada ;

L é o comprimento do corpo de prova apoiado.

Logo, a tensão máxima em flexão para o ensaio de flexão em três pontos utilizando uma amostra prismática é calculada segundo a Equação 42 (HIBBELER, 2010):

$$\sigma_{max} = \frac{3\,P_{max}.L}{2.b.d^2} \qquad eq.42$$

Onde:

$b$ é a largura da amostra;

$d$ é a espessura da amostra.

E a deflexão (v): Ao sofrer um esforço de flexão o corpo sofre uma deformação que pode ser expressa pela distância entre a posição final do corpo e a linha neutra original, essa deformação é conhecida como deflexão e pode ser calculada (dentro do limite elástico). A relação fundamental para o cálculo da flecha de uma barra submetida à flexão é dada pela Equação 43 (HIBBELER, 2010):

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M(x)}{E.I} \qquad eq.43$$

Onde:

$v$ – deflexão

E - Módulo de elasticidade

I - Momento de inércia

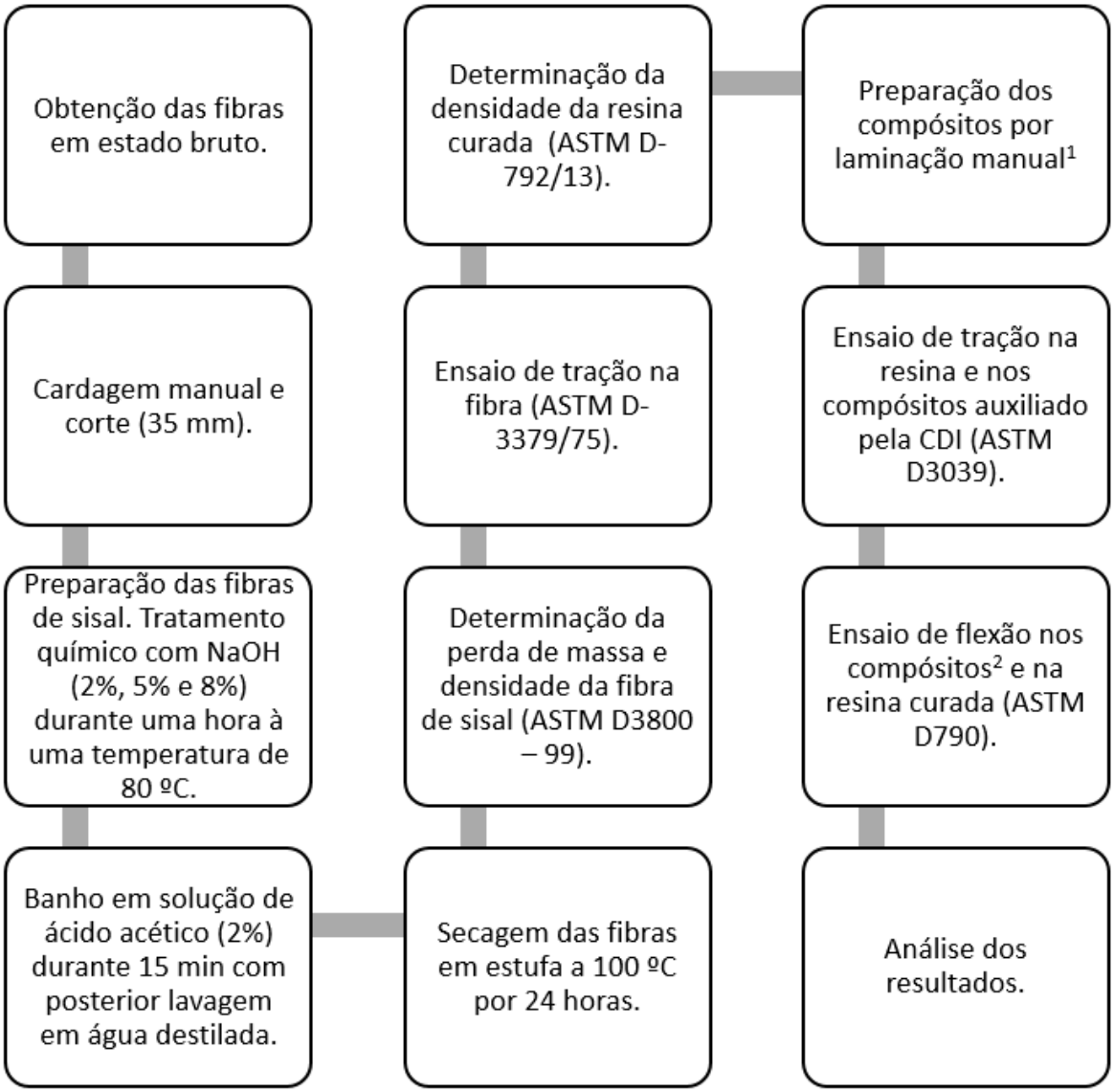
Para o ensaio de flexão em três pontos utilizando uma amostra prismática podemos mostrar que a deflexão é dada pela Equação 44 (HIBBELER, 2010):

$$v = \frac{P.L^3}{4.E.b.d^3} \qquad eq.44$$

# 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos da pesquisa. Inicialmente é apresentado um fluxograma, Figura 11, com todos os passos seguidos. Posteriormente, são descritos os materiais utilizados para fabricação dos compósitos reforçados com fibra de sisal. Em seguida, são apresentados os métodos usados para caracterizar as propriedades mecânicas dos compósitos.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia utilizada.




Legenda – [1]Estudo da influência: da concentração (compósitos [0] com fibras tratadas e não tradadas usando 20% de reforço), da orientação (compósitos [0], [90], [0 90 90 0] e [90 0 0 90] com 20 % de reforço) e da composição (compósitos [0 90 90 0] com 10%, 20% e 30% de fibra). [2] Apenas no estudo da influência da orientação.
Fonte: autoria própria, 2018.

## 4.1 MATERIAIS

### 4.1.1 Fibra de sisal

As fibras de sisal foram obtidas em seu formato bruto. Após a obtenção das fibras, estas passaram por um processo de paralelização (cardagem manual) e posteriormente foram cortadas em um comprimento pré-determinado de 35 cm. Como mostrado na figura 12.

Figura 12 – Fibra de sisal antes e depois da cardagem manual e corte.

Legenda: Na esquerda da imagem é mostrado a fibra em estado bruto, na direita da imagem está a fibra após cardagem e corte.
Fonte: autoria própria, 2018.

### 4.1.2 Resina Epóxi

A resina epóxi é um polímero termofixo, portanto exibe ligações cruzadas covalentes entre as cadeias moleculares adjacentes. Durante o processo de cura ela se torna permanentemente dura e não se torna fluida quando exposta ao calor. O conjunto utilizado foi a resina SQ 2001 e o endurecedor SQ 3154. Segundo o fabricante esse conjunto é indicado para laminados de fibra de vidro, carbono e aramida (Kevlar), de cura ambiente, onde se necessite

bom acabamento e performance. A resina epóxi, base do sistema é um produto líquido, resultante da reação da Epicloridrina com o Bisfenol A. O endurecedor é à base de poliamina modificado e promove boa adesão com boa resistência térmica, química e mecânica com baixa exotermia, possuindo boa solubilização na resina com proporções não críticas, permitindo cura homogênea com boa velocidade e propriedades finais bastante controláveis. A Tabela 05 abaixo traz as propriedades do sistema, baseada nas informações do fabricante.

Tabela 05 – Propriedades da resina epóxi utilizada segundo o fabricante

| **Características dos componentes** | | |
|---|---|---|
| | **Resina SQ 2001** | **Endurecedor SQ 3154** |
| Aparência | Líquido incolor viscoso | Líquido levemente amarelado |
| Viscosidade, 20°C, cPs | 10.000 a 14.000 | 200 máx. |
| Peso Especifico, 20° C, g/cm$^3$ | 1,16 +/- 0,01 | 1,005 +/- 0,015 |
| **Propriedades do sistema não curado** | | |
| Proporção de mistura (Resina: Endurecedor) | | 100:50 partes em peso |
| Temperatura de manipulação (°C) | | 18-30 |
| Tempo de utilização da mistura 100 g (gel time) a 20° C | | 20 a 30 min. |
| Tempo de endurecimento da mistura (100 g em película, 20° C) | | 3 a 4 horas |
| Cura total a 20° C | | 7 dias |
| **Propriedades do sistema curado** | | |
| Temperatura de Deflexão Térmica(HDT) (°C) | | 95-100 |
| Força de Compressão (psi) | | 5000 |
| Força de Tensão (psi) | | 3000 - 6200 |
| Elongação (%) | | 2.8 |
| Impacto Izod (ft Ib/in) | | 0,2-0,6 |
| Dureza Barcol | | Mín. 30 |

Fonte: Silaex, 2017.

### 4.1.3 Reagentes

No tratamento das fibras de sisal foram utilizados dois reagentes diferentes. O Hidróxido de sódio, NaOH, P.A – ACS (Microperolas) e o Ácido acético glacial P.A – ACS.

## 4.2 MÉTODOS

### 4.2.1 Preparação das fibras de sisal

Após o corte e cardagem, as fibras foram secadas em estufa a 100 ºC por 24 horas. Parte das fibras passou pelo tratamento com solução de hidróxido de sódio em diferentes concentrações (2%, 5% e 8%). Para o preparo das soluções de NaOH foram utilizados balões volumétricos de 1000 ml.

Esse tratamento consistiu em mergulhar as fibras na solução de NaOH, com agitações periódicas, durante uma hora a uma temperatura de 80 ºC. No tratamento foi utilizado uma relação de 1:20 gramas de fibra/mililitros de solução. Para o aquecimento da solução foi utilizada uma chapa aquecedora modelo XMTD – 701 da EDUTEC.

Ao final do tratamento, foi realizada a remoção do excesso de hidróxido de sódio da fibra com solução de ácido acético, utilizando uma concentração de 2% durante 15 min, seguida por uma lavagem em água destilada. Essas fibras passam pelo mesmo processo de secagem em estufa. Para a secagem foi utilizada uma estufa de esterilização e secagem da odontobras.

O objetivo desse tratamento é melhorar a adesão entre a fibra lignocelulósica e a matriz polimérica. Porém, concentrações elevadas de NaOH podem deteriorar as propriedades mecânicas da fibra.

As fibras tratadas em diferentes concentrações e as não tratadas, tiveram o seu diâmetro medido e foram submetidas a ensaios de tração para avaliação das suas propriedades mecânicas.

### 4.2.2 Determinação da perda de massa e densidade da fibra de sisal

As fibras foram pesadas antes e após o tratamento para averiguar a perda de massa provocada pelo banho químico. As fibras tratadas e não tratadas tiveram a suas densidades determinadas de acordo com a norma ASTM D3800 – 99. Para a determinação da densidade da fibra é preciso utilizar um fluido de imersão. Nesse experimento foi utilizado o óleo de canola, cuja densidade é 0,89056 g/cm$^3$, pois, segundo Truong *et al*., 2009, os valores de densidades

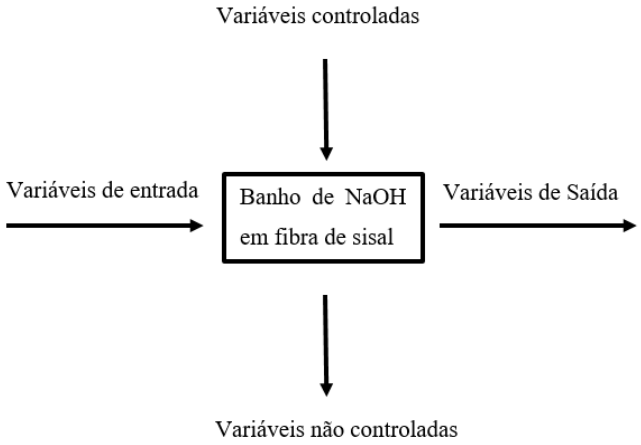
encontrados com sua utilização são próximos a valores obtidos através do método de picnometria à hélio.

De acordo com a norma acima, a fibra precisa ser pesada duas vezes; uma ao ar livre e outra em imersão no fluido. Conhecida a densidade do fluido e a diferença entre as medidas de peso da fibra pode-se determinar a sua densidade. Para a pesagem foi utilizado uma balança analítica digital modelo SHIMADZU AUY 220.

Em um primeiro momento foram separadas 9 conjuntos de 50 gramas de fibras sem tratamento. Foram realizados três tratamentos com diferentes concentrações (2%, 5% e 8 %) de NaOH em 3 conjuntos de fibras. Em todos os tratamentos foi utilizada a temperatura da solução em 80 ºC e um tempo de banho de uma hora. Foi determinada a perda de massa e a densidade em cada conjunto. Para a determinação da densidade foram realizadas 4 medições para cada tratamento.

Posteriormente, uma pesquisa mais detalhada foi realizada para determinar a influência do tempo de mergulho, da temperatura e concentração de NaOH da solução na perda de massa e a densidade da fibra. Para a realização desse experimento foi criado um planejamento experimental, mostrado na Figura 13. As variáveis de entrada foram: Concentração de NaOH, que assume um nível de variação de 2% até 15%; tempo de mergulho na solução, que varia de 30 min até 120 min e o temperatura do banho, que varia de 28 ºC até 80 ºC. As variáveis de saída foram: perda de massa e densidade. As variáveis controladas foram: massa de fibra mergulhada em cada banho alcalino e a relação massa de fibra por volume de solução. Dentre as variáveis não controladas podemos citar a origem da fibra e a umidade do ambiente. Nesse momento a fibra foi separada em grupos de 4 g e submetidas aos tratamentos seguindo o planejamento da Tabela 06.

Figura 13 – Planejamento experimental.




Fonte: autoria própria, 2018.

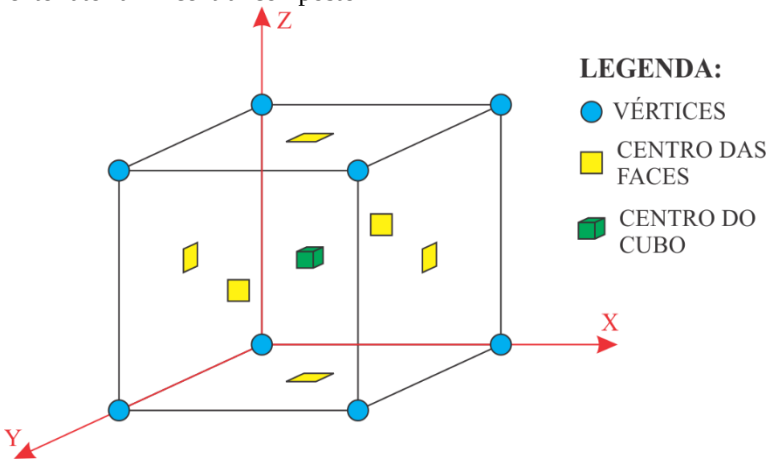
A Tabela 06 mostra os ensaios que serão conduzidos para a realização do experimento utilizando um planejamento fatorial $2^3$ central composto, que consiste na realização de vários ensaios através da variação de três fatores simultaneamente. A Figura 14 mostra um esquema 3D do planejamento fatorial $2^3$ central composto utilizado.

Tabela 06 – Planejamento fatorial $2^3$ central composto.

| **Ensaio** | **Nível codificado** | | | **Nível real** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | X | Y | Z | X (ºC) | Y (%) | Z (min) |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 28 | 2 | 30 |
| 2 | -1 | 1 | -1 | 28 | 15 | 30 |
| 3 | -1 | 1 | 1 | 28 | 15 | 120 |
| 4 | -1 | -1 | 1 | 28 | 2 | 120 |
| 5 | 1 | -1 | -1 | 80 | 2 | 30 |
| 6 | 1 | 1 | -1 | 80 | 15 | 30 |
| 7 | 1 | 1 | 1 | 80 | 15 | 120 |
| 8 | 1 | -1 | 1 | 80 | 2 | 120 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 54 | 8,5 | 75 |
| 10 | 0 | 0 | -1 | 54 | 8,5 | 30 |
| 11 | 0 | 0 | 1 | 54 | 8,5 | 120 |
| 12 | 0 | 1 | 0 | 54 | 15 | 75 |
| 13 | 0 | -1 | 0 | 54 | 2 | 75 |
| 14 | -1 | 0 | 0 | 28 | 8,5 | 75 |
| 15 | 1 | 0 | 0 | 80 | 8,5 | 75 |

Legenda: X representa a temperatura do banho, Y representa a concentração de NaOH e Z representa o tempo de banho na solução
Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 14 – Planejamento fatorial $2^3$ central composto




Fonte: autoria própria, 2018.

### 4.2.3 Determinação do diâmetro da fibra de sisal

As fibras não tratadas e tradadas com 2%, 5% e 8 % de NaOH tiveram o seu diâmetro determinado através da utilização de um microscópio óptico modelo NIKON SMZ18 equipado com uma lupa modelo NIKON DS-Fi2. Foram separadas 20 amostras de cada tipo de fibra (totalizando 80 amostras) e foram registradas 8 imagens ao longo do comprimento de cada amostra. Conhecendo a resolução do microscópio, os diâmetros das fibras foram determinados através da análise das imagens obtidas.

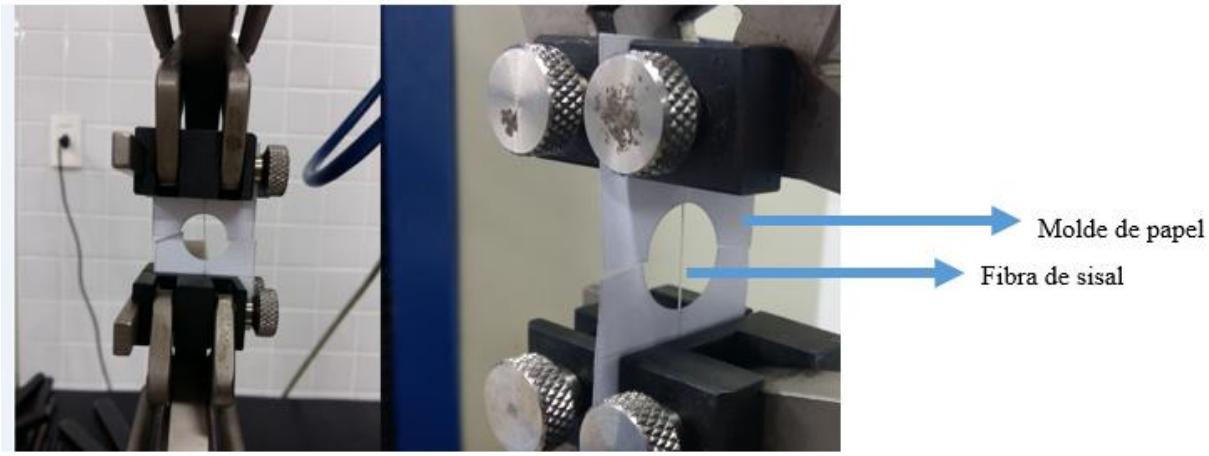
### 4.2.4 Ensaio de tração na fibra

Os ensaios de tração foram realizados com a finalidade de avaliar as propriedades mecânicas das fibras de sisal submetidas ao tratamento químico com diferentes porcentagens de hidróxido de sódio (NaOH) e comparar os resultados entre fibras de sisal tratadas e sem tratamento químico.

As 80 amostras que tiveram seu diâmetro medido foram submetidas a ensaios de tração segundo a norma ASTM D-3379/75. Esses ensaios foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA que conta com uma máquina de ensaios EMIC DL10000. Foi utilizada uma célula de carga modelo Z com capacidade de 5kN. A montagem do ensaio é mostrada na Figura 15.

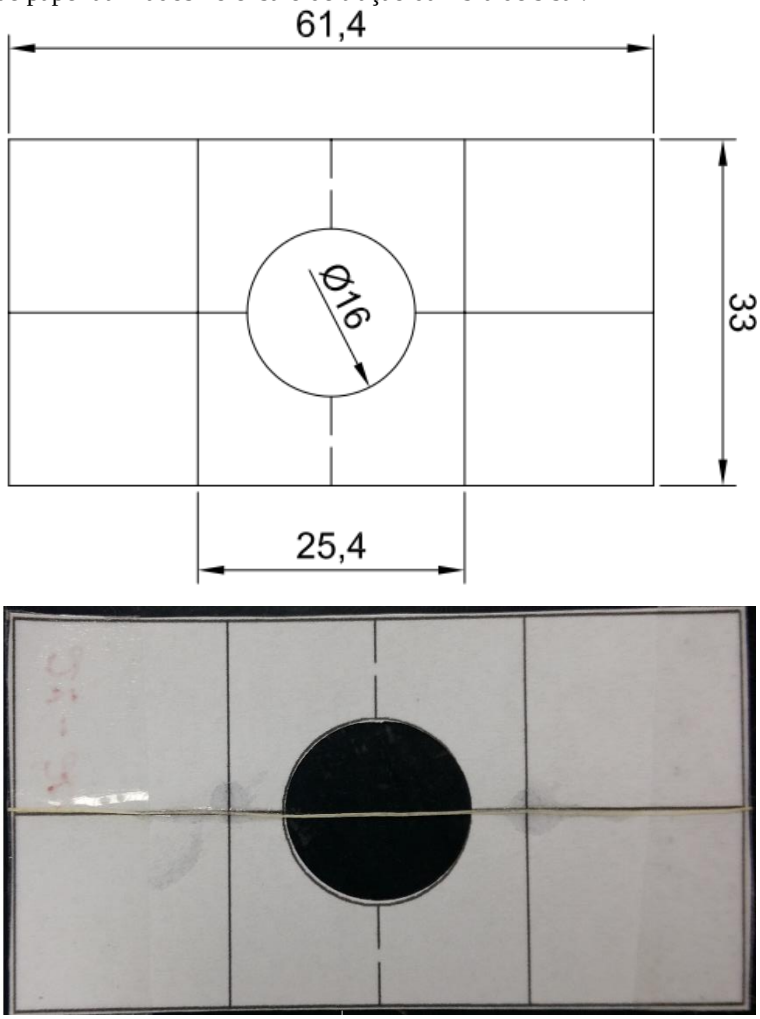
Para montagem dos corpos de prova, as fibras foram coladas em recortes de papel A4 (Figura 16) através de cola de secagem rápida, com o cuidado de manter as fibras em perfeito alinhamento com o centro do padrão de papel. Para a realização dos ensaios, os recortes de papel juntamente com as fibras são fixados através de garras de pressão na máquina de tração. Uma vez fixado o padrão, as laterais do papel foram cortadas deixando somente a fibra entre as garras. Em seguida aplicou-se carga em tração, utilizando uma velocidade de deslocamento da garra de 0,027 mm/s.

Figura 15 – Ensaio de tração nas fibras de sisal




Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 16 – Padrões de papel utilizados no ensaio de tração da fibra de sisal.




Fonte: autoria própria, 2018.

### 4.2.5 Determinação da densidade da resina curada e dos compósitos

A resina epóxi foi preparada utilizando uma relação de 1:2 massa de endurecedor/massa de resina, conforme sugestão do fabricante. Após a cura completa do sistema foram retidas 7 pequenas amostras do material para a determinação da densidade segundo norma ASTM D-792/13. Os compósitos reforçados também foram submetidos ao mesmo procedimento.

O processo de determinação da densidade da resina é semelhante ao método utilizado para a fibra. A resina também precisa ser pesada duas vezes, uma ao ar livre e outra em imersão no fluido, que nesse caso é água destilada a uma temperatura controlada de 25 ºC. Conhecida a densidade da água e a diferença entre as medidas de peso da resina pode-se determinar a sua densidade. Para a pesagem foi utilizada a balança analítica digital modelo SHIMADZU AUY 220.

### 4.2.6 Preparação dos compósitos

Conhecida a densidade da fibra e da resina é possível calcular a quantidade exata de massa necessária para garantir uma espessura final do compósito de 2,5 mm para uma determinada concentração volumétrica de fibra.

Com essa informação foi realizada a preparação dos compósitos. O método utilizado para a confecção dos compósitos foi a laminação manual (Hand Lay-up). Nesse processo o compósito é fabricado colocando sucessivamente camadas de matriz e reforço sobre um molde até conseguir a espessura desejada. Para auxiliar o processo de confecção do compósito foi utilizada uma base de vidro e um molde de madeira em formato de caixa, cujas dimensões internas são 300x150x20 mm. Grampos de fixação foram utilizados para manter o molde completamente fixo na base de vidro e impedir que a resina vazasse.

Antes de se iniciar a laminação, deve-se fazer a limpeza da base de vidro e aplicação do desmoldante. A superfície do vidro é então coberta com uma camada da resina epóxi previamente acelerada e catalisada. As fibras de reforço foram distribuídas sobre a camada de polímero. O assentamento das fibras e remoção das bolhas de ar é feito com a utilização de roletes.

Foram aplicadas várias camadas de reforço e resina até atingir a espessura necessária. Após atingir a espessura desejada, o molde foi fechado com uma tampa de vidro, cuja superfície também foi coberta com desmoldante. A tampa de vidro é utilizada para que ambos os lados do compósito apresentem uma superfície lisa. A Figura 17 mostra o molde e as ferramentas utilizadas.

Figura 17 – Molde de madeira e ferramentas utilizadas.

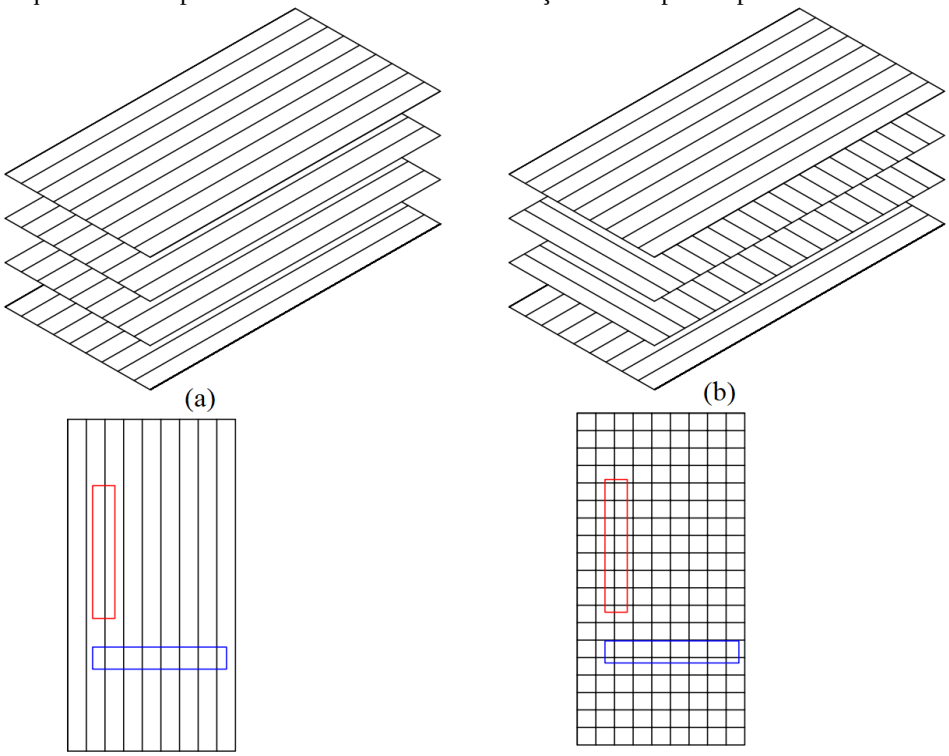
Legenda: Da esquerda para a direita encontra-se, respectivamente, a tampa de vidro, o molde de madeira fixo com os grampos de fixação, rolete tira bolhas e a espátula de plástico, todos apoiados na base de vidro.
Fonte: autoria própria, 2018.

Primeiramente foram confeccionados diferentes compósitos unidirecionais usando as fibras tratadas e não tratadas. Em cada conjunto as fibras foram posicionadas na mesma orientação, utilizando uma concentração volumétrica de 20% de fibra. Foram retirados corpos de prova no sentido das fibras para a realização do ensaio de tração. O objetivo desse tratamento é analisar a influência do tratamento químico nas propriedades mecânicas do compósito.

Posteriormente foram confeccionados novamente compósitos unidirecionais com concentração volumétrica de 20%, dessa vez apenas com fibras não tratadas. Foram retirados corpos de prova no sentido da fibra [0] e no sentido transversal [90]. Também foram confeccionados compósitos utilizando quatro camadas de fibra em diferentes orientações [0, 90, 90, 0], corpos de prova também foram retirados no sentido longitudinal [0, 90, 90, 0] e no sentido transversal [90, 0, 0, 90]. Foram retirados corpos de prova para ensaios de tração e flexão. O objetivo desse experimento é avaliar a influência da orientação das fibras nas

propriedades do compósitos. A Figura 18 traz um esquema da sequência de empilhamento das camadas e o sentido que foi utilizado para retirar os corpos de prova.

Figura 18 – Sequência de empilhamento das camadas e orientação dos corpos de prova.




Legenda: (a) corpo de prova vermelho representa o compósito [0] e o azul representa o [90]. (b) corpo de prova vermelho representa o compósito [0 90 90 0] e o azul representa o [90 0 0 90].
Fonte: autoria própria, 2018.

Para finalizar, foram confeccionados compósitos com camadas em diferentes orientações [0, 90, 90, 0] e diferentes concentrações volumétricas (10%, 20% e 30%). Corpos de prova também foram retirados apenas no sentido longitudinal [0, 90, 90, 0] e testados apenas em tração. O objetivo desse experimento é analisar a influência da concentração das fibras.

Todos os corpos de prova foram retirados através da utilização de uma serra fita de bancada (vertical).

### 4.2.7 Ensaio de tração nos compósitos e na resina curada

O objetivo desse ensaio é determinar a resistência máxima à tração, a deformação e o módulo de elasticidade do compósito e da resina. Os ensaios de tração foram realizados no

laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA que conta com uma máquina de ensaios EMIC DL10000, a célula de carga de 100 kN foi utilizada. A resina epóxi e os compósitos foram ensaiados em um ambiente com temperatura de 25ºC, com velocidade de deslocamento 0,01 mm/s, de acordo com a norma ASTM D3039.

Após a confecção dos compósitos e da resina pura, corpos de provas nas dimensões de 120x20 mm foram retirados para a realização dos ensaios. Foram realizados cinco ensaios para a resina pura e para os compósitos foram utilizadas as configurações e quantidade de ensaios descritas na Tabela 07.

Tabela 07 - Número total de corpos de prova utilizados no ensaio de tração dos compósitos.

| Orientação das camadas | Concentração em volume de fibra (%) | Tratamento químico | Número de corpos de prova. |
|---|---|---|---|
| Unidirecionais – tracionadas no sentido da fibra [0] | 20 | Sem tratamento | 5 |
| | 20 | 2% | 5 |
| | 20 | 5% | 5 |
| | 20 | 8% | 5 |
| Unidirecionais – tracionadas transversalmente às fibra [90] | 20 | Sem tratamento | 5 |
| [90,0,0,90] | 20 | Sem tratamento | 5 |
| [0,90,90,0] | 20 | Sem tratamento | 5 |
| [90,0,0,90] | 10 | Sem tratamento | 5 |
| | 30 | Sem tratamento | 5 |

Fonte: autoria própria, 2018.

É importante observar que o ensaio de tração da resina e dos compósitos serão auxiliados pela técnica da Correlação Digital de Imagens. Essa técnica foi utilizada devido a sua capacidade de fornecer, através de medições sem contato, um campo de deformação e deslocamento de praticamente toda a superfície de corpo de prova.

Como citado anteriormente para a realização dessa técnica três etapas devem ser seguidas. A primeiras delas consiste em preparar o corpo de prova para que as imagens possam ser analisadas, isso é realizado através da aplicação de uma textura padrão sobre o corpo de prova que torne possível o reconhecimento da imagem em níveis de cinza. Tal procedimento é

realizado através de uma pintura homogênea da superfície com tinta preta, seguida da deposição aleatória de gotículas de tinta branca (Figura 10). Tal pintura foi realizada através da utilização de spray de tinta.

Após a preparação dos corpos de prova eles são fixados na máquina de ensaios e um tripé com a câmera é posicionado adequadamente para aquisição das imagens como mostrado na Figura 19. Luminárias são utilizadas para garantir que não existam sombras no corpo de prova. Fotografias são retiradas durante a realização do carregamento até que ocorra a ruptura do material. Para a obtenção das imagens foi utilizada uma câmara modelo CANON EOS 60D com uma frequência de aquisição de fotos de cinco segundos. Durante o ensaio é importante que o instante de aquisição da primeira imagem (sem deformação) coincida exatamente com o início do ensaio de tração, para poder realizar a sincronização dos dados de deformação obtidos na correlação digital de imagem com os dados de tensão fornecidos pela máquina.

Figura 19 – Montagem do ensaio de tração auxiliado pela correlação digital de imagens.

Fonte: autoria própria, 2018.

Com as imagens obtidas, faz-se a correlação de imagens através da utilização do Correli Q4, que é um programa computacional que mede campos de deslocamento e deformações em materiais através da comparação das imagens, tal procedimento é utilizado no MATLAB. Para a realização do processo acima, diversos passos e determinações de parâmetros devem ser efetuados. Existe um guia básico de manuseio do programa descrito. O guia de utilização está presente em "*CorreliQ4: A Software for "Finite element" Displacement Field Measurements by Digital Image Correlation*" (HILD; ROUX, 2008). Dentre os principais passos necessários para a realização da correlação digital de imagens estão:

1. Corte da imagem em um tamanho desejado e apropriado. Essa etapa consiste em retirar das imagens partes que não precisam ser analisadas mantendo apenas o corpo de prova durante do ensaio. Nessa dissertação todas as imagens foram cortadas preservando um tamanho de 800 x 2500 pixels;

2. Seleção da imagem de referência. Essa etapa consiste em selecionar a imagem que representa o início do ensaio, quando o corpo de prova ainda não possui deformação;

3. Utilização da função *texture* após inserção do comando correli_q4 no Matlab: essa função permite a análise dos níveis de cinza presentes na imagem de referência, ajudando na escolha do tamanho ideal da ZOI;

4. Utilização da função *Computation click* após inserção do comando correli_q4 no Matlab: essa função inicia o processo de análise das imagens;

5. Seleção de uma região de interesse (ROI): Essa etapa consiste em selecionar dentro da imagem de referência cortada, a região que será analisada. Neste trabalho toda a imagem, após corte, foi selecionada;

6. Seleção dos parâmetros de análise. Essa etapa consiste em selecionar parâmetros importantes como o tamanho da zona de interesse (ZOI), a transição entre duas regiões vizinhas (ZOI *shift),* o número de interações que serão realizadas e a quantidade de imagens que serão analisadas. Nessa dissertação todas as análises foram feitas utilizando uma ZOI e ZOI *shift* de tamanho 64 pixels e um número de cinco interações. Após a seleção dos parâmetros, a análise é realizada e armazenada.

7. Utilização da função *vizualization,* após inserção do comando correli_q4 no Matlab: essa função permite abrir o arquivo salvo e observar escalas coloridas que comparam a imagem deformada que foi escolhida com a imagem de referência. É possível observar tanto resultados de deslocamento quanto de deformação, tanto no sentido longitudinal quanto no transversal, todos expressos em imagens com escalas coloridas (como mostrados nos resultados dessa dissertação);

8. Também é possível utilizar o comando *gauge*, que permite retirar de dentro da zona selecionada as informações de deformação longitudinal e transversal de forma numérica. A zona selecionada nesse comando é arbitrária, mas deve ser escolhida de forma a caracterizar o comportamento geral do corpo de prova. Nesse trabalho foi selecionada a maior zona possível.

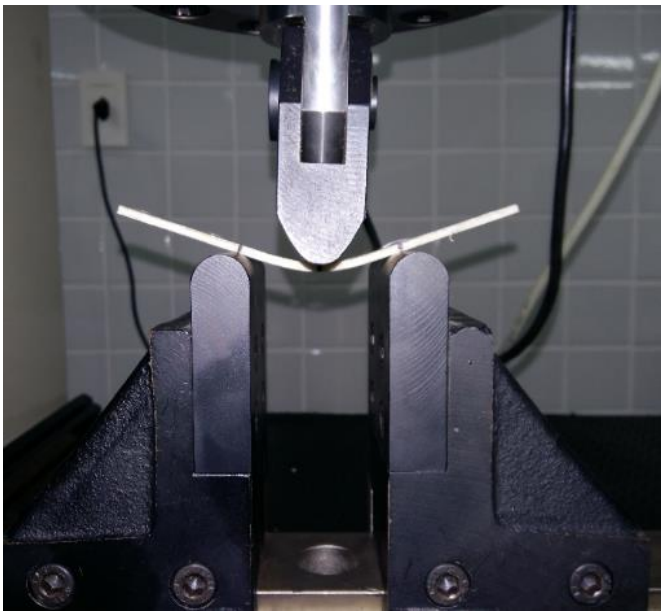
9. Com as informação de deformação longitudinal obtidas com o comando gauge e as informações de tensão fornecidas pela máquina universal de ensaios, pode-se montar um diagrama tensão x deformação e retirar resultados sobre as propriedades mecânicas do corpo

de prova. As informações de tempo fornecidas pela máquina para cada dado de tensão são utilizadas para sincronizar os dados.

### 4.2.8 Ensaio de flexão nos compósitos e na resina curada

O ensaio de flexão de três pontos também foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA e com a máquina de ensaios EMIC DL10000. Os ensaios foram realizados segundo recomendações da norma ASTM D790. A Figura 20 mostra a montagem dos corpos de prova no equipamento utilizado. Todos os corpos de prova possuíam 127x12,7mmx3mm de dimensões e foram ensaiados numa velocidade que garantisse uma taxa de deformação da fibra externa igual a 0,01 mm/mm por minuto. A distância entre os apoios foi utilizada como 52 mm.

Figura 20 – Montagem do ensaio de flexão.



Fonte: autoria própria, 2018.

Os ensaios de flexão foram realizados para a determinação do módulo de elasticidade, tensão de flexão e deflexão máxima dos compósitos e da resina de epóxi. Foram realizados cinco ensaios para a resina pura e para os compósitos foram utilizadas as configurações e quantidade de corpos de prova descritas na Tabela 08.

Tabela 08 - Número total de corpos de prova utilizados no ensaio de flexão dos compósitos.

| Orientação | Concentração em volume de fibra (%) | Tratamento químico | Número de corpo de prova |
|---|---|---|---|
| Unidirecionais – retirados no sentido da fibra [0] | 20 | Sem tratamento | 5 |
| Unidirecionais – retirados transversalmente às fibra [90] | 20 | Sem tratamento | 5 |
| [90,0,0,90] | 20 | Sem tratamento | 5 |
| [0,90,90,0] | 20 | Sem tratamento | 5 |

Fonte: autoria própria, 2018.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 5.1 OBSERVAÇÕES SOBRE A PRODUÇÃO MANUAL DOS COMPÓSITOS

A confecção dos compósitos através da técnica de laminação manual descrita na metodologia se mostrou aceitável, não houve vazamento da resina graças a utilização dos grampos de fixação. O rolete foi eficaz para a remoção de bolhas e auxiliaram bastante na distribuição da resina, garantindo um corpo de prova uniforme, apesar das limitações de ordem prática (como a inexperiência do operador). A resina epóxi também proporcionou uma ótima trabalhabilidade, apresentando boa fluidez, um tempo de trabalho bem elevado, cerca de 30 minutos, importante característica para operações manuais, principalmente para iniciantes e apresentando praticamente nenhum odor forte durante sua operação.

A grande dificuldade da confecção foi garantir o alinhamento das fibras em um único sentido em cada camada. Esse problema foi contornado através da fixação das fibras através da utilização de fitas adesivas presas em suas extremidades. Apesar disso, não se pode afirmar que as fibras ficaram totalmente alinhadas.

A utilização das densidades de cada material para prever a quantidade de massa que cada componente precisa ter para garantir a espessura final também apresentou-se satisfatoriamente. A utilização da base e tampa de vidro foram suficientes para garantir uma superfície lisa em ambos os lados na maioria dos compósitos, como mostrado na Figura 21. Sendo assim, os materiais finais apresentaram bom aspecto visual.

É importante frisar que, a medida que a concentração de fibra aumenta, a fabricação manual do compósito vai se tornando mais complicada, devido a necessidade de total impregnação da fibra pela resina. Portanto os compósitos de 30% foram os mais difíceis de confeccionar e apresentaram pequenas falhas em sua superfície superior, visto que a resina tende a cair por gravidade para a base do compósitos.

Figura 21 – Compósitos retirados para tração e flexão de acordo com as normas.

Legenda: Placa de compósitos localizada mais à esquerda da foto, seguida por um corpo de prova de tração e posteriormente um de flexão.
Fonte: autoria própria, 2018.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DA RESINA

### 5.2.1 Densidade da resina

A Tabela 09 mostra os resultados para a medição de densidade da resina. Conforme pode ser observado, os resultados encontrados estão de acordo com o estabelecido pelo fabricante (Tabela 05).

Tabela 09 – Densidade da resina epóxi curada.

| Ensaio | Densidade (kg/m$^3$) |
|---|---|
| 1 | 1153,88 |
| 2 | 1154,45 |
| 3 | 1154,56 |
| 4 | 1153,18 |
| 5 | 1155,31 |
| 6 | 1156,05 |
| 7 | 1155,71 |
| Densidade Média (kg/m$^3$) | 1154,73 |
| Desvio padrão | 1,022 |

Fonte: autoria própria, 2018.

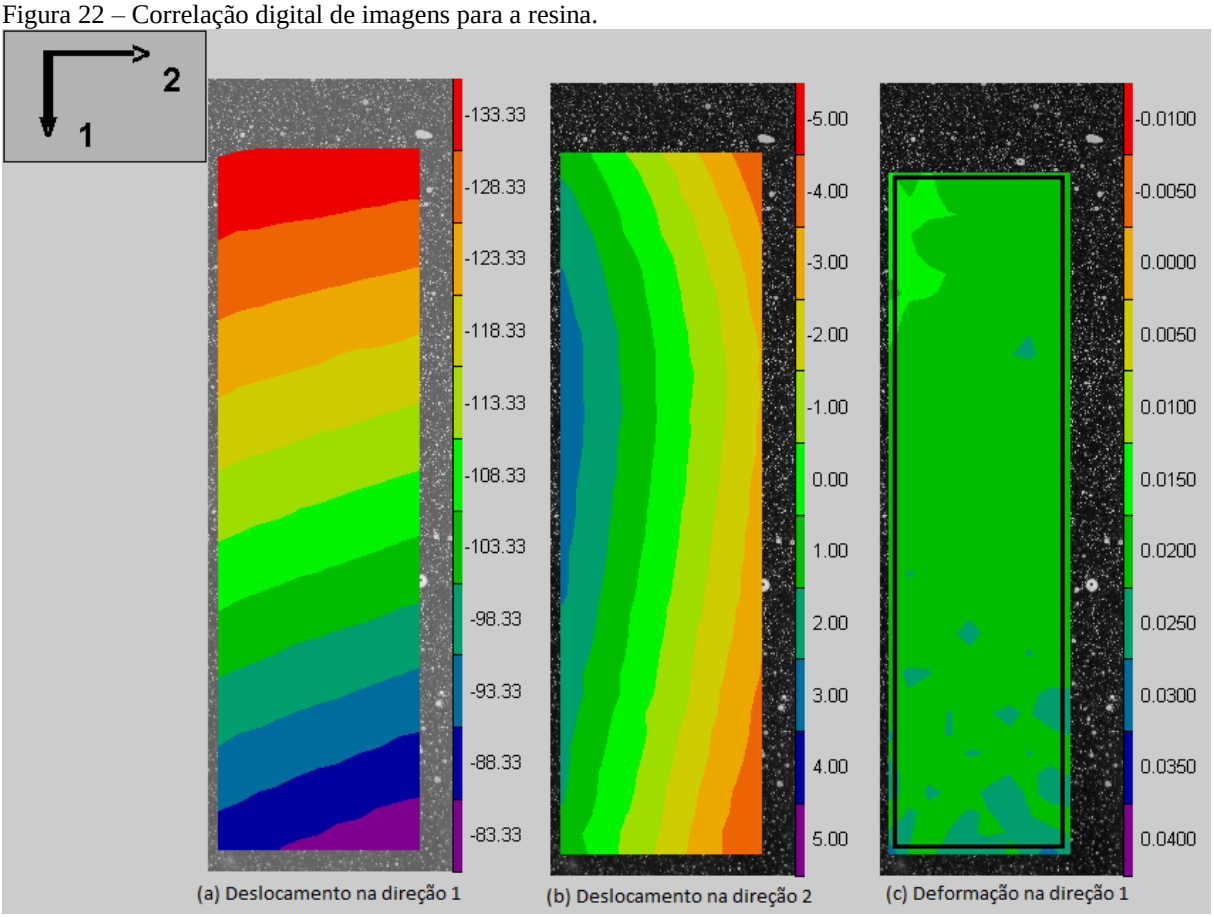
### 5.2.2 Ensaio de tração na resina

A Figura 22 mostra os resultados obtidos através da correlação digital de imagens para o ensaio 1 da resina, todos os outros ensaios apresentaram resultados semelhantes. Para essa análise é importante salientar que o resultado mostrado é a comparação entre a última imagem do ensaio e a imagem de referência, quando não havia deformação.

Na Figura 22 (a) podemos ver o deslocamento vertical sofrido por cada região. É possível notar que não existe variação brusca nas faixas de deslocamento, todas apresentam um tamanho semelhante, como consequência a deformação sofrida nessa direção é praticamente uniforme em todo o corpo de prova, como observado na Figura 22 (c). Em outras palavras, não houve concentração da deformação em nenhuma região e nem a formação de uma zona de estricção antes da ruptura. De fato, durante o ensaio não foi observado a formação do empescoçamento e a ruptura do corpo de prova ocorreu de forma brusca.

Na terceira Figura 22 (b) temos uma representação do deslocamento na horizontal. Pode-se notar claramente que existe uma região do corpo de prova que sofre um deslocamento positivo enquanto outra região sofre um deslocamento negativo, logo as duas partes do corpo se dirigem ao centro. Isso é uma característica comum para corpos de prova submetidos ao ensaio de tração. Novamente não temos variação brusca nesse deslocamento nem concentração de deformação.

Figura 22 – Correlação digital de imagens para a resina.




Fonte: autoria própria, 2018. (Escala de deslocamento, 1 pixels = 0,0186mm).

Com a correlação digital de imagens e com auxílio dos dados de tensão fornecidos pela máquina, é possível retirar informações importantes, como tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade. Para o levantamento dessas informações é preciso selecionar uma região de análise no programa (chamada de gauge). A Figura 22 (c) também mostra o tamanho do gauge utilizado (em preto) para o estudo realizado.

A Tabela 10 mostra os resultados dos cinco ensaios na resina. Os resultados estão de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante. Outros pesquisadores também reportaram valores semelhantes. GONÇALVES, 2015, afirma ter encontrado para dois tipos diferentes de resina epóxi (sistema 53-A e 12-A) uma tensão de ruptura de 39 ± 4 MPa, uma deformação máxima de 0,038 ± 0,08 e um módulo de elasticidade de 1,60 ± 0,29 GPa. MILANESE, 2012, cita uma tensão máxima de 36,1 ± 1,18 MPa, uma deformação máxima de 0,0241 ± 0,14 e um módulo de elasticidade de 2189,7 ± 93,2 MPa.

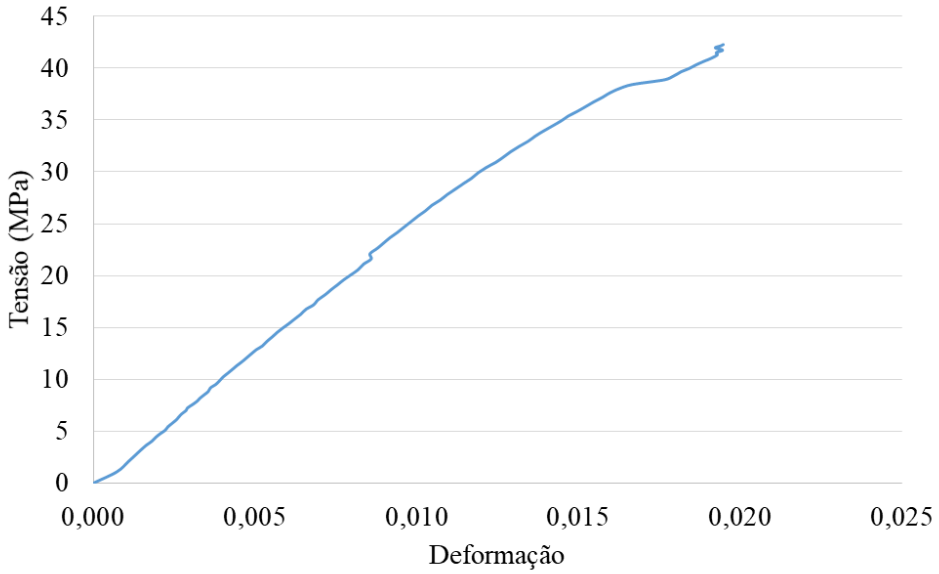
Tabela 10 – Resultados do ensaio de tração para a resina epóxi curada.

| Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Deformação máxima | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|
| 1 | 37,71 | 0,0233 | 1700,89 |
| 2 | 39,85 | 0,0197 | 2069,25 |
| 3 | 43,23 | 0,0197 | 2286,34 |
| 4 | 41,66 | 0,0200 | 2298,09 |
| 5 | 42,28 | 0,0195 | 2491,54 |
| Média | 40,95 | 0,0204 | 2169,22 |
| Desvio Padrão | 2,19 | 0,0016 | 301,47 |

Fonte: autoria própria, 2018.

A Figura 23 mostra o diagrama tensão deformação do ensaio 5 da resina. Todos os outros corpos de prova obtiveram um comportamento semelhante. É possível observar que a resina teve um comportamento praticamente elástico até a ruptura.

Figura 23 – Diagrama tensão x deformação para a resina epóxi.




Fonte: autoria própria, 2018.

### 5.2.3 Ensaio de flexão na resina

A Tabela 11 traz as propriedades mecânicas de resistência à flexão da resina epóxi.

Tabela 11 – Resultados do ensaio de flexão para a resina epóxi curada.

| Ensaio | Tensão Máxima (MPa) | Deflexão Máxima (mm) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|
| 1 | 70,40 | 2,11 | 3608,52 |
| 2 | 70,96 | 2,11 | 3553,14 |
| 3 | 75,98 | 2,21 | 3708,43 |
| 4 | 64,46 | 2,09 | 3108,97 |
| 5 | 80,95 | 2,68 | 3170,43 |
| Média | 72,55 | 2,24 | 3429,90 |
| Desvio Padrão | 6,22 | 0,25 | 271,57 |

Fonte: autoria própria, 2018.

Outros pesquisadores reportaram valores semelhantes. GONÇALVES, 2015, afirma ter encontrado para dois tipos diferentes de resina epóxi (sistema 53-A e 12-A) uma tensão de ruptura de 69 ± 3 MPa, uma deformação máxima de 0,0492 ± 0,09 e um módulo de elasticidade de 1,92 ± 0,04 GPa. MILANESE, 2012, cita uma tensão máxima de 89 ± 1,77 MPa, uma deformação máxima de 0,0556 ± 0,57 e um módulo de elasticidade de 2846,7 ± 223 MPa.

## 5.3 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO

### 5.3.1 Perda de massa e densidade da fibra de sisal

As Tabelas 12 e 13 abaixo mostram o resultado para a perda de massa e densidade das fibras submetidas aos tratamentos com concentração de NaOH de 2%, 5% e 8%, tempo de mergulho de uma hora e temperatura de solução de 80 ºC.

Tabela 12 – Perda de massa do sisal após tratamento químico.

| Concentração de NaOH (%) | Teste | Perda de massa (%) | Média | Desvio Padrão |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 1 | 24,6 | 25,93 | 1,172 |
| | 2 | 26,8 | | |
| | 3 | 26,4 | | |
| 5 | 1 | 32,2 | 32,2 | 1 |
| | 2 | 33,2 | | |
| | 3 | 31,2 | | |
| 8 | 1 | 37,8 | 38,07 | 0,643 |
| | 2 | 37,6 | | |
| | 3 | 38,8 | | |

Fonte: autoria própria, 2018.

Tabela 13 – Influência do tratamento químico na densidade do sisal.

| Concentração de NaOH (%) | Teste | Densidade ($g/cm^3$) | Média | Desvio Padrão |
|---|---|---|---|---|
| Sem tratamento | 1 | 1,124 | 1,111 | 0,0120 |
| | 2 | 1,112 | | |
| | 3 | 1,114 | | |
| | 4 | 1,095 | | |
| 2 | 1 | 1,266 | 1,263 | 0,0036 |
| | 2 | 1,2667 | | |
| | 3 | 1,263 | | |
| | 4 | 1,258 | | |
| 5 | 1 | 1,304 | 1,291 | 0,0180 |
| | 2 | 1,310 | | |
| | 3 | 1,275 | | |
| | 4 | 1,277 | | |
| 8 | 1 | 1,327 | 1,334 | 0,0056 |
| | 2 | 1,340 | | |
| | 3 | 1,331 | | |
| | 4 | 1,336 | | |

Fonte: autoria própria, 2018.

Pode-se perceber que houve um aumento na perda de massa e na densidade da fibra com a elevação da concentração de NaOH do tratamento químico. As Tabelas 14 e 15 abaixo mostram o resultado para a perda de massa e densidade das fibras submetidas aos tratamentos descritos no planejamento experimental mostrado na Tabela 06.

Os dados foram avaliados com um software de análise estatística. A seguir são apresentados os resultados obtidos da análise. A Figura 24, conhecida como gráfico de Pareto, mostra a magnitude e a importância de cada fator. O gráfico mostra o valor absoluto dos efeitos em relação a uma linha de referência, qualquer efeito que se estende acima desta linha de referência é potencialmente importante.

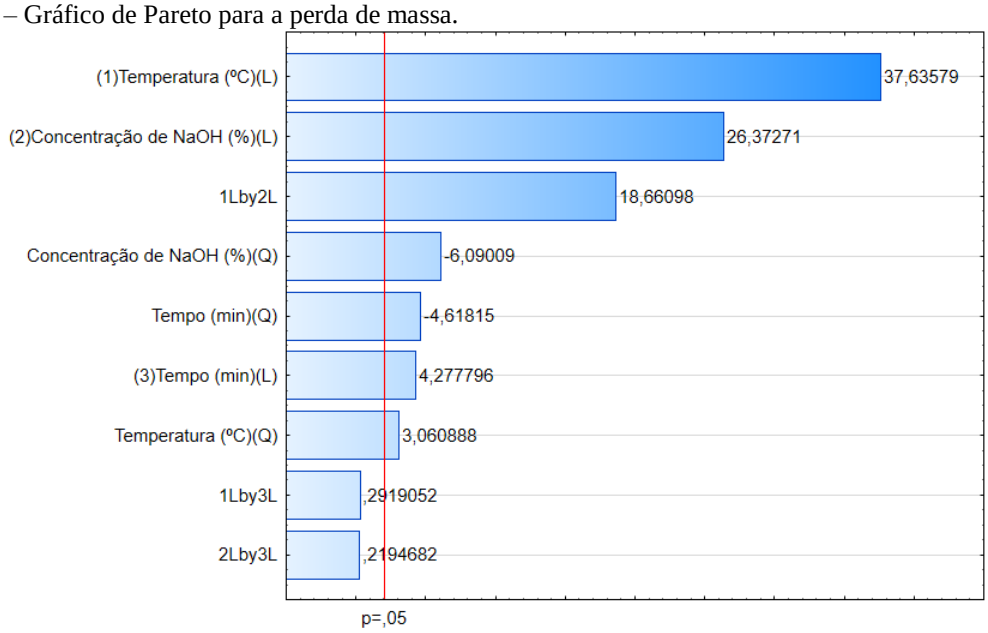
Pode-se perceber que apenas o efeito 1Lby3L (interação entre o primeiro fator – temperatura e o terceiro fator – tempo) e 2Lby3L (interação entre o segundo fator – concentração de NaOH e o terceiro fator – tempo) não apresentaram influência significativa no modelo descrito pelo software. Portanto, esses efeitos foram retirados do modelo. Pode-se perceber que a temperatura da solução e a concentração de NaOH são os efeitos que apresentam as maiores influências na perda de massa.

Tabela 14 – Resultados da perda de massa segundo o planejamento fatorial $2^3$.

| Ensaio 1 | | Ensaio 2 | |
|---|---|---|---|
| Ponto do planejamento | Perda de massa (%) | Ponto do planejamento | Perda de massa (%) |
| 1 | 21,74 | 1 | 21,08 |
| 2 | 22,23 | 2 | 23,11 |
| 3 | 24,71 | 3 | 23,62 |
| 4 | 23,07 | 4 | 22,36 |
| 5 | 25,26 | 5 | 27,75 |
| 6 | 40,91 | 6 | 40,73 |
| 7 | 42,94 | 7 | 42,01 |
| 8 | 28,46 | 8 | 27,64 |
| 9A | 30,79 | 9A | 31,30 |
| 9B | 31,10 | 9B | 31,38 |
| 9C | 31,95 | 9C | 30,47 |
| 9D | 30,26 | 9D | 30,53 |
| 9E | 31,04 | 9E | 31,24 |
| 10 | 28,65 | 10 | 29,11 |
| 11 | 29,66 | 11 | 29,46 |
| 12 | 33,44 | 12 | 33,82 |
| 13 | 23,30 | 13 | 24,58 |
| 14 | 25,48 | 14 | 25,73 |
| 15 | 38,02 | 15 | 36,82 |

Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 24 – Gráfico de Pareto para a perda de massa.




Fonte: autoria própria, 2018.

O modelo matemático gerado pelo software de analise apresentou um $R^2$ de 0,98924 e um R-Ajustado de 0,98673. O modelo é mostrado na equação 45.

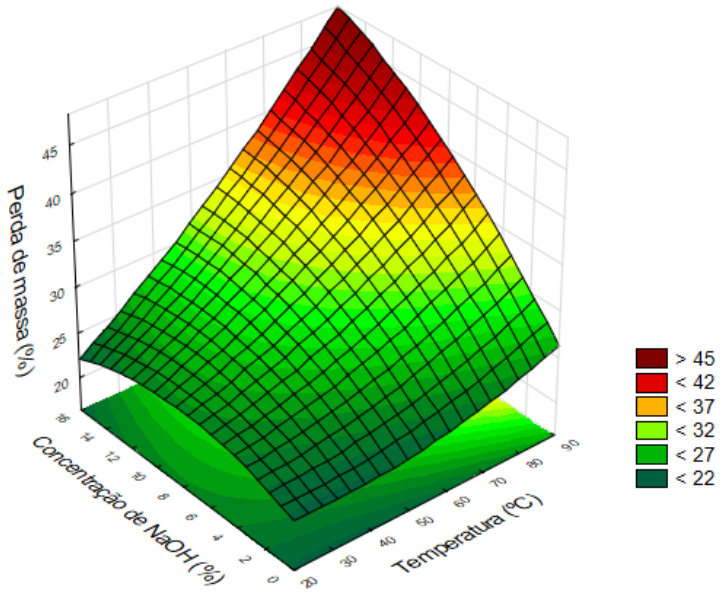
$$Perda\ de\ Massa = 17{,}98564 - 0{,}08381 \cdot \mathrm{X} + 0{,}00135 \cdot X^2 + 0{,}32423 \cdot \mathrm{Y} - 0{,}04301 \cdot Y^2 + 0{,}11690 \cdot \mathrm{Z} - 0{,}00068 \cdot Z^2 + 0{,}01926 \cdot \mathrm{X} \cdot \mathrm{Y} \quad \text{(Eq. 45)}$$

Onde X representa a temperatura do banho, Y representa a concentração de NaOH e Z representa o tempo de banho na solução.

O aumento da perda de massa devido ao aumento nas variáveis de entrada já era esperado, visto que o tratamento alcalino remove materiais cerosos e oleosos que cobrem a superfície da fibra, tornando-a mais limpa (OURE *et al*, 2016). O tratamento alcalino também possui um efeito sobre a composição química das fibras naturais, sendo responsável pela remoção parcial de substâncias de cimentação como lignina e hemicelulose (SUSHEEL KALIA, B.S. KAITH, 2007). SCANAVEZ, 1996, também mostrou que uma aumento na concentração do tratamento químico promove aumento na perda de massa, sendo que foi observado para um tratamento alcalino com 1% uma perda de massa de 24,9 ± 9,8% e para um tratamento alcalino com 5% de NaOH foi registrado uma perda de massa de 43,8 ± 5,7%. ZHANG et al, 2017, Também mostrou que um tratamento alcalino com 5% de NaOH durante duas horas a uma temperatura de 23°C pode provocar uma perda de massa de 15,4%.

A Figura 25 abaixo mostra uma superfície de resposta da perda de massa em função das grandezas avaliadas.

Figura 25 – Superfície de resposta para a perda de massa (em tempo = 75 min).




Fonte: autoria própria, 2018.

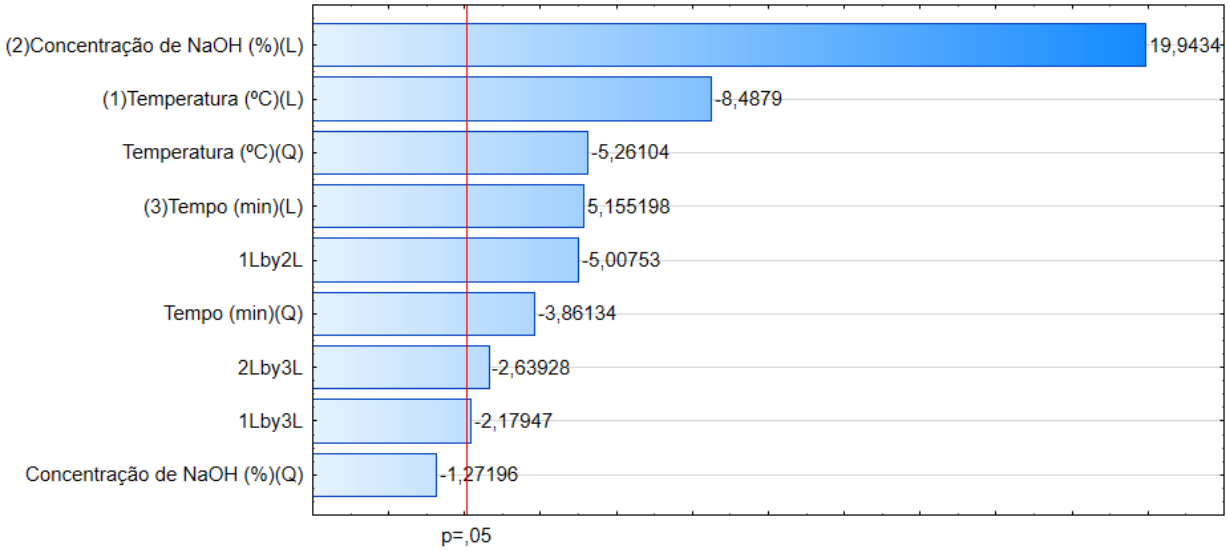
Tabela 15 – Resultados para a densidade segundo o planejamento fatorial $2^3$.

| Ensaio 1 | | Ensaio 2 | |
|---|---|---|---|
| Ponto do planejamento | Densidade (g/cm$^3$) | Ponto do planejamento | Densidade (g/cm$^3$) |
| 1 | 1,245 | 1 | 1,247 |
| 2 | 1,415 | 2 | 1,417 |
| 3 | 1,425 | 3 | 1,429 |
| 4 | 1,328 | 4 | 1,304 |
| 5 | 1,263 | 5 | 1,243 |
| 6 | 1,335 | 6 | 1,338 |
| 7 | 1,346 | 7 | 1,352 |
| 8 | 1,254 | 8 | 1,285 |
| 9A | 1,387 | 9A | 1,378 |
| 9B | 1,383 | 9B | 1,376 |
| 9C | 1,368 | 9C | 1,391 |
| 9D | 1,373 | 9D | 1,370 |
| 9E | 1,380 | 9E | 1,379 |
| 10 | 1,353 | 10 | 1,344 |
| 11 | 1,368 | 11 | 1,379 |
| 12 | 1,415 | 12 | 1,415 |
| 13 | 1,330 | 13 | 1,336 |
| 14 | 1,374 | 14 | 1,361 |
| 15 | 1,354 | 15 | 1,327 |

. Fonte: autoria própria, 2018.

A Figura 26 a seguir apresenta a mesma análise que foram realizadas para a perda de massa.

Figura 26 – Gráfico de Pareto para a densidade.




Fonte: autoria própria, 2018.

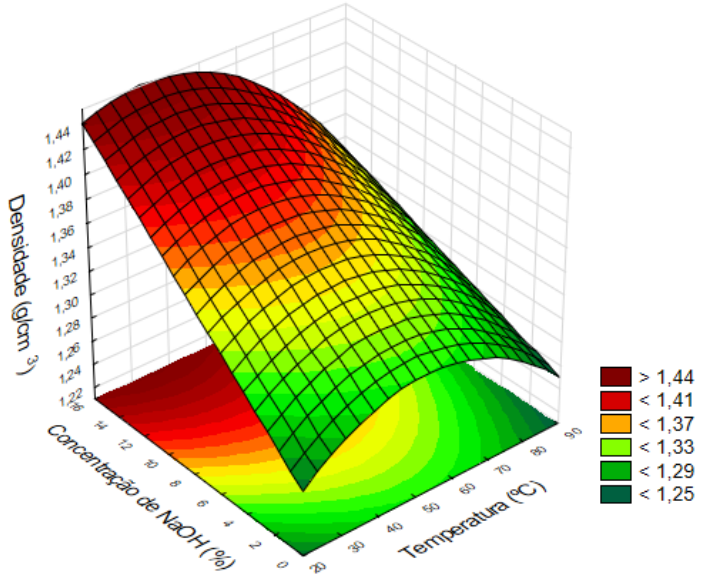
Analisando a Figura 26 pode-se perceber que apenas o efeito quadrático da concentração de NaOH não apresentou influência significativa no modelo descrito pelo software. Portanto, esse efeito foi retirado do modelo. É possível perceber que a temperatura da solução e a concentração de NaOH também foram os efeitos que apresentam as maiores influências na densidade.

O modelo matemático gerado pelo software de analise apresentou um $R^2$ de 0,95779 e um R-Ajustado de 0,94615. O modelo é mostrado na equação 46.

$$Densidade = 1{,}068803 + 0{,}004912\mathrm{X} - 0{,}000043X^2 + 0{,}014813\mathrm{Y} + 0{,}002443\mathrm{Z} - 0{,}000011Z^2 - 0{,}000087\mathrm{XY} - 0{,}000005\,\mathrm{XZ} - 0{,}000027\mathrm{YZ} \qquad (\mathrm{Eq.}\,46)$$

A Figura 27 abaixo mostra uma superfície de resposta da densidade em função das grandezas avaliadas.

Figura 27 – Superfície de resposta para a densidade (em tempo = 75 min).




Fonte: autoria própria, 2018.

A mudança na densidade também pode ser explicada pela remoção de lignina e hemicelulose, que resulta em um crescimento na fração mássica de celulose na fibra. Como a densidade de cristais perfeitos de celulose está localizado entre 1,582 e 1,599 g/cm$^3$ o tratamento alcalino acaba provocando uma aumento da densidade da fibra (KRISHNAIAH *et al.*, 2017). OURE, 2016, reportou também um aumento na densidade da fibra de sisal após o

tratamento alcalino, passando de 1.2965 ± 0.0214 g/cm$^3$ nas fibras não tratadas para 1.4245 ± 0.0286 g/cm$^3$ nas fibras tratadas com 2% de NaOH durante 12h.

É importante notar que o aumento nas propriedades da fibra depende das características (concentração, tempo e temperatura) da solução alcalina. O ponto otimizado do tratamento alcalino só remove parcialmente os materiais amorfos da superfície da fibra, se as propriedades da solução alcalina forem maiores que aquelas apresentadas no ponto otimizado a remoção de material se torna muito intensa e a fibra fica enfraquecida ou danificada, o que leva a uma redução das suas propriedades mecânicas (OURE *et al*, 2016).

### 5.3.2 Ensaio de tração das fibras

Os resultados de tração máxima, deformação máxima, módulo elástico e os diâmetros das fibras de sisal são mostrados na Tabelas 16 para as fibras não tratadas e tratadas com 2%, 5% e 8% de NaOH. Os resultados detalhados de cada ensaios estão expostos no apêndice nas Tabelas A1, A2, A3 e A4 respectivamente.

Tabela 16 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para as fibras.

| Tipo de tratamento | Diâmetro (mm) | Deformação Máxima | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| Sem tratamento | 0,30 ± 0,07 | 0,053 ± 0,016 | 176,60 ± 71,16 | 4215,13 ± 2598,37 |
| 2% | 0,21 ± 0,06 | 0,050 ± 0,013 | 272,22 ± 71,86 | 6427,69 ± 2926,24 |
| 5% | 0,17 ± 0,04 | 0,042 ± 0,009 | 302,24 ± 52,99 | 10755,59 ± 4466,33 |
| 8% | 0,15 ± 0,03 | 0,055 ± 0,012 | 374,66 ± 49,47 | 13267,85 ± 4471,34 |

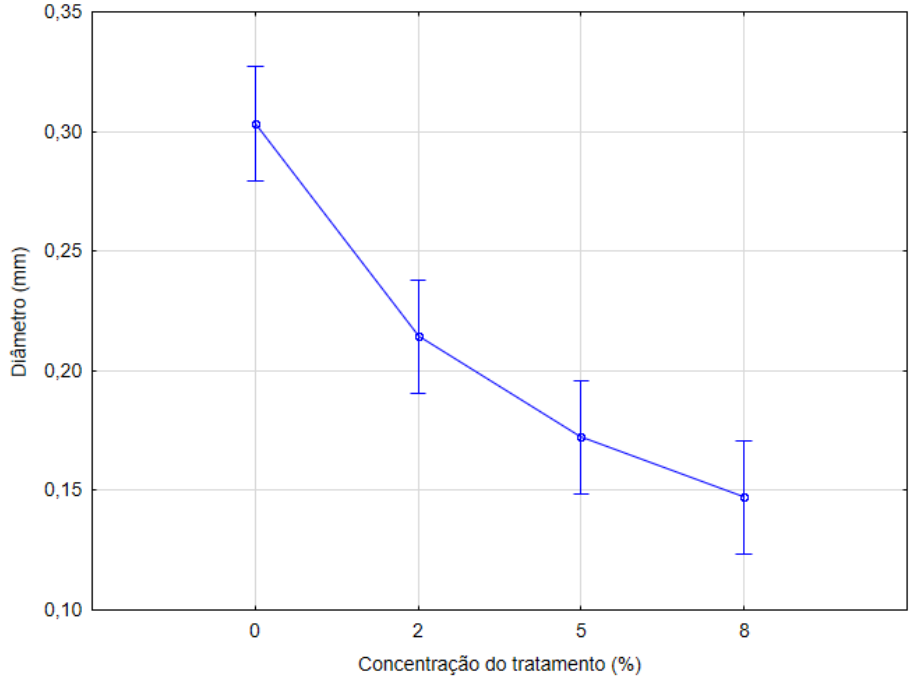
Fonte: autoria própria, 2018.

A seguir, mostram-se os resultados da análise de variância dos resultados obtidos. Como pode ser observado na Figura 28 a análise de variância mostrou que todos os tratamento químicos provocaram diminuição do diâmetro, quando comparadas com a fibra não tratada, sendo que quanto maior a concentração do tratamento maior foi a redução provocada no diâmetro. Estatisticamente alguns níveis de concentração apresentaram valores iguais, onde as fibras tratadas com 2% apresentaram o mesmo diâmetro que as tratadas com 5 % e as fibras

tratadas com 5 % apresentaram o mesmo diâmetro que as tratadas com 8%, porém as fibras tratadas com 2% apresentaram um diâmetro diferente das tratadas com 8%.

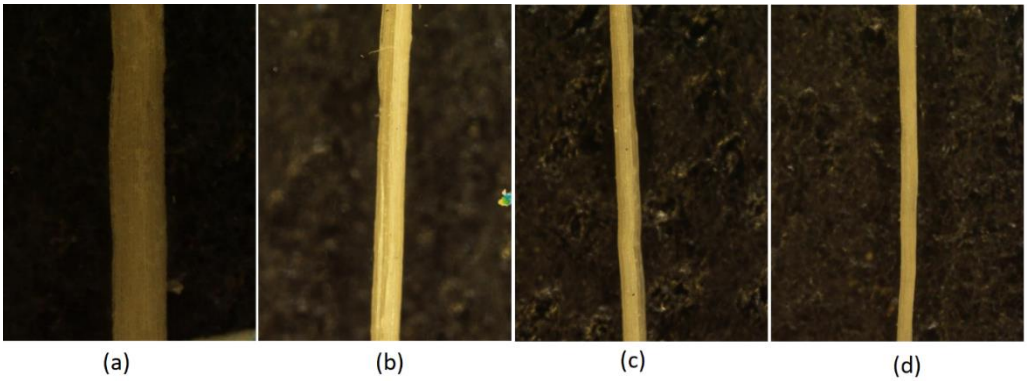
ZHANG *et al*,2017, também demostrou a redução do diâmetro das fibras de sisal quando submetidas ao tratamento alcalino, foi reportado em seu trabalho um diâmetro de 173.3 ± 31 µm para fibras não tratadas e 142.6 ± 18 µm para fibras tratadas com 5% de NaOH durante duas horas à uma temperatura de 23 ºC. A redução do diâmetro também está associada à remoção das impurezas superficiais e ao encolhimento da lúmen (ZHANG *et al*, 2017). A Figura 29 mostra imagens que exemplificam a redução do diâmetro das fibras.

Figura 28 – Análise de variância dos dados de diâmetro das fibras de sisal submetidos a diferentes tratamentos.




Fonte: autoria própria, 2018.

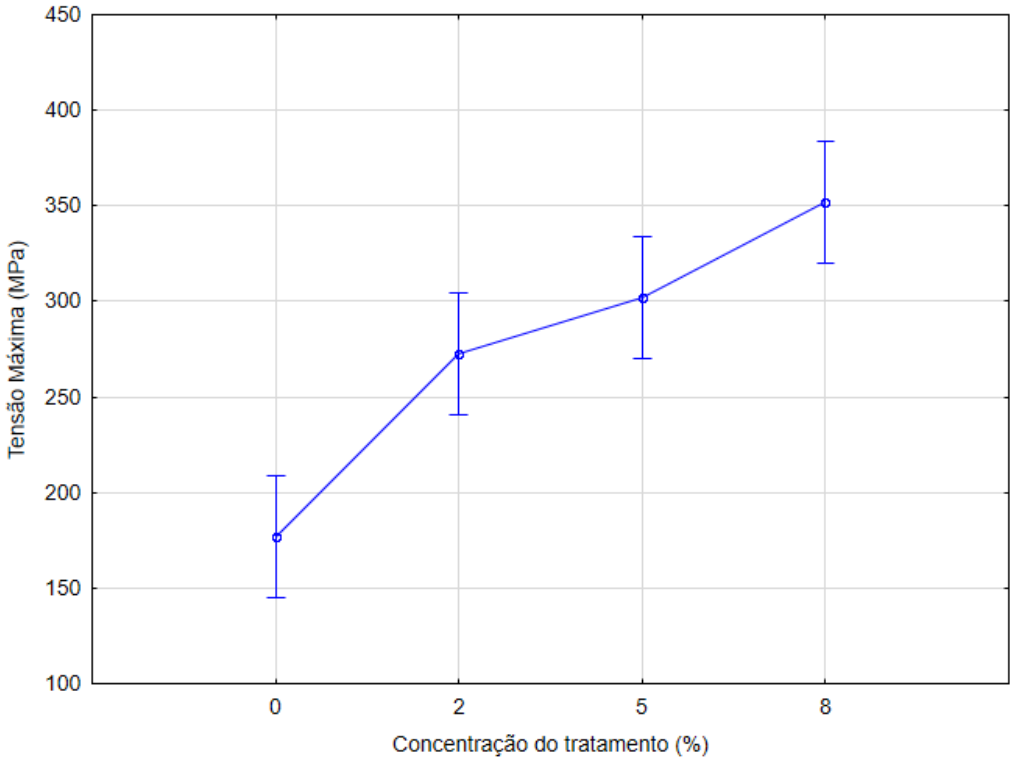
Figura 29 – Diâmetro das fibras.




Legenda: a – fibra sem tratamento; b – fibra tratada com 2%, c – fibra tratada com 5%, d – fibra tratada com 8%. Ampliação de 5x, onde 255 pixels = 0,01 mm.
Fonte: autoria própria, 2018.

As Figuras 30 e 31 mostram a análise de variância para os dados de tensão máxima e do módulo de elasticidade das fibras submetidas a diferentes tratamentos químicos respectivamente.

Figura 30 – Análise de variância dos dados de tensão máxima das fibras de sisal submetidos a diferentes tratamentos.

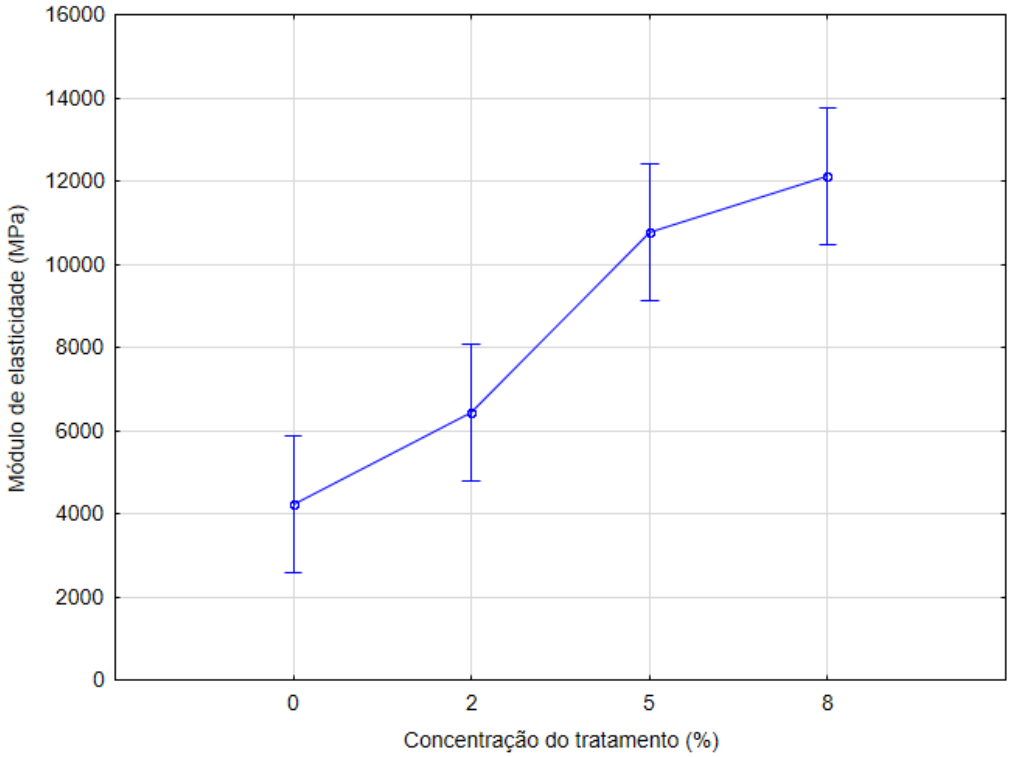



Fonte: autoria própria, 2018.

Como pode ser observado na Figura 30 a análise de variância mostrou que todos os tratamentos químicos provocaram aumento na tensão máxima suportada pela fibra, quando comparadas com a fibra não tratada, sendo que quanto maior a concentração do tratamento maior foi o aumento de tensão máxima. Novamente alguns níveis de tratamento apresentaram dados estatisticamente iguais.

ZHANG *et al*,2017, também demostrou o aumento na tensão máxima das fibras de sisal quando submetidas ao tratamento alcalino, foi reportado em seu trabalho uma tensão máxima de 529,9 ± 102 MPa para fibras não tratadas e 692,9 ± 92 MPa para fibras tratadas com 5% de NaOH durante duas horas a uma temperatura de 23 ºC. IZANI *et al* ,2013, também mostrou resultados semelhantes, apresentando uma tensão máxima de 52 MPa para fibras não tratadas e 64 MPa para fibras tratadas com 2% de NaOH durante 30 min.

Figura 31 – Análise de variância dos dados de módulo de elasticidade das fibras de sisal submetidos a diferentes tratamentos.




Fonte: autoria própria, 2018.

Como pode ser observado na Figura 31 a análise de variância mostrou que apenas os tratamentos químicos de 5% e 8% de NaOH provocaram aumento no módulo de elasticidade, quando comparadas com a fibra não tratada, sendo que quanto maior a concentração do tratamento maior foi o aumento no módulo de elasticidade. Quando comparadas entre si, as fibras tratadas com 5% apresentaram valores de módulo de elasticidade estatisticamente iguais as fibras tratadas com 8%.

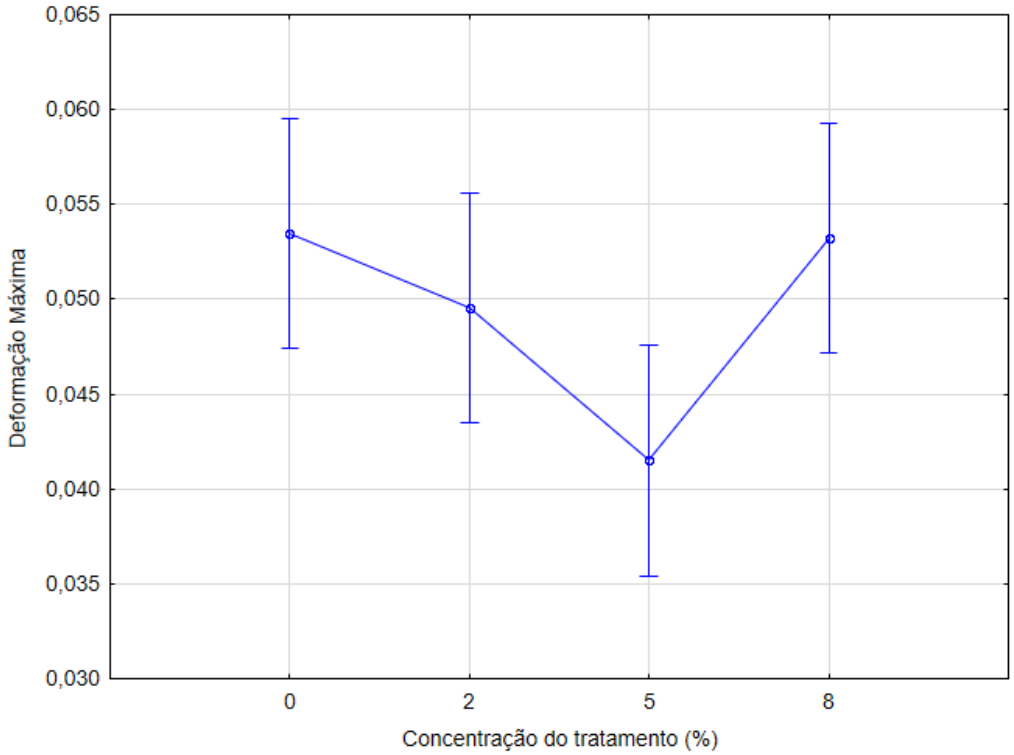
ZHANG *et al*,2017, também demostrou o aumento no módulo de elasticidades das fibras de sisal quando submetidas ao tratamento alcalino, foi reportado em seu trabalho um módulo de elasticidade de 13,6 ± 2,9 GPa para fibras não tratadas e 18,8 ± 3 GPa para fibras tratadas com 5% de NaOH durante duas horas a uma temperatura de 23 ºC. MOHAN e KANNY ,2012, também mostrou resultados semelhantes, apresentando um módulo de elasticidade de 33 GPa para fibras não tratadas e 37 GPa para fibras tratadas com 40% de NaOH durante 60 min.

Os resultados anteriores, de tensão máxima e módulo de elasticidade, também podem ser explicados pela mudança na composição química e estrutural provocada pelo tratamento alcalino. Além de aumentar a fração mássica de celulose nas fibras, como já explicado

anteriormente, o tratamento alcalino de fibras naturais provoca uma redução no ângulo espiral das microfibrilas de celulose melhorando a resistência à tração (IZANI *et al*., 2013). Dessa forma, um tratamento alcalino de baixa concentração, torna as microfibrilas mais capazes de se reorganizar ao longo das direções de deformação por tração, uma vez que a região interfibrilar é menos densa e menos rígida devido a remoção de hemicelulose (ROCHA *et al*., 2015).

A Figura 32 mostra a deformação máxima das fibras de sisal. É possível observar que o tratamento alcalino não teve influência na deformação máxima sofrida. As deformações em todos os níveis de tratamento químico foram estatisticamente iguais.

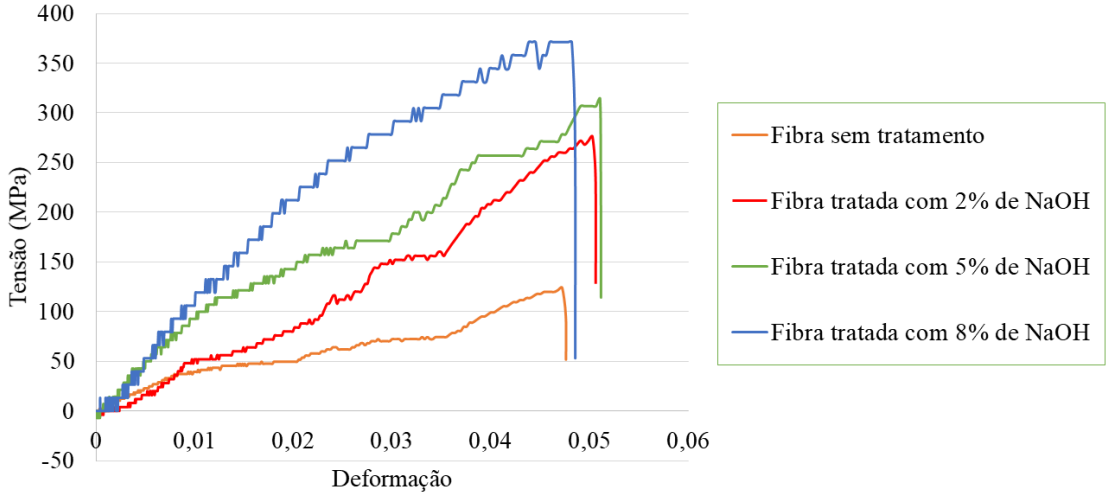
Figura 32 – Influência do tratamento químico na deformação máxima das fibras de sisal.




Fonte: autoria própria, 2018.

A Figura 33 mostra o diagrama tensão x deformação para as fibras tratadas e não tratadas. Nessa imagem é possível observar graficamente a influência do tratamento químico nas propriedades da fibra. Também é possível perceber que independente do tratamento o desempenho da fibra foi o mesmo, apresentando um comportamento praticamente elástico até a ruptura. Não foi possível observar a formação de zonas de estricção antes da ruptura da fibra.

Figura 33 – Diagrama tensão x deformação para as fibras tratadas e não tratadas.




Fonte: autoria própria, 2018.

### 5.3.3 Propriedades mecânicas do compósito unidirecional

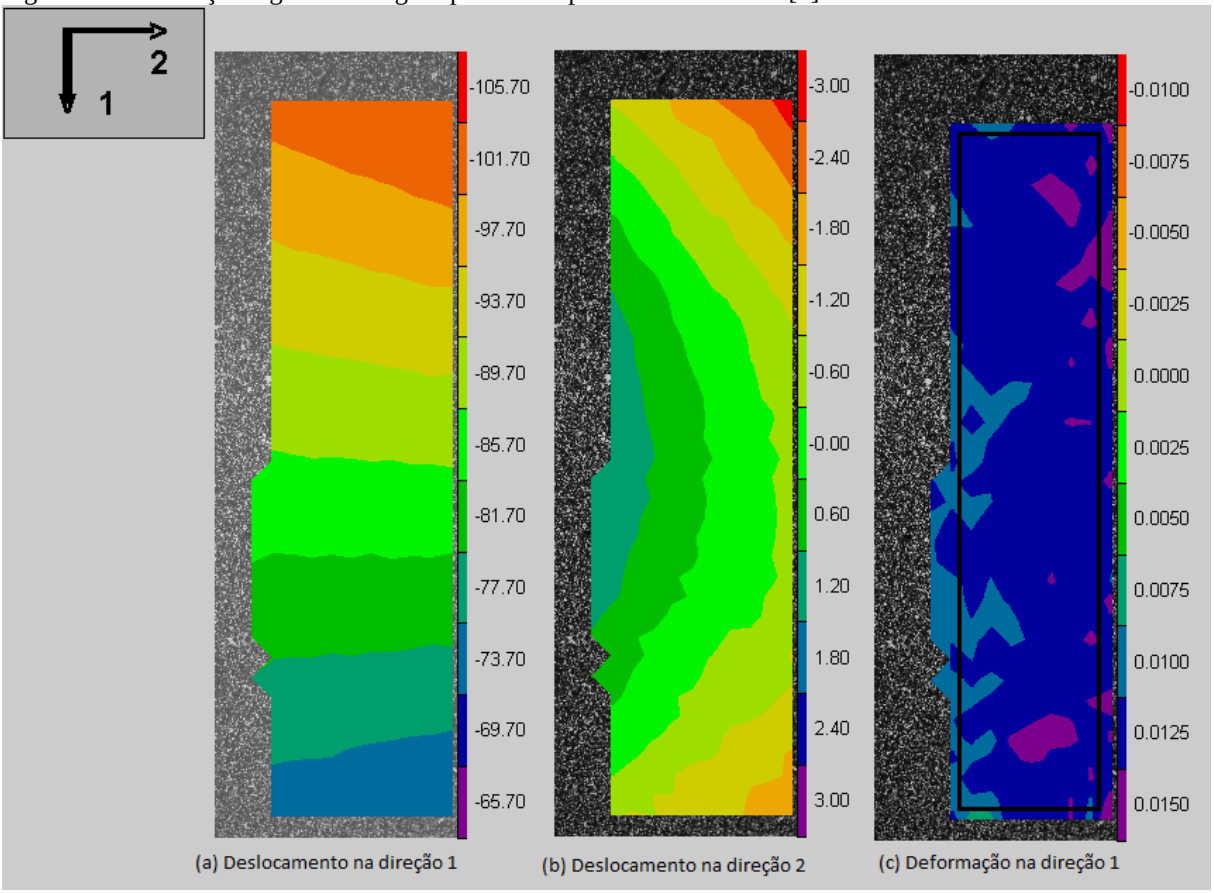
A seguir é mostrada a influência do tratamento químico nas propriedades finais do compósitos unidirecionais. Todos os compósitos foram fabricados com uma composição de 20% de fibra e tracionados no sentido da fibra, ou seja todos os compósitos aqui testados são do tipo [0].

A Figura 34 mostra os resultados obtidos através da correlação digital de imagens para o ensaio 1 do compósito unidirecional sem tratamento, todos os outros compósitos apresentaram resultados semelhantes.

O comportamento do compósito foi semelhante ao apresentado pela resina. Na Figura 34 (a) podemos ver o deslocamento vertical sofrido por cada região. Novamente não houve variação brusca nas faixas de deslocamento e a deformação sofrida nessa direção é praticamente uniforme em todo o corpo de prova, como observado na Figura 34 (c).

O comportamento do deslocamento na horizontal também foi semelhante ao apresentado pela resina, conforme mostrado na terceira Figura 34 (b). Novamente existe uma região do corpo de prova que sofre um deslocamento positivo enquanto outra região sofre um deslocamento negativo. Também não temos variação brusca nesse deslocamento nem concentração de deformação. Também não foi observado a formação do empescoçamento e a ruptura do corpo de prova ocorreu de forma brusca.

Figura 34– Correlação digital de imagens para o compósito unidirecional [0].




Fonte: autoria própria, 2018. (Escala de deslocamento, 1 pixels = 0,0156 mm).

A Tabela 17 mostra os resultados da correlação digital de imagens para os compósitos unidirecionais [0] confeccionados com fibras tratadas e não tratadas. O gauge utilizado nas análises é mostrado na Figura 34 (c) (retângulo preto).

Observando os resultados da Tabela 17 é possível perceber que a adição de fibra, sem ou com tratamento, provocou um aumento do limite de resistência a tração e módulo de elasticidade quando comparado ao da resina pura, que apresentou um valor médio de 40,95 ± 2,19 MPa para o tensão máxima e 2169,22 ± 301,47 MPa para o módulo de elasticidade. Também pode ser observado que as equações teóricas não apresentaram uma boa capacidade para a previsão das propriedades mecânicas do compósito, apesar de alguns resultados estarem na mesma ordem de grandeza que os valores reais, evidenciando a necessidade de um melhor modelamento das propriedades dos compósitos reforçados com fibras naturais. Isso se deve principalmente as várias considerações hipotéticas assumidas nos modelamentos micro e macromecânicos que não acontecem na prática (exemplo: a união entre fibras e matriz é perfeita; os módulos de elasticidade, diâmetros e espaços entre as fibras são uniformes; as fibras são contínuas e paralelas; os compósitos não possuem vazios e falhas; a deformação máxima

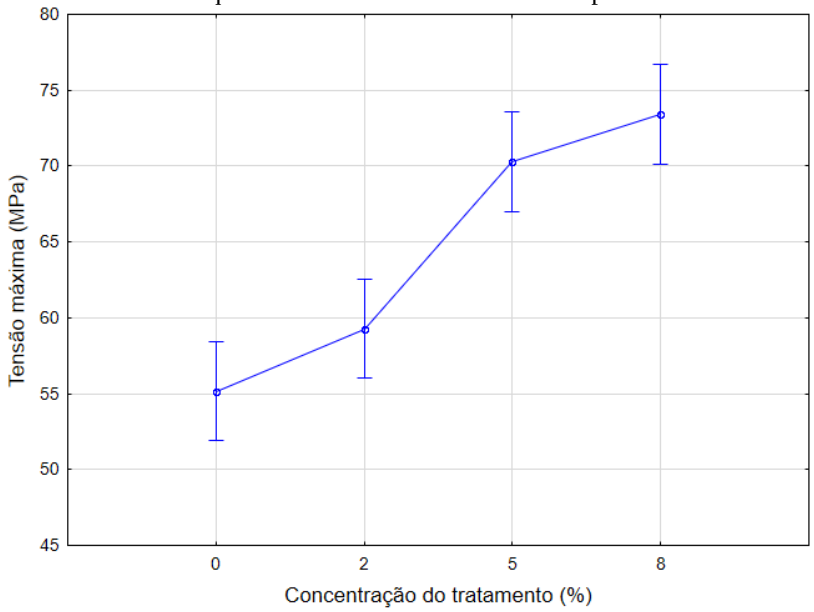
para a matriz é maior do que para a fibra). A Figura 35 mostra a análise de variância para os dados de tensão máxima dos compósitos unidirecionais tratados e não tratados.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos unidirecionais [0].

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Sem tratamento | | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
| | Valor real | 55,17 ± 4,64 | 3983,87 ± 148,49 | 0,0136 ± 0,0010 |
| | Valor teórico | 128,14 | 2578,40 | ------- |
| Tratado com 2% de NaOH | | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
| | Valor real | 59,29 ± 0,22 | 4505,28 ± 189,22 | 0,0130 ± 0,0012 |
| | Valor teórico | 140,47 | 3020,92 | ------- |
| Tratado com 5% de NaOH | | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
| | Valor real | 70,28 ± 1,48 | 4756,85 ± 201,09 | 0,0141 ± 0,0004 |
| | Valor teórico | 132,49 | 3886,49 | ------- |
| Tratado com 8% de NaOH | | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
| | Valor real | 73,41 ± 4,89 | 4823,63 ± 168,84 | 0,0149 ± 0,0009 |
| | Valor teórico | 169,86 | 4388,95 | ------- |

Legenda: Valores teóricos calculados pelas equações 19 e 22. Os valores detalhados dos ensaios de cada compósito encontram-se no apêndice, tabela A5.
Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 35 – Influência do tratamento químico na tensão máxima dos compósitos unidirecionais [0].

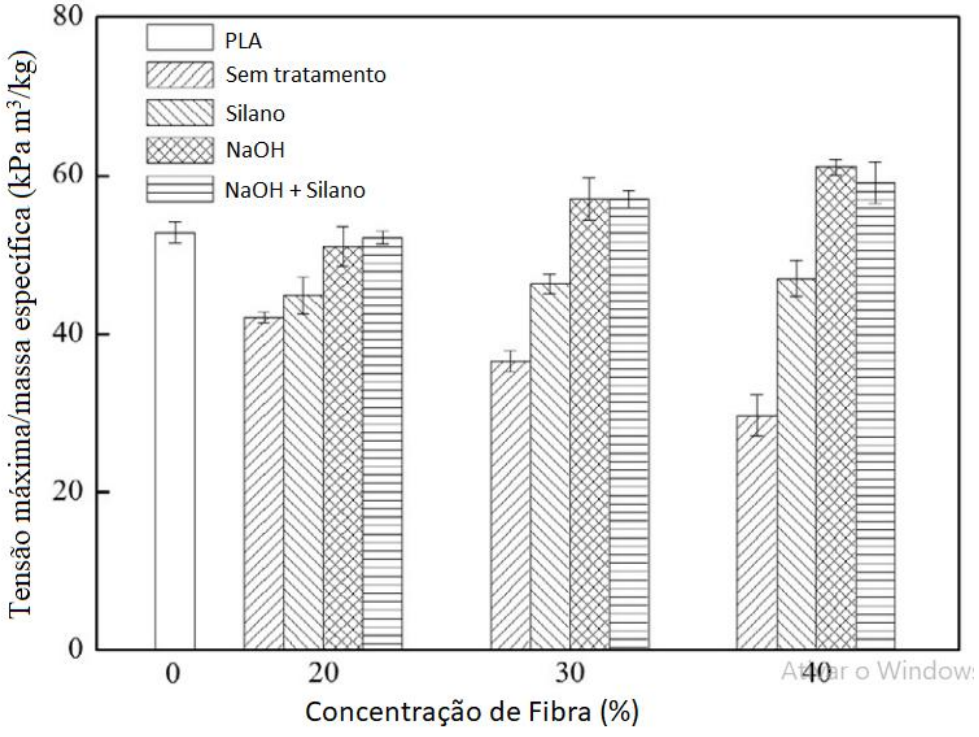



Fonte: autoria própria, 2018.

Como pode ser observado na Figura 35 a análise de variância mostrou que apenas os compósitos fabricados com fibras tratadas com 5% e 8% de NaOH apresentaram aumento na tensão máxima, quando comparados com o compósito fabricado com as fibras não tratadas, sendo que quanto maior a concentração do tratamento maior foi o aumento na tensão máxima. Quando comparadas entre si, os compósitos confeccionado utilizando as fibras tratadas com 5% apresentaram valores de tensão máxima estatisticamente iguais aos compósitos confeccionado utilizando as fibras tratadas com 8%.

ORUE *et al* ,2016, também demostrou o aumento que o tratamento químico das fibras de sisal com NaOH pode provocar na tensão máxima dos compósitos, como observado na Figura 36. Nesse trabalho foram utilizados compósitos com matriz de PLA reforçados com fibras não tratadas e tratadas com 2% de NaOH durante 12 horas. JOSEPH, THOMAS e PAVITHRAN, 1996, também reportaram um aumento da tensão máxima em compósitos de matriz LDPE, passando de um valor de 21,66 ± 0,1885 MPa em compósitos utilizando fibras de sisal não tratadas para 24,24 ± 0,173 MPa em compósitos utilizando fibras de sisal tratadas com 10% de NaOH durante uma hora. PENG *et al*, 2010, demonstrou que compósitos de matriz fenólica reforçados com fibras tratados com 2% de NaOH a uma temperatura de 90 ºC durante uma hora e meia apresentam tensão máxima de 28.7 ± 2.1 MPa enquanto que compósitos fabricados com fibras naturais apresentam uma valor de 22.4 ± 1.8 MPa.

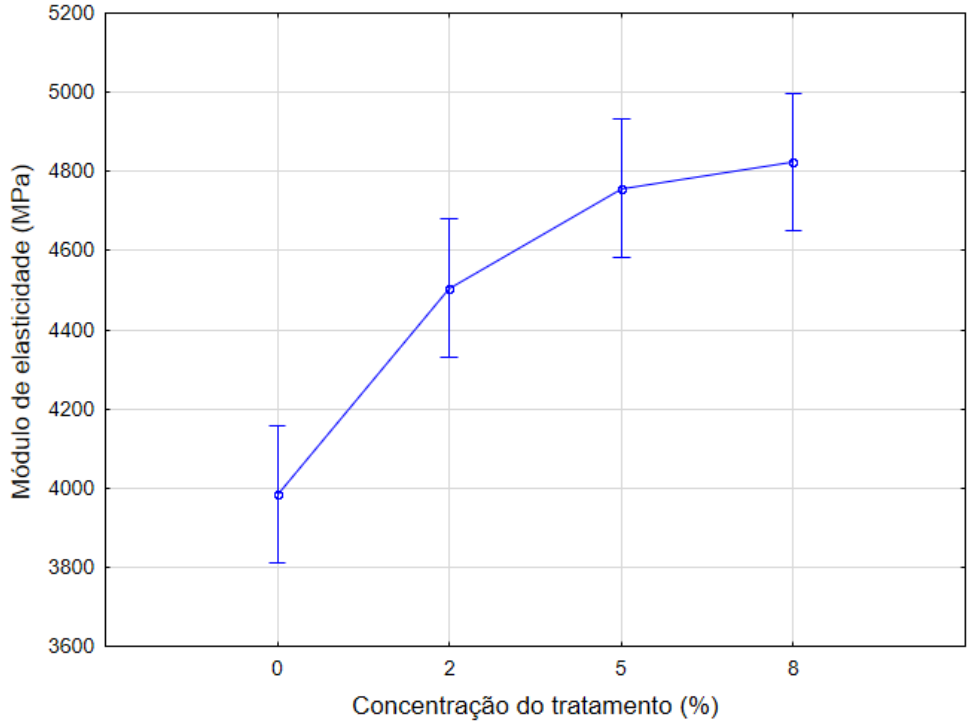
Figura 36 – Resultados semelhantes para o aumento de tensão máxima provocada pelo tratamento químico.




Fonte: adaptado de ORUE *et al*, 2016.

A Figura 37 mostra a análise de variância para os dados de módulo de elasticidade dos compósitos unidirecionais tratados e não tratados.

Figura 37 – Influência do tratamento químico no módulo de elasticidade dos compósitos unidirecionais [0].



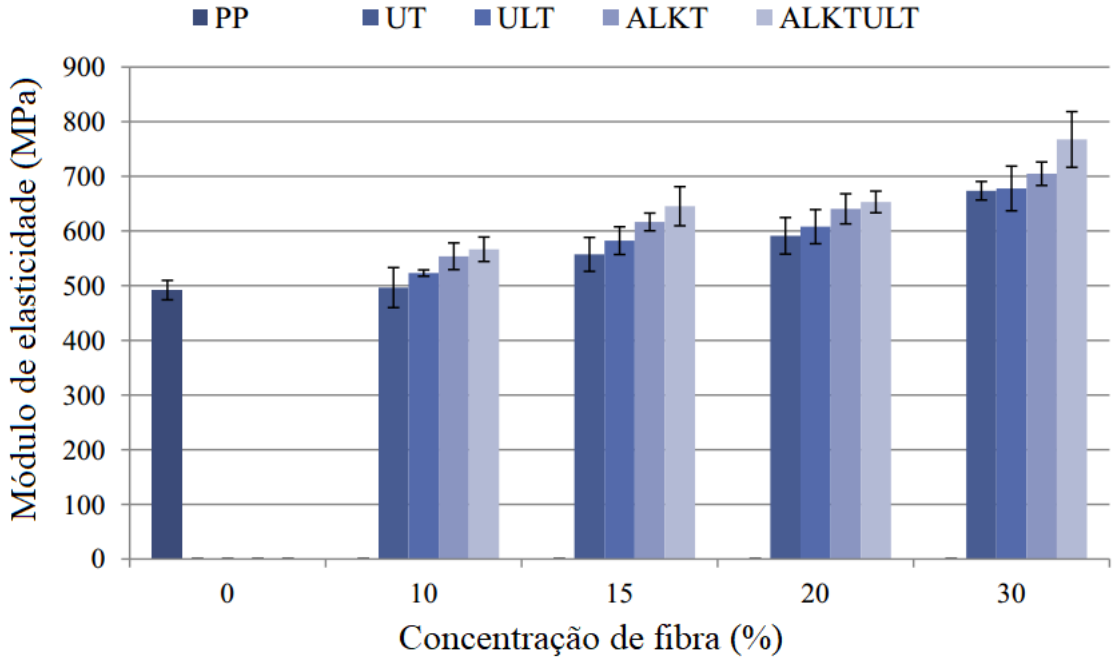

Fonte: autoria própria, 2018.

Como pode ser observado na Figura 37 a análise de variância mostrou que todos os compósitos fabricados com fibras tratadas apresentaram aumento no módulo de elasticidade, quando comparados com o compósito fabricado com as fibras não tratadas, sendo que quanto maior a concentração do tratamento maior foi o aumento no módulo de elasticidade. Quando comparadas entre si, os compósitos confeccionados utilizando as fibras tratadas apresentaram valores de módulo de elasticidade estatisticamente iguais.

KRISHNAIAH *et al* ,2017, também demostrou o aumento que o tratamento químico das fibras de sisal com NaOH pode provocar no módulo de elasticidade dos compósitos, como observado na Figura 38. Nesse trabalho foram utilizados compósitos com matriz de polipropileno reforçados com fibras não tratadas e tratadas com 7% de NaOH durante 24 horas. JOSEPH, THOMAS e PAVITHRAN, 1996, também reportaram um aumento no módulo de elasticidade em compósitos de matriz LDPE, passando de um valor de 2088 ± 0,2098 MPa em compósitos utilizando fibras de sisal não tratadas para 2326 ± 0,1985 MPa em compósitos utilizando fibras de sisal tratadas utilizando 10% de NaOH durante uma hora. SREEKUMAR *et al* ,2009, demonstrou que compósitos de poliéster isoftálico reforçados com fibras de sisal

tratadas com 5% de NaOH durante 30 min apresentam módulo de elasticidade de 3002 ± 45 MPa enquanto os compósitos de mesma matriz reforçados com sisal natural apresenta um valor de 2196 ± 54 MPa.

Figura 38 – Resultados semelhantes para o aumento do módulo de elasticidade provocado pelo tratamento químico.

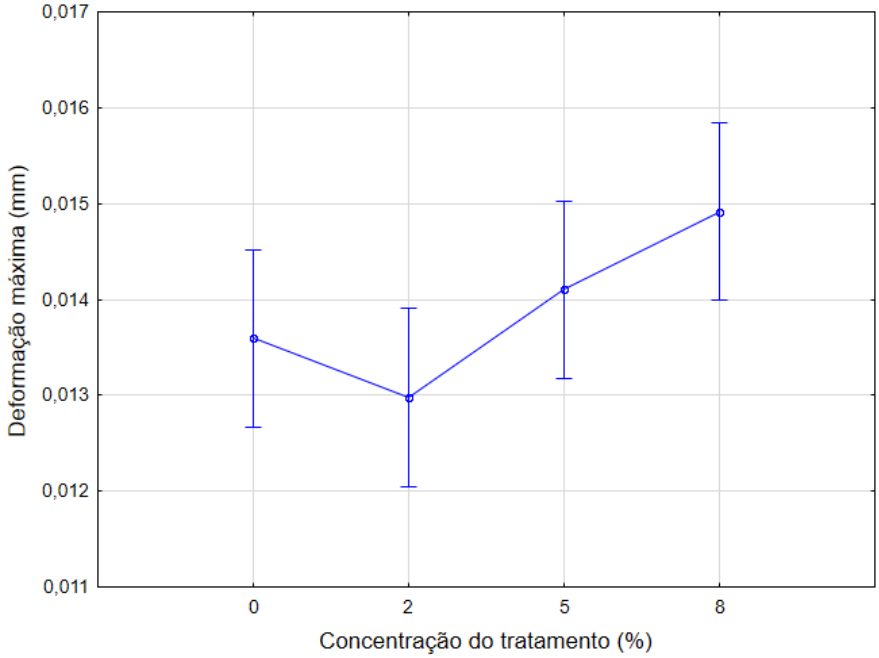



Legenda – PP: Polipropileno; UT: Sem tratamento; ULT: Tratado com ultrassom; ALKT: Tratamento alcalino; ALKT-ULT: Tratamento alcalino combinado com ultrassom.
Fonte: Adaptado de KRISHNAIAH *et al* ,2017.

Como observado o tratamento alcalino provocou um aumento na tensão máxima e no módulo de elasticidade dos compósitos, quando comparadas aos compósitos confeccionados com fibras não tratadas. Esse aumento já era esperado, conforme explicado no referencial teórico, devido a melhoria na adesão entre fibra e matriz provocada pelo tratamento alcalino. Além disso, o tratamento alcalino provocou melhorias nas propriedades do reforço, como as propriedades do compósito são dependentes das características dos seus constituintes a melhoria nos limites de tensão e módulo de elasticidade do compósito já eram previsíveis, como mostrado pelas equações teóricas.

A Figura 39 mostra a análise de variância para os dados de deformação sofrida pelos compósitos unidirecionais tratados e não tratados. Como pode ser observado, o tratamento químico não apresentou influência na deformação. Isso já era esperado, visto que a deformação da fibra também não foi influenciada pelo tratamento. Resultados semelhantes foram obtidos por KRISHNAIAH *et al* ,2017, ORUE *et al* ,2016 e JOSEPH, THOMAS e PAVITHRAN, 1996.

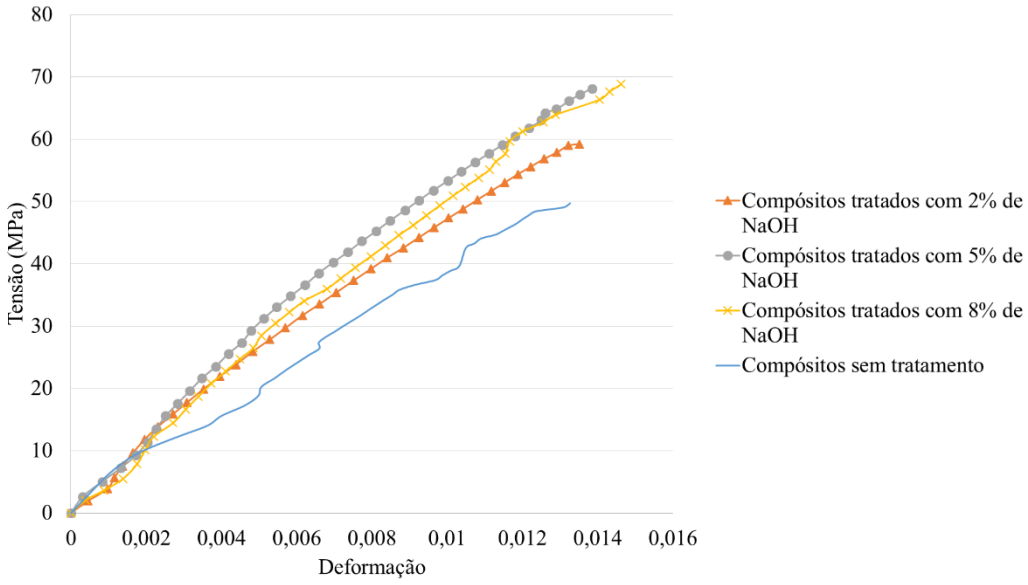
Figura 39 – Influência do tratamento químico na deformação máxima dos compósitos [0].




Fonte: autoria própria, 2018.

A Figura 40 mostra o diagrama tensão x deformação para os compósitos tratados e não tratados. Nessa imagem é possível observar graficamente a influência do tratamento químico nas propriedades dos compósitos. Também é possível perceber que independente do tratamento o comportamento do compósito foi o mesmo, apresentado um comportamento elástico até a ruptura. É importante frisar que em todos os compósitos não ocorreu a formação de estricções e a falha ocorreu de forma brusca.

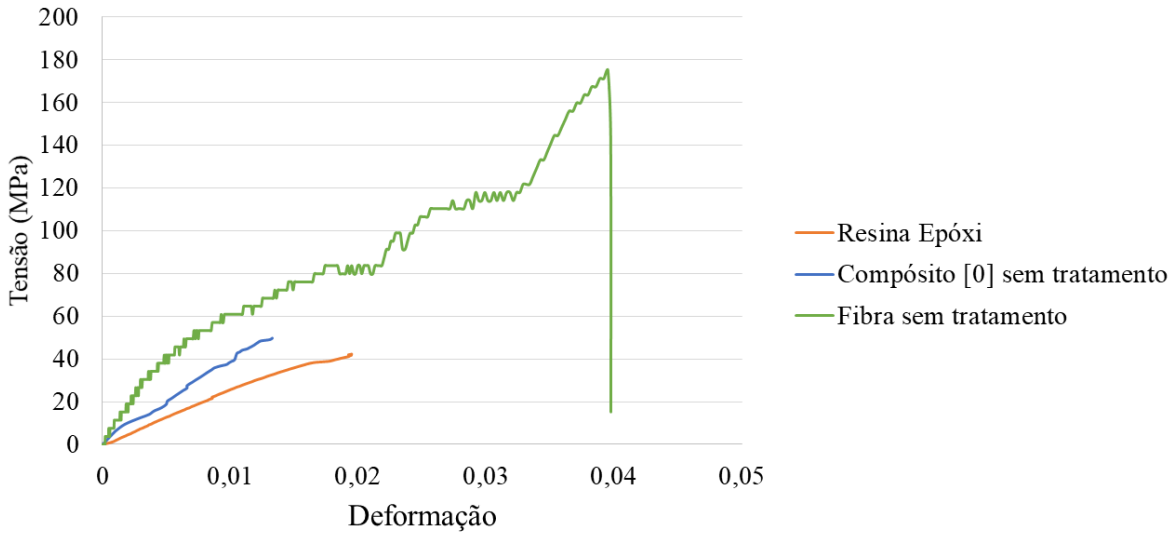
Figura 40 – Diagrama tensão x deformação para os compósitos unidirecionais [0] tratados e não tratados.




Fonte: autoria própria, 2018.

A Figura 41 mostra uma comparação do diagrama tensão x deformação do sisal sem tratamento, dos compósitos [0] confeccionados com essas fibras e da resina pura. Todos os outros casos dos compósitos [0] com tratamento apresentaram comportamento semelhante. Nessa imagem é possível observar graficamente a influência da adição da fibra, como agente de reforço, nas propriedades do material final. Como é possível observar, a utilização do sisal como reforço promoveu um aumento no limite de resistência a tração e no módulo de elasticidade do compósito, que apresentou propriedades intermediarias aos seus constituintes básicos.

Figura 41 – Comparação entre as propriedades dos constituintes do compósito [0] sem tratamento.




Fonte: autoria própria, 2018.

## 5.4 INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO DAS FIBRAS

A seguir são apresentados os resultados da influência da orientação das fibras nas propriedades mecânicas do compósitos. Todos os compósitos foram confeccionados utilizando fibras sem tratamento e uma concentração de sisal de 20%.

### 5.4.1 Propriedades mecânicas do compósito unidirecionais [0]

Os resultados de tração e as figuras geradas pela correlação digital de imagens dos compósitos unidirecionais testados do sentido da fibra [0] já foram apresentados no tópico 5.3.3, e a seguir, na Tabela18, serão mostrados os resultados de flexão.

Tabela 18 – Resultados do ensaio de flexão para os compósitos unidirecionais [0].

| Ensaio | Tensão Máxima (MPa) | Deflexão Máxima (mm) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|
| 1 | 117,01 | 7,37 | 5591,27 |
| 2 | 121,38 | 8,79 | 5194,95 |
| 3 | 117,76 | 8,78 | 5514,67 |
| 4 | 132,19 | 8,82 | 5574,22 |
| 5 | 116,06 | 8,79 | 5428,22 |
| Média | 120,88 ± 6,63 | 8,51 ± 0,64 | 5460,67 ± 161,65 |

Fonte: autoria própria, 2018.

Também é possível notar que quando todas as fibras estão alinhadas e o compósito é flexionado no sentido do reforço as propriedades mecânicas de flexão são aumentadas quando comparadas a da resina pura que apesentou um valor de 72,55 ± 6,22 MPa para tensão máxima e 3429,90 ± 271,57 MPa para o módulo de elasticidade.

### 5.4.2 Propriedades mecânicas do compósito unidirecionais [90]

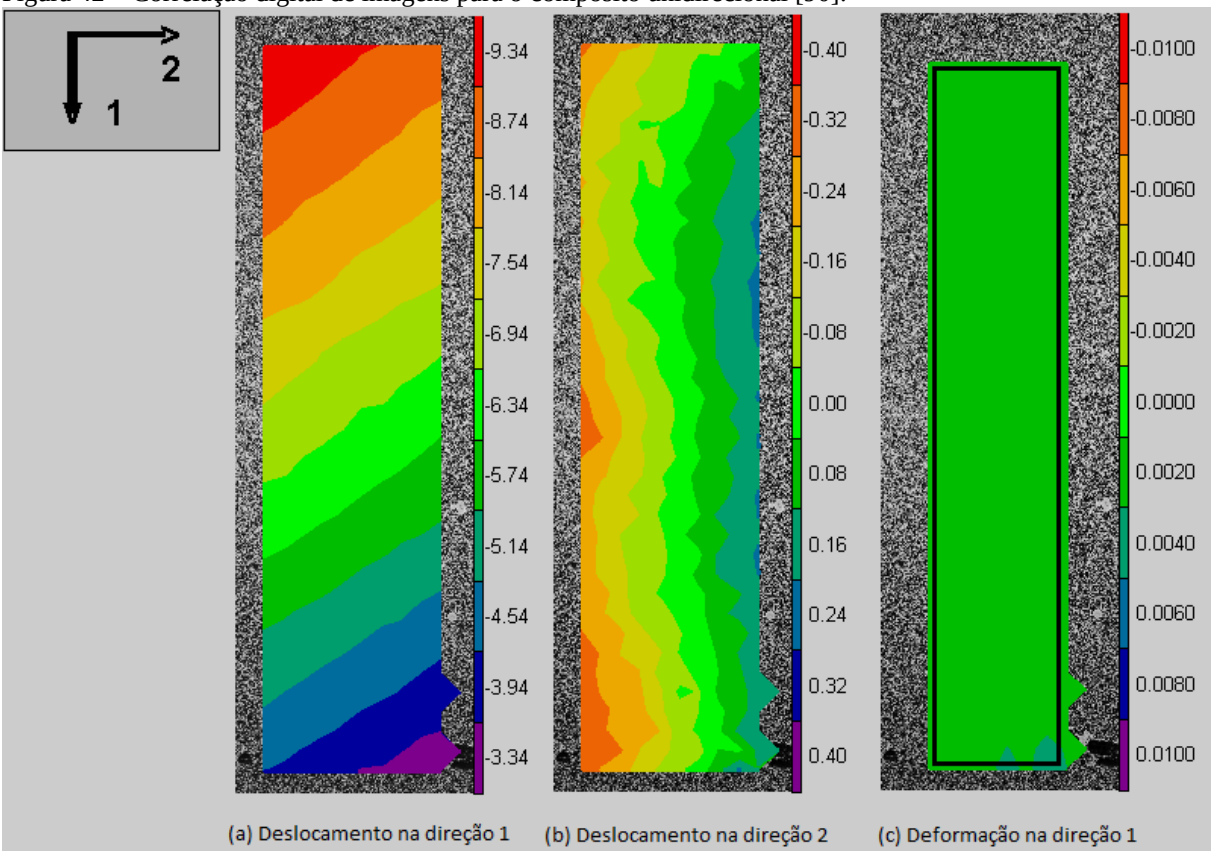
A seguir são mostrados os resultados do ensaio de tração dos compósitos unidirecionais testados perpendicularmente à fibra [90]. A Figura 42 mostra os resultados obtidos através da correlação digital de imagens para o ensaio 1 do compósito unidirecional [90], todos os outros compósitos apresentaram resultados semelhantes.

Como é possível notar o comportamento desse compósito foi semelhante aos resultados já apresentados. Mais uma vez houve uma deformação uniforme de todo o corpo de prova e não foi observado a formação do empescoçamento antes da ruptura, que ocorreu de forma repentina. O comportamento das faixas de deslocamento também foi semelhante ao já apresentado anteriormente.

A grande diferença existente entre o resultado do compósito unidirecional [90] para os outros já apresentados está na variação máxima existente no resultado de deslocamento e

deformação. Enquanto o compósito [0] apresentou uma variação total de 40 pixels (0,624 mm) na faixa de deslocamento vertical e 6 pixels (0,0936 mm) na faixa de deslocamento horizontal, o compósito [90] apresentou uma variação total de 6 pixels (0,1002 mm) e 0,8 pixels (0,01336 mm) respectivamente. Demostrando que o compósito [90] realmente não suporta tantos esforços quanto o [0]. O mesmo efeito ocorre na deformação, sendo apresentado uma deformação máxima de 0,0136 ± 0,0010 para o compósito [0] e um valor de 0,00232 ± 0,00060 para o compósito [90].

Figura 42 – Correlação digital de imagens para o compósito unidirecional [90].




Fonte: autoria própria, 2018. (Escala de deslocamento, 1 pixels = 0,0167 mm).

A Tabela 19 mostra os resultados da correlação digital de imagens para os compósitos unidirecionais [90]. O gauge utilizado nas análises é mostrado na Figura 42 (c) (retângulo preto).

Tabela 19 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos unidirecionais [90].

| Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
|---|---|---|---|
| 1 | 3,21 | 1043,66 | 0,00243 |
| 2 | 3,11 | 1101,59 | 0,00193 |
| 3 | 2,85 | 1459,79 | 0,00193 |
| 4 | 3,28 | 943,88 | 0,00332 |
| 5 | 2,69 | 1160,09 | 0,00197 |
| Média | 3,03 ± 0,25 | 1141,80 ± 194,85 | 0,00232 ± 0,00060 |
| Valor teórico | 37,54 | 2402,44 | ------- |

Legenda: Valores teóricos calculados pelas equações 20 e 24.
Fonte: autoria própria, 2018.

Os resultados apresentados acima mostram que ocorre uma redução consideravelmente grande nas propriedades mecânicas do compósito unidirecional quando ele é testado no sentido da fibra para quando ele é testado perpendicularmente ao reforço. Também é possível observar que novamente as equações teóricas apresentaram valores bem distantes em relação ao valor real. A Tabela 20 mostra os resultados do ensaio de flexão para os compósitos unidirecionais [90].

Tabela 20 – Resultados do ensaio de flexão para os compósitos unidirecionais [90].

| Ensaio | Tensão Máxima (MPa) | Deflexão Máxima (mm) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|
| 1 | 18,23 | 2,77 | 1845,77 |
| 2 | 13,93 | 1,53 | 1875,71 |
| 3 | 16,44 | 1,94 | 1863,84 |
| 4 | 18,50 | 1,46 | 1970,57 |
| 5 | 14,95 | 2,08 | 1944,94 |
| Média | 16,41 ± 2,00 | 1,96 ± 0,53 | 1900,17 ± 54,40 |

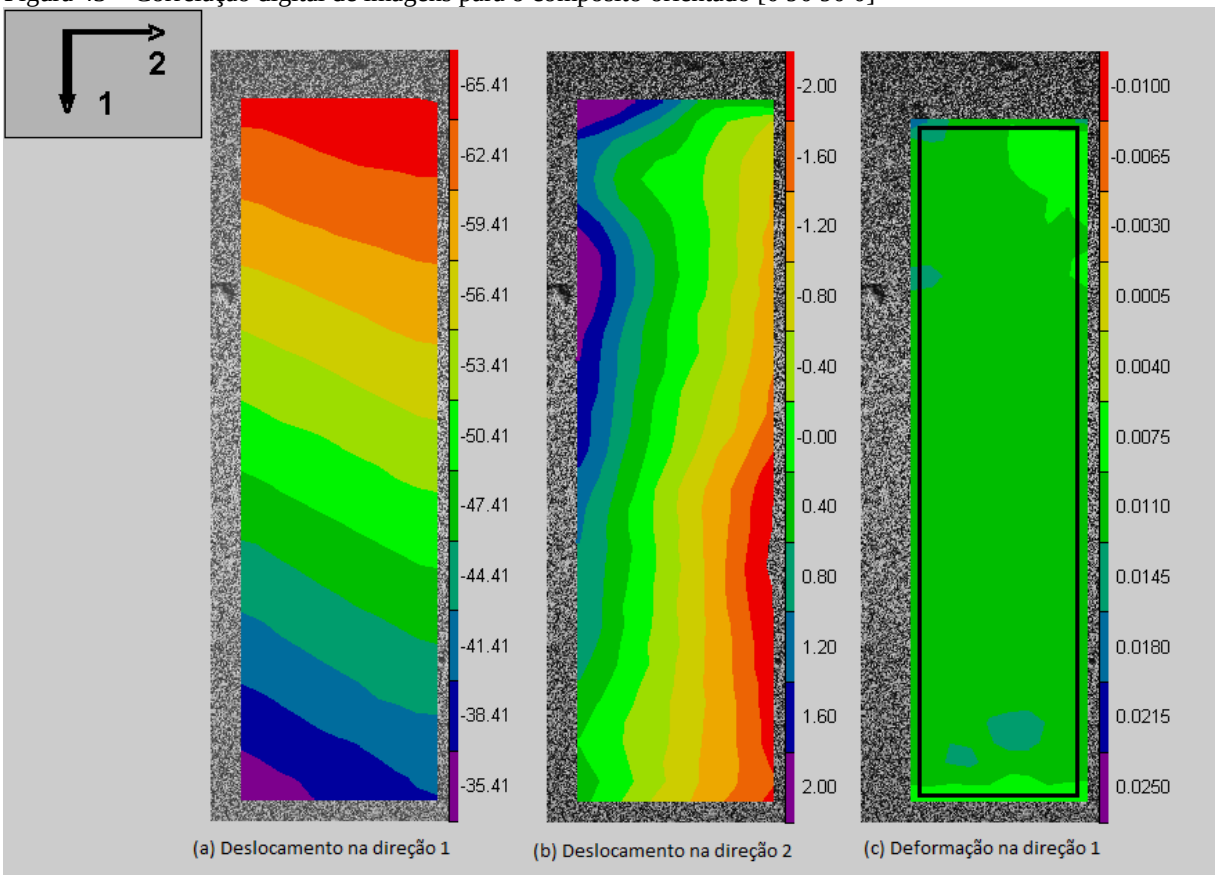
Fonte: autoria própria, 2018.

### 5.4.3 Propriedades mecânicas do compósito orientado [0 90 90 0]

A seguir são mostrados os resultados do ensaio de tração dos compósitos orientados, utilizando quatro camadas de reforço, cada uma com uma orientação específica em relação ao esforço aplicado. Nesse caso as duas camadas do centro estão perpendiculares ao esforço e as camadas da extremidade estão no sentido da carga aplicada, portanto [0 90 90 0]. A Figura 43 mostra os resultados obtidos através da correlação digital de imagens para o ensaio 5 do compósito unidirecional [0 90 90 0], todos os outros compósitos apresentaram resultados

semelhantes. Como é possível notar o comportamento desse compósito foi idêntico aos resultados já apresentados para a resina e para os compósitos [0] e [90].

Figura 43 – Correlação digital de imagens para o compósito orientado [0 90 90 0]




Fonte: autoria própria, 2018. (Escala de deslocamento, 1 pixels = 0,01605 mm).

A Tabela 21 mostra os resultados da correlação digital de imagens para os compósitos orientados [0 90 90 0]. O gauge utilizado nas análises é mostrado na Figura 43 (c) (retângulo preto).

Tabela 21 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos orientados [0 90 90 0].

| Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
|---|---|---|---|
| 1 | 33,04 | 3195,02 | 0,01231 |
| 2 | 35,43 | 3355,02 | 0,01091 |
| 3 | 31,65 | 3223,27 | 0,00984 |
| 4 | 35,15 | 3367,64 | 0,01135 |
| 5 | 33,60 | 2961,27 | 0,01097 |
| Média | 33,77 ± 1,56 | 3220,43 ± 164,04 | 0,01108 ± 0,00089 |
| Valor teórico | ------- | 2490,73 | ------- |

Legenda: Valor teórico calculado pela equação 37. Para esse cálculo foi assumido que o coeficiente de Poisson da fibra é 0,17. Valor este retirado de RAO *et al*, 2012. O coeficiente da resina foi assumido como 0,35. Valor retirado de Boeri, 2006.
Fonte: autoria própria, 2018.

A Tabela 22 mostra os resultados do ensaio de flexão para os compósitos orientados [0 90 90 0].

Tabela 22 – Resultados do ensaio de flexão para os compósitos orientados [0 90 90 0].

| Ensaio | Tensão Máxima (MPa) | Deflexão Máxima | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|
| 1 | 104,73 | 5,05 | 4869,79 |
| 2 | 101,31 | 7,92 | 4762,49 |
| 3 | 95,75 | 4,80 | 4669,12 |
| 4 | 103,88 | 4,16 | 5042,46 |
| 5 | 105,00 | 6,47 | 4755,81 |
| Média | 102,13 ± 3,86 | 5,68 ± 1,51 | 4819,93 ± 143,32 |

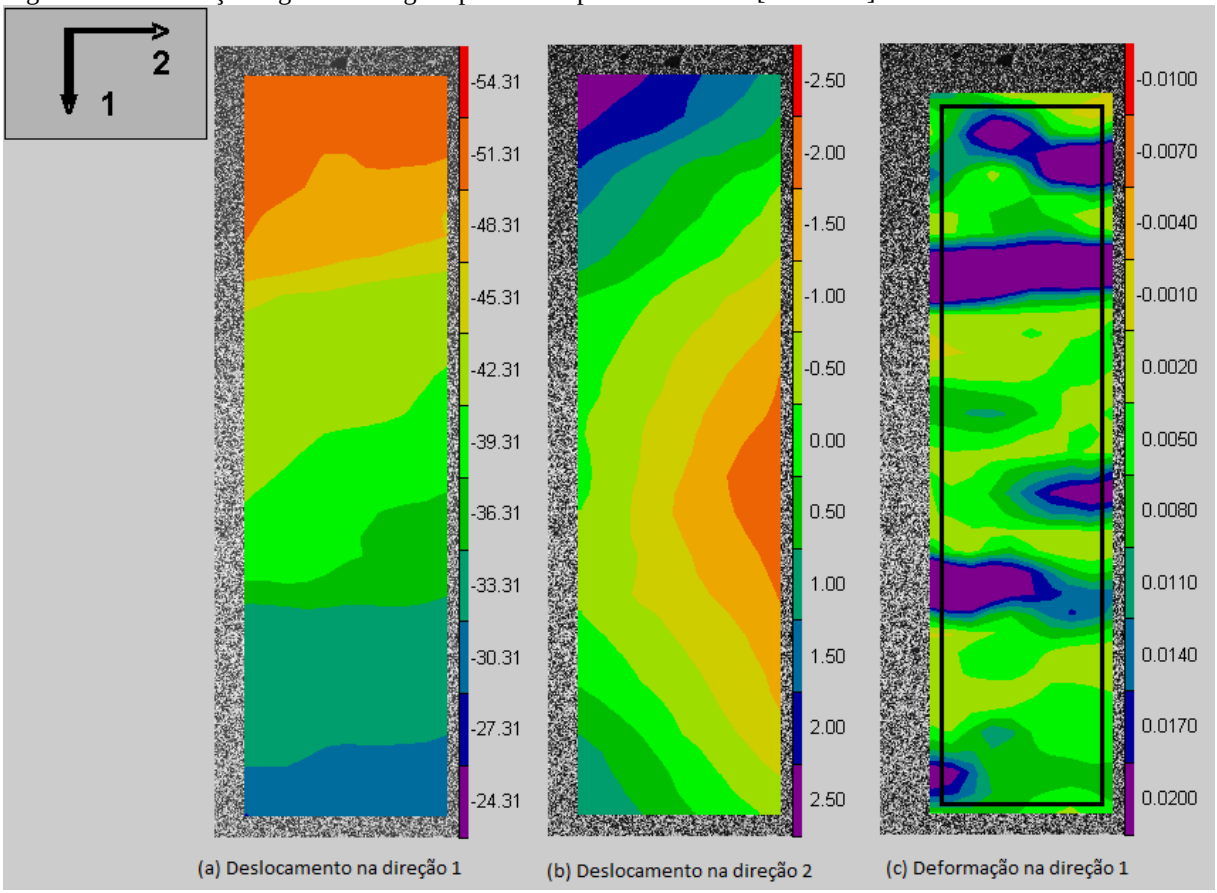
Fonte: autoria própria, 2018.

### 5.4.4 Propriedades mecânicas do compósito orientado [90 0 0 90]

A seguir são mostrados os resultados do ensaio de tração dos compósitos orientados, utilizando quatro camadas de reforço, cada uma com uma orientação específica em relação ao esforço aplicado. Nesse caso as duas camadas do centro estão no sentido do esforço e as camadas da extremidade estão perpendiculares à carga aplicada, portanto [90 0 0 90]. A Figura 44 mostra os resultados obtidos através da correlação digital de imagens para o ensaio 1 do compósito unidirecional [90 0 0 90], todos os outros compósitos apresentaram resultados semelhantes.

O compósito [90 0 0 90] foi o único que apresentou um comportamento diferente dos demais, como pode ser observado na Figura 44 (a) as faixas de deslocamento na vertical não apresentaram tamanhos semelhantes, em algumas regiões inclusive houve uma variação brusca nas faixas de deslocamento, como resultado a deformação nesse sentido apresentou pontos de concentração como observado na Figura 44 (c). Essa diferença pode ter ocorrido porque a camada que está em evidência na imagem são aquelas que estão com as fibras em um sentido perpendicular ao esforço, portanto não são capazes de suportar a carga aplicada de forma uniforme como nos demais compósitos ensaiados. Apesar disso não houve a formação de uma zona de estricção antes da ruptura, que também ocorreu de forma brusca.

Figura 44 – Correlação digital de imagens para o compósito orientado [90 0 0 90]




Fonte: autoria própria, 2018. (Escala de deslocamento, 1 pixels = 0,01658 mm).

A Tabela 23 mostra os resultados da correlação digital de imagens para os compósitos orientados [90 0 0 90]. O gauge utilizado nas análises é mostrado na Figura 44 (c) (retângulo preto). A Tabela 24 mostra os resultados do ensaio de flexão para os compósitos orientados [90 0 0 90].

Tabela 23 – Resultados do ensaio de tração para os compósitos orientados [90 0 0 90].

| Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
|---|---|---|---|
| 1 | 34,58 | 3376,31 | 0,0102 |
| 2 | 34,33 | 3142,37 | 0,0130 |
| 3 | 35,10 | 3327,04 | 0,0117 |
| 4 | 34,33 | 3185,37 | 0,0147 |
| 5 | 33,46 | 3131,52 | 0,0112 |
| Média | 34,36 ± 0,53 | 3232,52 ± 100,16 | 0,0121 ± 0,0016 |
| Valor teórico | ------- | 2490,73 | ------- |

Legenda: Valor teórico calculado pela equação 37. Para esse cálculo foi assumido que o coeficiente de Poisson da fibra é 0,17. Valor este retirado de RAO *et al*, 2012. O coeficiente da resina foi assumido como 0,35. Valor retirado de Boeri, 2006.
Fonte: autoria própria, 2018.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de flexão para os compósitos orientados [90 0 0 90].

| Ensaio | Tensão Máxima (MPa) | Deflexão Máxima | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|
| 1 | 70,40 | 2,11 | 2257,34 |
| 2 | 70,96 | 2,11 | 2245,21 |
| 3 | 75,98 | 2,21 | 2162,49 |
| 4 | 64,46 | 2,09 | 2238,24 |
| 5 | 80,95 | 2,68 | 2124,13 |
| Média | 72,55 ± 6,22 | 2,24 ± 0,25 | 2205,48 ± 58,75 |

Fonte: autoria própria, 2018.

### 5.4.5 Comparação dos resultados

As Figuras 45 e 46 mostram as análises de variância para os resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de tração dos compósitos unidirecionais e orientados. A tabela 25 mostra de forma resumida os resultados obtidos para os ensaios de tração.

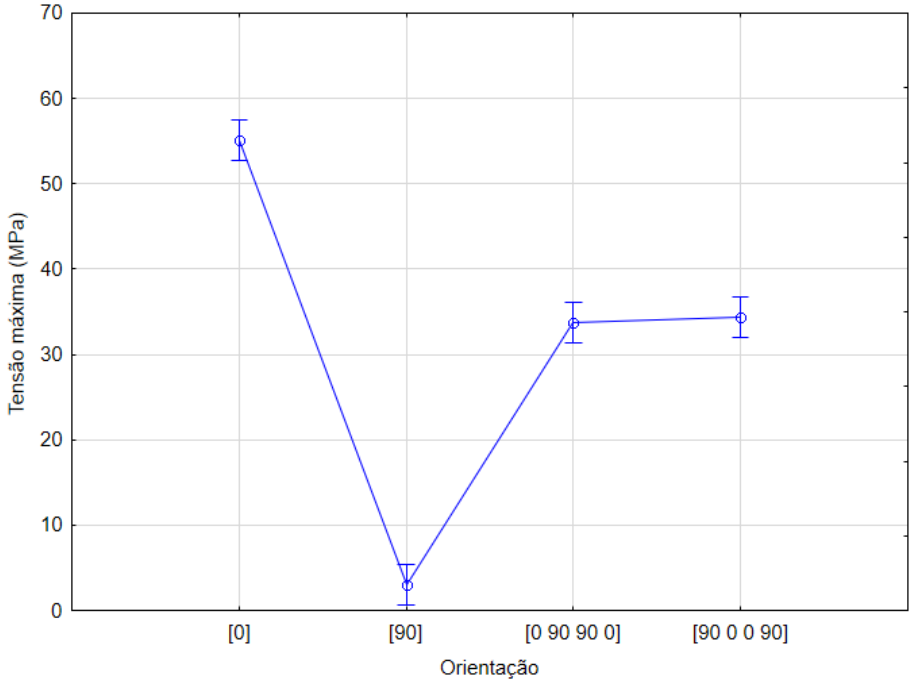
Tabela 25 – Influência da orientação nas propriedades de tração dos compósitos.

| Compósito | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|
| [0] | 55,17 ± 4,64 | 3983,87 ± 148,49 |
| [90] | 3,03 ± 0,25 | 1141,80 ± 194,85 |
| [0 90 90 0] | 33,77 ± 1,56 | 3220,43 ± 164,04 |
| [90 0 0 90] | 34,36 ± 0,53 | 3232,52 ± 100,16 |

Fonte: autoria própria, 2018.

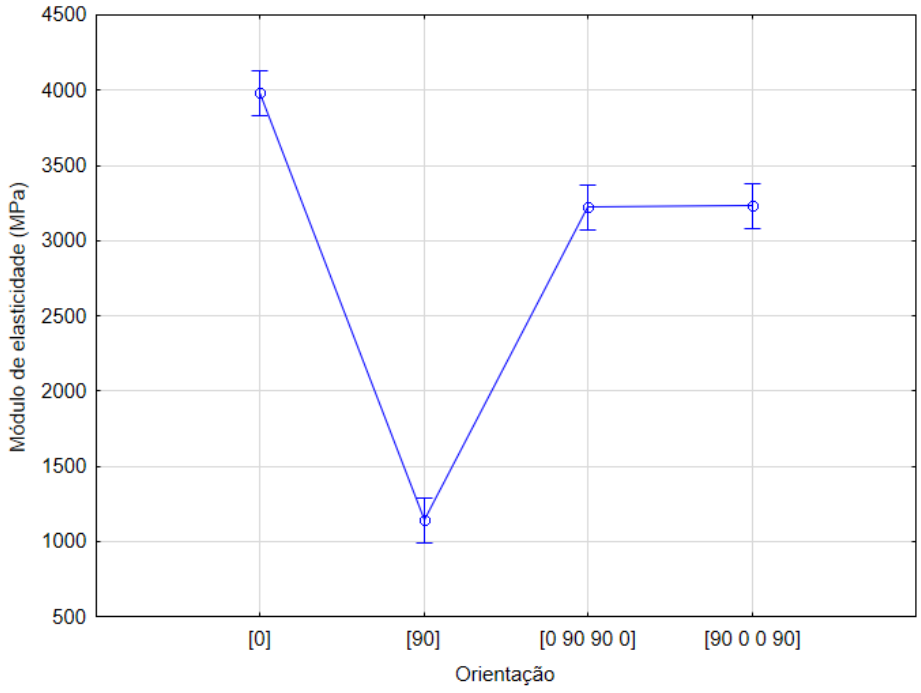
Como pode ser observado nos resultados o compósito unidirecional quando testado no sentido da fibra [0] apresenta propriedades mecânicas muito boas porém, ao ser tracionado no sentido perpendicular [90] as suas propriedades se tornam insignificantes. Portanto esse tipo de montagem, com todas as fibras direcionadas em um único sentido, limita a aplicação do compósito a casos apenas onde o esforço está no sentido do reforço.

Figura 45 – Comparação dos resultados de tensão máxima dos compósito – ensaio de tração.




Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 46 – Comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos compósitos para o ensaio de tração.




Fonte: autoria própria, 2018.

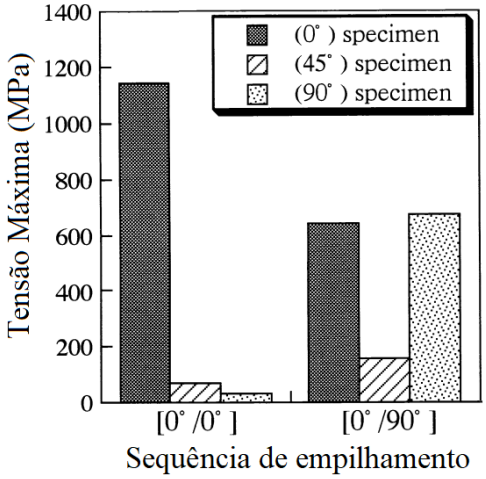
OLIVEIRA, 2015, também demonstrou em seu trabalho a redução, na tensão máxima e no módulo de elasticidade dos compósitos, provocada pela mudança na orientação das fibras. Nesse trabalho foram avaliados compósitos de poliéster insaturada isoftálica reforçados com fibras de curauá em diferentes orientações (15°, 30°, 45°, 60°, 75° e 90°) com 20% de reforço.

Para os compósitos a 0° de orientação, a resistência à tração foi de 160 MPa para as fibras sem tratamento superficial, esse valor cai à medida que o ângulo das fibras aumenta e se estabilizou em torno de 15 MPa para ângulos maiores que 45°. O módulo de elasticidade apresentou o mesmo comportamento, sendo apresentado um valor de 15 GPa para a orientação de 0º e 3,5 GPa para ângulos maiores que 60°.

Em contra partida, o compósito com camadas orientadas apresentou propriedades exatamente iguais quando testados no sentido longitudinal [0 90 90 0] e transversal [90 0 0 90], mostrando-se como uma melhor opção de confecção para aplicações que necessitam de resistência mecânica em múltiplas direções, visto que garante a formação de um material com propriedades que permite aplicação em diversas situações, independente do sentido do esforço. Essa igualdade nas propriedades desse compósito já era esperada de acordo com o mostrado no referencial teórico, equação 37.

Resultados semelhantes foram apresentados por MORIOKA e TOMITA, 2000. Em seu trabalho, compósito de epóxi foram reforçados com fibras de carbono utilizando duas sequências de empilhamento: [0] e [0 90 0 90]. Corpos de prova foram então retirados em diferentes orientações (0°, 45° e 90°). A Figura 47 mostra o resultado para a tensão máxima dos compósitos. Como observado, houve uma grande diferença entre as propriedades do compósito [0] quando testado no sentido da fibra e perpendicularmente a ela. O mesmo efeito não foi apresentado no compósito simétrico [0 90 0 90].

Figura 47 – Resultado semelhante para a influência da orientação.



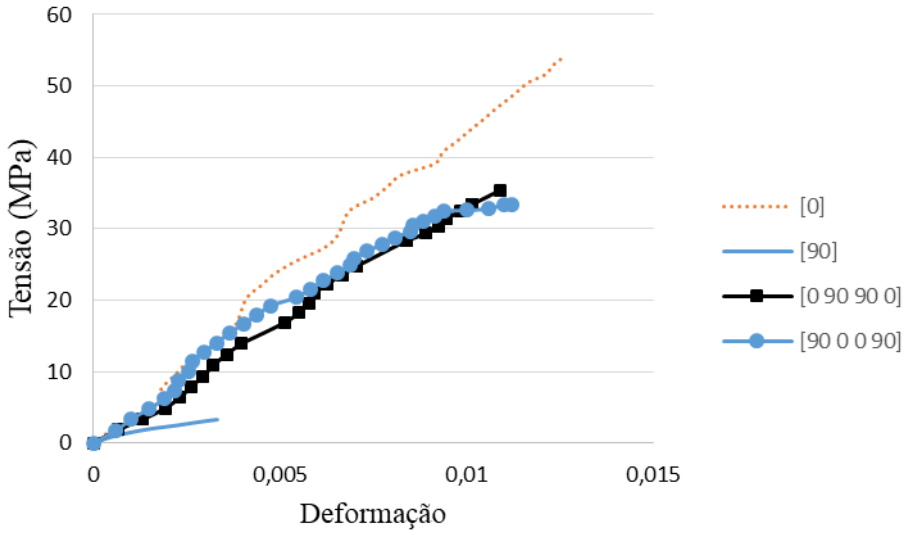

Fonte: Adaptado de MORIOKA e TOMITA, 2000.

CAMINERO *et al*, 2016, também analisou a influência da orientação das camadas nas propriedades finais do compósitos. Em seu trabalho fibras de carbono continuas foram impregnadas com resina epóxi em diferentes orientações ($[0]_{12}$, $[90]_{12}$, $[0/90]_{3s}$ e outras)

utilizando uma concentração em peso de 34% de resina. Os compósitos do tipo [0] apresentaram limite de resistência a tração de 1297 MPa, [90] apresentou um valor de 95,4 MPa, enquanto que o compósito [0/90] apresentou 992,9 MPa.

A Figura 48 mostra o diagrama tensão x deformação para os compósitos unidirecionais e orientados. Nessa imagem é possível observar graficamente a influência da orientação das fibras nas propriedades dos compósitos. Também é possível perceber que independente da orientação o comportamento do compósito foi o mesmo, apresentado um comportamento praticamente elástico até a ruptura. É importante frisar que em todos os compósitos não ocorreu a formação de estricções e a falha ocorreu de forma brusca.

Figura 48 – Diagrama tensão x deformação para os compósitos unidirecionais e orientados.




Fonte: autoria própria, 2018.

A tabela 26 mostra os resultados obtidos para os ensaios de flexão.

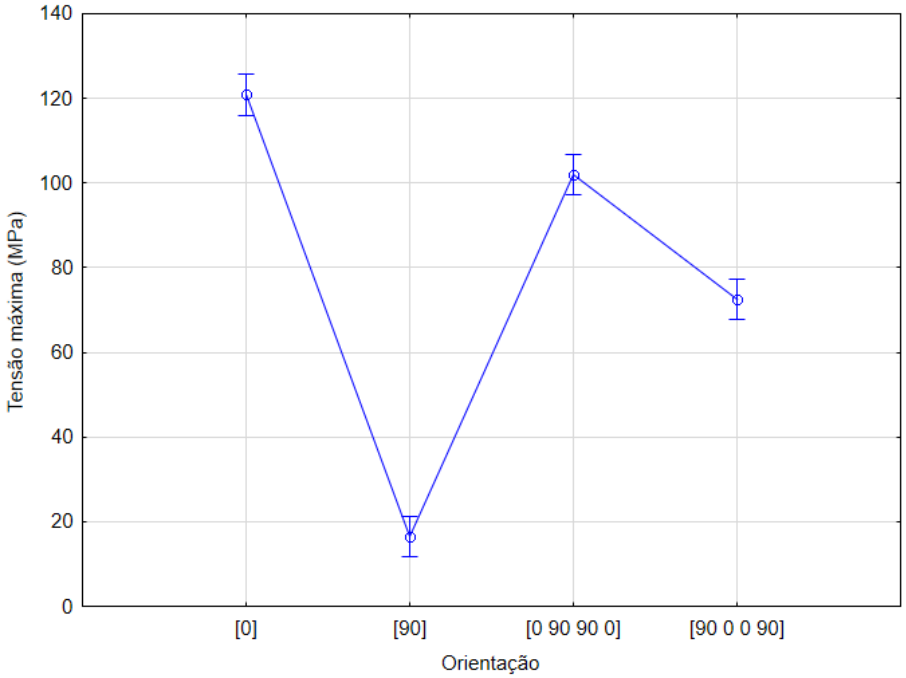
Tabela 26 – Influência da orientação nas propriedades de flexão dos compósitos.

| Compósito | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|
| [0] | 120,88 ± 6,63 | 5460,67 ± 161,65 |
| [90] | 16,41 ± 2,00 | 1900,17 ± 54,40 |
| [0 90 90 0] | 102,13 ± 3,86 | 4819,93 ± 143,32 |
| [90 0 0 90] | 72,55 ± 6,22 | 2205,48 ± 58,75 |

Fonte: autoria própria, 2018.

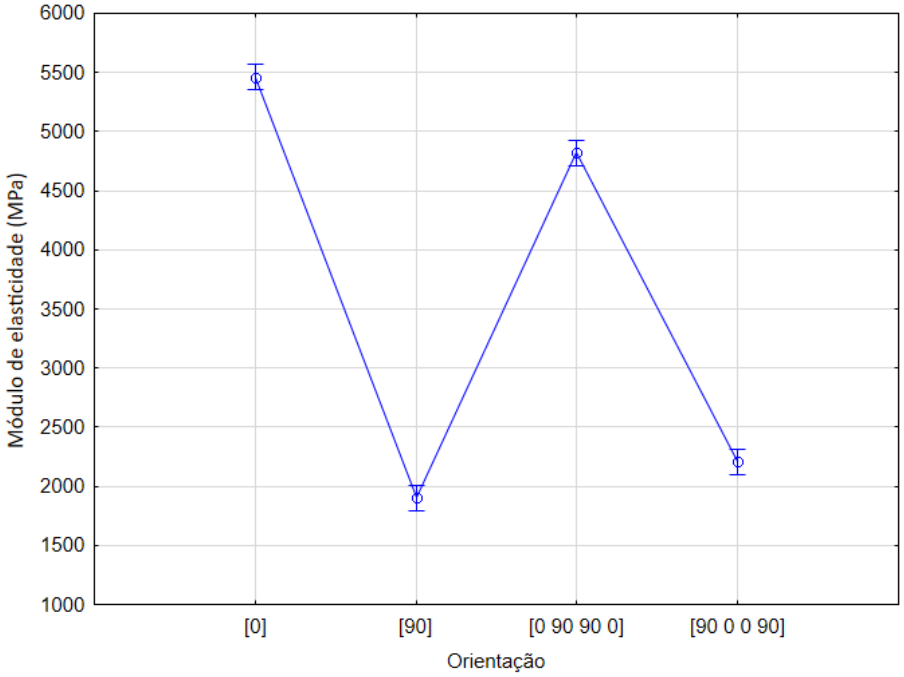
As Figuras 49 e 50 mostram as análises de variância para os resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão dos compósitos.

Figura 49 – Comparação dos resultados de tensão máxima dos compósito – ensaio de flexão




Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 50 – Comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos compósitos para o ensaio de flexão.




Fonte: autoria própria, 2018.

Como pode ser observado os resultados de flexão para o compósito unidirecional foram semelhantes aos obtidos no ensaio de tração: efeitos elevados para o compósito ensaiado no sentido da fibra e pequenos, quando testado perpendicularmente ao reforço. A diferença ocorreu no ensaio de flexão dos compósitos orientados, dessa vez eles não apresentaram os mesmo

valores. Isso ocorre devido à natureza do ensaio de flexão que consiste basicamente em tracionar a camada mais externa do corpo de prova e comprimir a camada em contado com o cutelo. No caso do compósito [0 90 90 0] a camada mais externa sofre um esforço de tração, porém nesse caso o reforço está no sentido do esforço aplicado, o mesmo não ocorre no compósito [90 0 0 90], por isso a diferença nas propriedades.

## 5.5 INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DE FIBRA

A seguir são apresentados os resultados da influência da concentração de fibras nas propriedades mecânicas dos compósitos orientados. Todos os compósitos foram confeccionados utilizando um configuração de [0 90 90 0]. As propriedades dos compósitos com 20% de fibra já foram apresentadas no tópico 5.4.3.

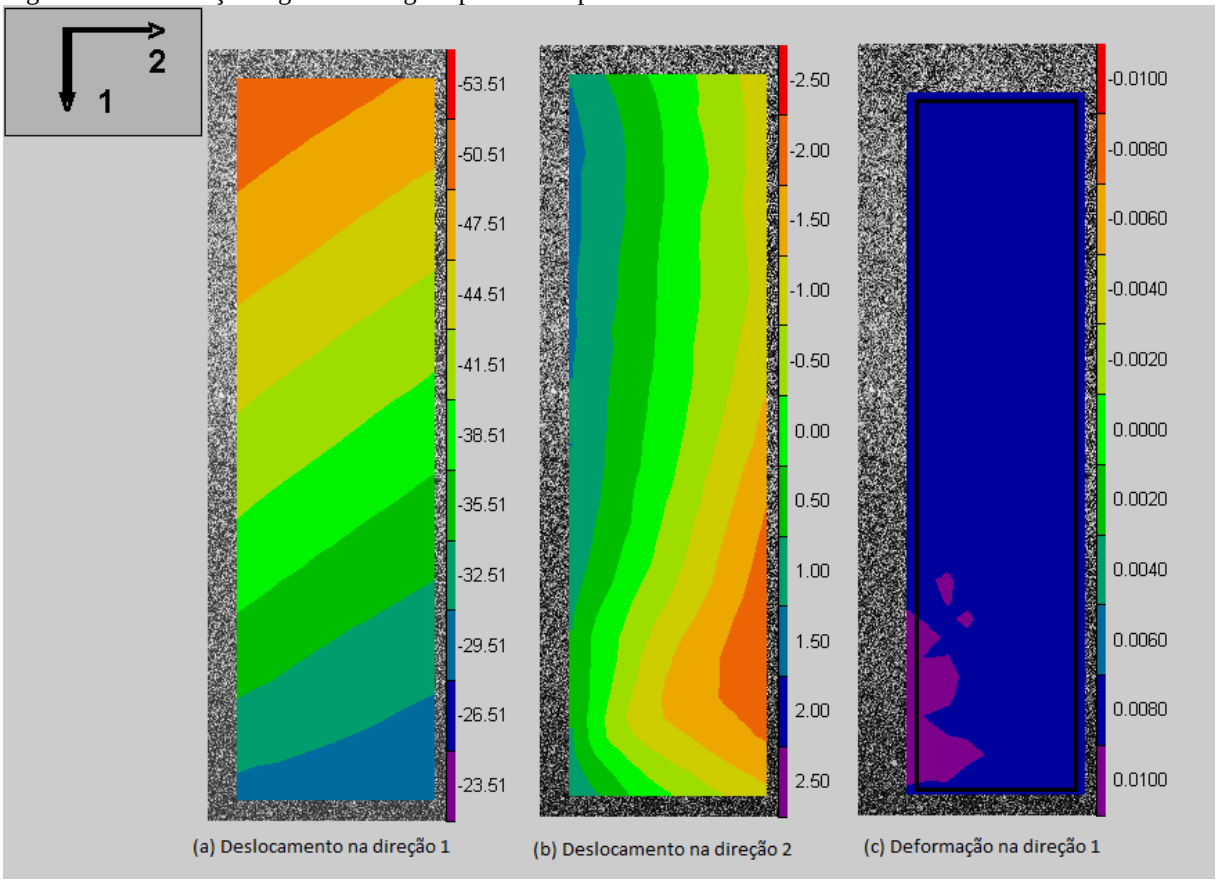
### 5.5.1 Propriedades mecânicas do compósito orientado com 10% de fibra

A seguir são mostrados os resultados do ensaio de tração dos compósitos orientados [0 90 90 0] com 10% de fibra. A Figura 51 mostra os resultados obtidos através da correlação digital de imagens para o ensaio 1, todos os outros compósitos apresentaram resultados semelhantes.

Como é possível notar, o comportamento desse compósito foi semelhante aos resultados já apresentados. Apresentando faixas de deslocamento na vertical de tamanhos semelhantes e deformação uniforme ao longo do corpo de prova.

A Tabela 27 mostra os resultados da correlação digital de imagens para os compósitos orientados [0 90 90 0] com 10% de fibra. O gauge utilizado nas análises é mostrado na Figura 51 (c) (retângulo preto).

Figura 51 – Correlação digital de imagens para o compósito orientado com 10% de fibra.




Fonte: autoria própria, 2018. (Escala de deslocamento, 1 pixels = 0,017 mm).

Tabela 27 – Resultados do ensaio de tração para o compósito orientado [0 90 90 0] com 10% de fibra.

| Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
|---|---|---|---|
| 1 | 28,20 | 2810,13 | 0,00903 |
| 2 | 23,55 | 2719,85 | 0,00821 |
| 3 | 28,12 | 2772,68 | 0,01055 |
| 4 | 27,91 | 2742,51 | 0,00991 |
| 5 | 25,20 | 2832,10 | 0,00842 |
| Média | 26,60 ± 2,11 | 2775,45 ± 46,36 | 0,00923 ± 0,00099 |
| Valor teórico | ------- | 2326,96 | ------- |

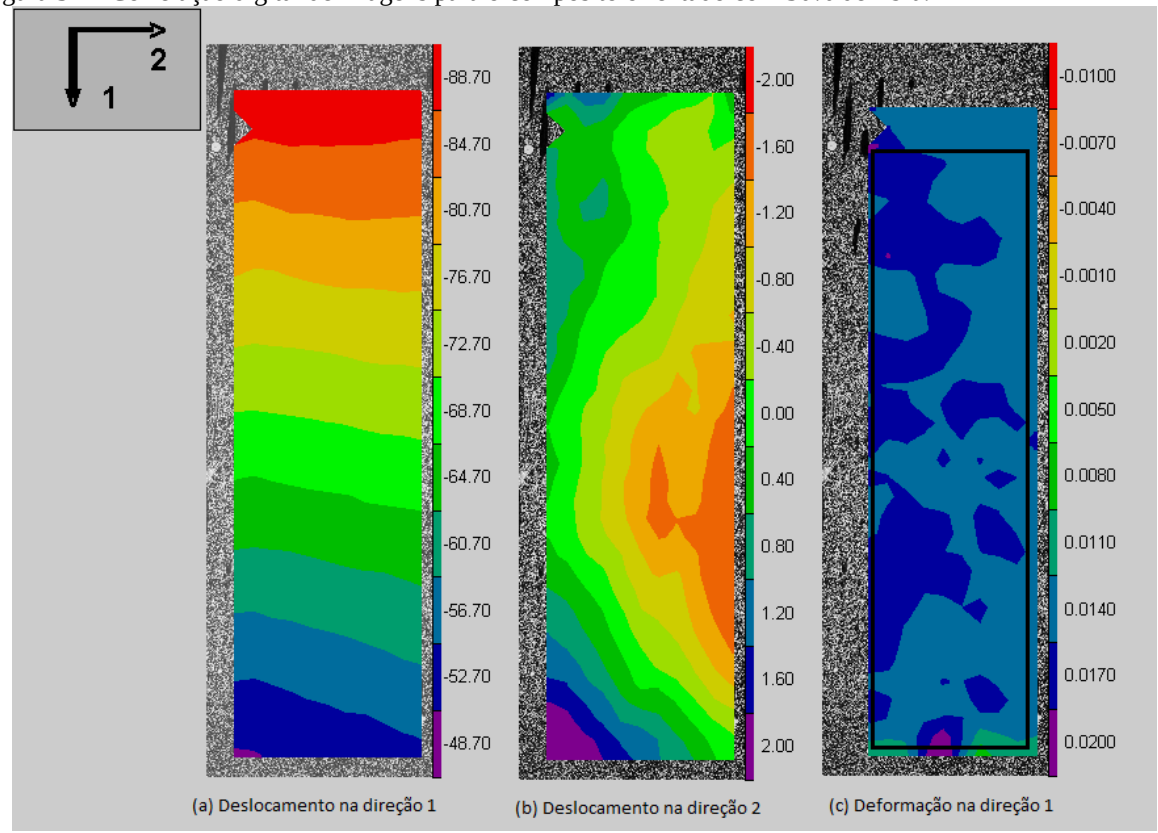
Legenda: Valor teórico calculado pela equação 37. Para esse cálculo foi assumido que o coeficiente de Poisson da fibra é 0,17. Valor este retirado de RAO *et al*, 2012. O coeficiente da resina foi assumido como 0,35. Valor retirado de Boeri, 2006.
Fonte: autoria própria, 2018.

### 5.5.2 Propriedades mecânicas do compósito orientado com 30% de fibra

A seguir são mostrados os resultados do ensaio de tração dos compósitos orientados [0 90 90 0] com 30% de fibra. A Figura 52 mostra os resultados obtidos através da correlação

digital de imagens para o ensaio 1, todos os outros compósitos apresentaram resultados semelhantes. Como é possível notar o comportamento desse compósito foi idêntico aos resultados já apresentados.

Figura 52 – Correlação digital de imagens para o compósito orientado com 30% de fibra.




Fonte: autoria própria, 2018. (Escala de deslocamento, 1 pixels = 0,01696 mm).

A Tabela 28 mostra os resultados da correlação digital de imagens para os compósitos orientados [0 90 90 0] com 30% de fibra. O gauge utilizado nas análises é mostrado na Figura 52 (c) (retângulo preto).

Tabela 28 – Resultados do ensaio de tração para o compósito orientado [0 90 90 0] com 30% de fibra.

| Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) | Deformação máxima |
|---|---|---|---|
| 1 | 51,49 | 3798,65 | 0,0162 |
| 2 | 52,51 | 3721,25 | 0,0169 |
| 3 | 50,84 | 3720,65 | 0,0169 |
| 4 | 51,03 | 3615,40 | 0,0155 |
| 5 | 55,36 | 3815,78 | 0,0148 |
| Média | 52,24 ± 1,86 | 3734,35 ± 79,49 | 0,0160 ± 0,0009 |
| Valor teórico | ------- | 2661,44 | ------- |

Legenda: Valor teórico calculado pela equação 37. Para esse cálculo foi assumido que o coeficiente de Poisson da fibra é 0,17. Valor este retirado de RAO *et al*, 2012. O coeficiente da resina foi assumido como 0,35. Valor retirado de Boeri, 2006.
Fonte: autoria própria, 2018.

### 5.5.3 Comparação dos resultados

As Figuras 53 e 54 mostram as análises de variância para os resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de tração dos compósitos orientados com diferentes concentrações de fibra. A tabela 29 mostra de forma resumida os resultados obtidos para os ensaios de tração.

Tabela 29 – Influência da concentração nas propriedades de tração do compósito orientado [0 90 90 0].

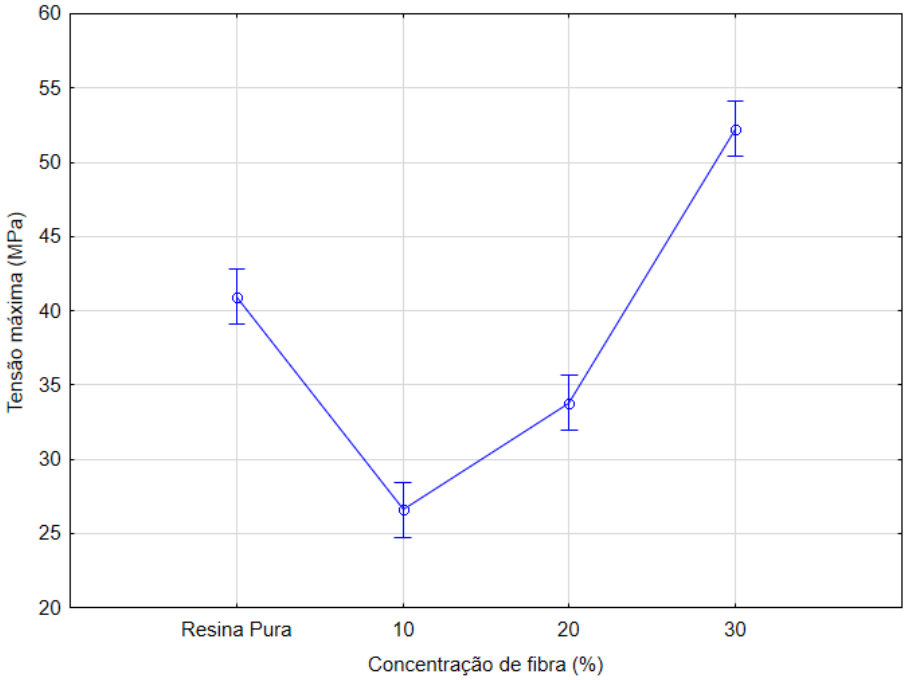
| Concentração | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|
| 10% | 26,60 ± 2,11 | 2775,45 ± 46,36 |
| 20% | 33,77 ± 1,56 | 3220,43 ± 164,04 |
| 30% | 52,24 ± 1,86 | 3734,35 ± 79,49 |

Fonte: autoria própria, 2018.

Como pode ser observado acima, a adição de fibra promoveu um aumento nas propriedades mecânicas do compósito, isso já era esperado visto que a função do reforço é exatamente promover um aumento no limite de resistência à tração e módulo de elasticidade, como explicado no referencial teórico. As equações teóricas também preverem tal aumento nas propriedades do compósitos de acordo com a variação da concentração. Vários autores já mostraram a influência da concentração de fibra nos compósitos como mostrado nas Figuras 36 e 38.

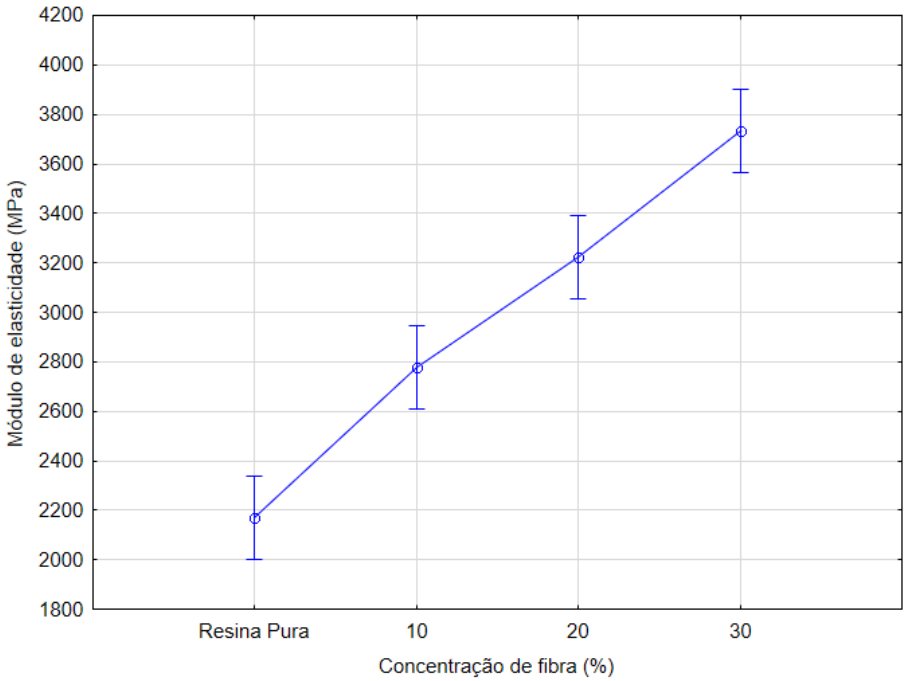
BAKARE *et al*, 2010, apresentou resultados semelhantes. Em seu trabalho compósitos de poliuretano foram fabricados usando fibras de sisal longo na orientação unidirecional com diferentes concentrações de fibra (10%, 20%, 30%), sendo observado um limite de resistência a tração e um módulo de elasticidade, respectivamente, de: 56.3 ± 3.7 MPa e 1.24 ± 0.14 GPa; 58.9 ± 1.5 MPa e 1.84 ± 0.21 GPa; 104.4 ± 2.1 MPa e 1.87 ± 0.32 GPa, para cada concentração.

Figura 53 – Comparação dos resultados de tensão máxima dos compósitos [0 90 90 0] com diferentes concentrações de fibra.




Fonte: autoria própria, 2018.

Figura 54 – Comparação dos resultados de módulo de elasticidade dos compósitos [0 90 90 0] com diferentes concentrações de fibra.



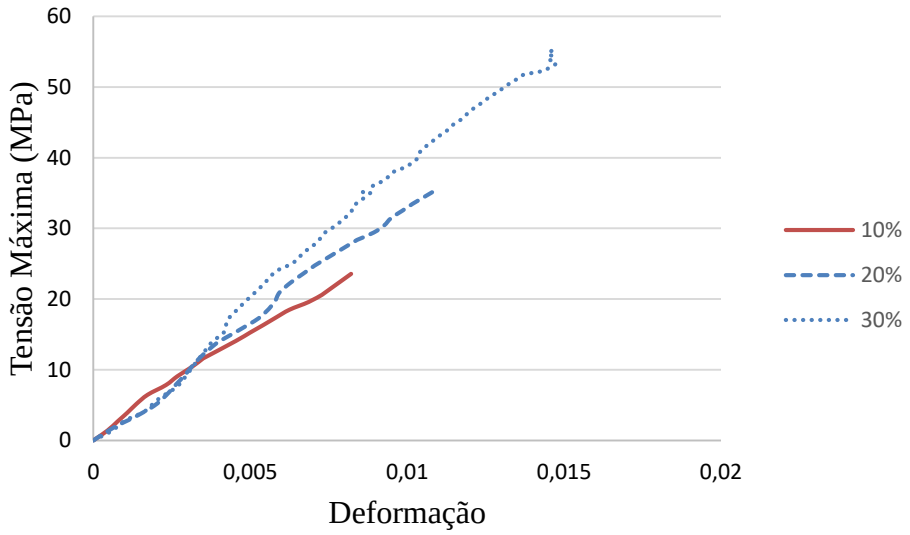

Fonte: autoria própria, 2018.

Comparado com a resina, os compósitos orientados com 30% de fibra foram os únicos que apresentaram um valor maior para as propriedades mecânicas testadas (tensão máxima e

módulo de elasticidade), sendo portanto a opção mais viável para a confecção de componentes mecânicos.

A Figura 55 mostra o diagrama tensão x deformação para os compósitos orientados com diferentes concentrações de fibra. Nessa imagem é possível observar graficamente a influência da concentração da fibra nas propriedades dos compósitos. Também é possível perceber que independente da composição o comportamento do compósito foi o mesmo, apresentando um comportamento praticamente elástico até a ruptura.

Figura 55 – Diagrama tensão x deformação para os compósitos orientados [0 90 90 0] com diferentes concentrações de fibra.




Fonte: autoria própria, 2018.

Os dados também foram avaliados com um software de análise estatística. A seguir são apresentados os resultados obtidos da análise. As equações 47 e 48 mostram os modelos matemáticos propostos pelo software para a previsão da tensão máxima e módulo de elasticidade do compósito orientado. Esses modelos são importantes, visto que as equações teóricas propostas pela análise micro e macromecânica não apresentaram bons resultados para a previsão das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras naturais. Para a obtenção dessas equações os dados de tensão máxima e módulo de elasticidade, para cada concentração, simplesmente foram exportados para o software de análise estatística e foi realizado uma regressão múltipla.

O modelo matemático gerado pelo software de análise para a tensão máxima apresentou um $R^2$ de 0,9769 e um R-Ajustado de 0,97304. O modelo é mostrado na Equação 47.

$$Tensão\ máxima = 30{,}7122154 - 0{,}97630574 \cdot \mathrm{C} + 0{,}0564682849 \cdot C^2 \qquad (\mathrm{Eq.}\,47)$$

Já modelo matemático gerado pelo software de análise para o módulo de elasticidade apresentou um $R^2$ de 0,94049 e um R-Ajustado de 0,93591. O modelo é mostrado na Equação 48.

$$Módulo\ de\ elasticidade = 2284{,}51565 + 47{,}9447702 \cdot \mathrm{C} \qquad (\mathrm{Eq.}\,48)$$

Onde, C representa a concentração de fibra em porcentagem (exemplo: 10% e 20%).

# 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível observar que a confecção manual de compósitos com matriz epóxi reforçados com fibras longas de sisal, como descrito no trabalho, é capaz de produzir materiais com boas propriedades mecânicas utilizando poucos recursos, desde que o processo de confecção seja feito de forma controlada para evitar a presença de falhas no material.

Também foi possível identificar a influência que o tratamento químico com hidróxido de sódio (NaOH) possui nas propriedades mecânicas da fibra de sisal e principalmente nas características mecânicas do compósito reforçado com fibras tratadas. Os ensaios mecânicos das fibras mostraram que os tratamentos alcalinos de 2%, 5% e 8% de NaOH podem promover perda de massa, aumento da densidade, diminuição no diâmetro das fibras e melhorias nas propriedades mecânicas das mesmas, sendo o tratamento químico com 8% o mais eficiente na mudança dessas grandezas, para esse tratamento a fibra apresentou perda de massa de 38,07 ± 0,643%, densidade de 1,334 ± 0,0056 g/cm3, diâmetro de 0,15 ± 0,03 mm, tensão máxima de 374,66 ± 49,47 MPa e módulo de elasticidade de 13267,85 ± 4471,34 MPa. Provavelmente a retirada de material e consequente mudança de composição química provocada pelo tratamento são os motivos para tais alterações, além disso o tratamento alcalino de fibras naturais provoca uma redução no ângulo espiral das microfibrilas de celulose melhorando a resistência à tração.

Os ensaios também mostraram que o tratamento alcalino pode ser utilizado para aumentar as propriedades mecânicas do compósito, quando desejado, visto que os compósitos unidirecionais confeccionados com sisal tratados com 5% e 8% de NaOH apresentaram limite de resistência a tração e módulo de elasticidade maiores que o compósito com fibras sem tratamento. Novamente o tratamento químico com 8% foi o mais eficiente na mudança dessas grandezas, apresentando tensão máxima de 73,41 ± 4,89 MPa e módulo de elasticidade de 4823,63 ± 168,84 MPa. Provavelmente essa mudança de propriedades ocorreu devido a melhoria das propriedades do sisal e da adesão entre fibra e matriz provocada pelo tratamento alcalino.

Os ensaios de tração também mostraram a influência da orientação das fibras no compósito. Foi possível notar que compósitos confeccionados com todas as fibras sem tratamento posicionadas de forma paralelas em um único sentido apresenta propriedades muito boas, comparadas com as demais configurações testadas, quanto ensaiado no sentido das mesmas (compósito tipo [0]), apresentando tensão máxima de 55,17 ± 4,64 MPa e módulo de elasticidade de 3983,87 ± 148,49 MPa, porém suas propriedades são insignificantes quando

testadas no sentido transversal (compósito tipo [90]), apresentando tensão máxima de 3,03 ± 0,25 MPa e módulo de elasticidade de 1141,80 ± 194,85 MPa. Portanto, um material desse tipo possui sua faixa de aplicação restrita a situações onde não exista esforços transversais. O mesmo efeito não foi observado nos compósitos utilizando fibras em diferentes orientações (compósitos do tipo [0 90 90 0]), que exibiram propriedades semelhantes em ambos os sentidos de teste, apresentando tensão máxima de 33,77 ± 1,56 MPa e módulo de elasticidade de 3220,43 ± 164,04 MPa, portanto, essa configuração é mais indicada para a confecção de componentes mecânicos que sofrerão esforço em sentidos diferentes.

Os ensaios de flexão apresentaram resultados semelhantes para o efeito da orientação. Novamente os compósitos unidirecionais ensaiados no sentido da fibra apresentaram propriedades elevadas. Por outro lado, ao serem testados perpendicularmente ao reforço, as propriedades foram insignificantes. A diferença ocorreu no ensaio de flexão dos compósitos orientados. Dessa vez eles não apresentaram os mesmos valores. Isso ocorre devido à natureza do ensaio de flexão que promove um esforço de tração na camada mais externa do corpo de prova. Portanto os compósitos que apresentam, nessa camada externa, fibras no sentido do esforço são mais resistentes à flexão do que aqueles materiais com fibras perpendiculares à solicitação mecânica. Dessa forma, o compósito [0 90 90 0] apresentou propriedades mecânicas de flexão mais elevadas que o material [90 0 0 90].

Também foi observado o aumento que a elevação da concentração de fibra pode provocar nas propriedades mecânicas do material final. Foi percebido que à medida que a concentração de fibra foi aumentada (10%, 20% e 30%) as propriedades do compósito orientado também foram aumentadas. É importante frisar que apenas o compósito orientado fabricado com 30% de fibra exibiu propriedades mais elevadas que a resina pura, apresentando tensão máxima de 52,24 ± 1,86 MPa e módulo de elasticidade de 3734,35 ± 79,49 MPa, sendo a escolha mais indicada para a confecção de materiais.

Para finalizar, foi percebido que as equações estabelecidas pela análise micro e macromecânica não apresentaram boa margem de previsão para os compósitos estudados, apesar de alguns resultados teóricos para o módulo de elasticidade permanecerem na mesma ordem de grandeza dos resultados experimentais. Isso ocorre devido às várias hipóteses simplificadoras assumidas durante o modelamento. Portanto, a criação de modelos que prevejam de forma mais efetiva as propriedades dos compósitos reforçados com fibras naturais é necessária. Foram encontradas, através de sucessivos ensaios, duas equações (47 e 48) para a previsão das propriedades mecânicas de tração dos compósitos [0 90 90 0] em função da concentração de fibra.

# 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é sugerido:

- Simulação do comportamento mecânico, design de componentes comerciais (exemplos: piscinas, caixas d'água, componentes automotivos) e levantamento de preço de tais produtos, visando a substituição da fibra sintética por fibras naturais;
- Caracterização química da matriz epóxi e da fibra de sisal;
- Utilização de outro tipo de resina, de preferência de fonte renovável, para a moldagem de compósitos completamente biodegradáveis;
- Estudar a interface entre fibra/matriz do compósito com o uso da microscopia óptica ou eletrônica, ou por *pull-out*;
- Levantamentos das propriedades termomecânicas do compósito [0 90 90 0];
- Analisar a fratura ocorrida em tração do compósito com o uso da microscopia eletrônica de varredura – MEV.

# 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ALBANO, C.; REYES, J.; ICHAZO, M.; *et al*. Analysis of the mechanical, thermal and morphological behaviour of polypropylene compounds with sisal fibre and wood flour, irradiated with gamma rays. **Polymer Degradation and Stability**, v. 76, n. 2, p. 191–203, 2002.

ASTM D790-10, **Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010.

ASTM D792-13, **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM D3039 / D3039M-14, **Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM D3379-75(1989)e1, **Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials** (Withdrawn 1998), ASTM International, West Conshohocken, PA, 1975.

ASTM D3800-99, **Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1999.

AUGUSTO, S.S. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos**. 5.ed. São Paulo. Edgard Bluncher, 1982.

BAKARE, I. O. et al. Mechanical and thermal properties of sisal fiber-reinforced rubber seed oil-based polyurethane composites. **Materials and Design**, [s. l.], v. 31, n. 9, p. 4274–4280, 2010.

BOERI, Daniel Verga. **Caracterização de materiais compostos por ultra-som**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.3.2006.tde-05092006-122052. Acesso em: 2018-01-17.

CALLISTER, William D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 7.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 705p.

CAMINERO, M. A.; RODRÍGUEZ, G. P.; MUÑOZ, V. Effect of stacking sequence on Charpy impact and flexural damage behavior of composite laminates. **Composite Structures**, [s. l.], v. 136, p. 345–357, 2016.

CERCHIARO, J. R. **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual**. 2010. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Salvador. , 2010

DARROS, A. B. **Compósitos de matrizes poliméricas com mantas aleatórias de fibras vegetais de sisal e de coco**. 2013. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais).

Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba. , 2013.

GONÇALVES, JORGE ANTÔNIO VIEIRA. **Propriedades mecânicas de compósitos particulados à base de resina epóxi reforçados com pó de rochas graníticas, pertencentes à faixa de dobramento sergipana**. 2015. 120 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Universidade Federal de Sergipe. Núcleo de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais. São Cristóvão, 2015.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 637p.

HILD, François; ROUX, Stéphane. **Correli Q4:** A Software for "Finite-element" Displacement Field Measurements by Digital Image Correlation. Cachan: Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2008. Disponível em: < http://romanee.lmt.ens-cachan.fr/PDFs/HILD.2008.7.pdf > Acesso em: 07 julho de 2017.

HOLANDA, E. B. N. **Morfologia e propriedades mecânicas da fibra de sisal unidirecional e em sobreposição de compósito com resina epóxi**. 2013. 79 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Gra. , 2013.

IZANI, M. A.Norul *et al*. Effects of fiber treatment on morphology , tensile and thermogravimetric analysis of oil palm empty fruit bunches fibers. **Composites: Part B**, v. 45, p. 1251–1257, 2013.

JERABEK, M.; MAJOR, Z.; LANG, R. W. Strain determination of polymeric materials using digital image correlation. **Polymer Testing**, [s. l.], v. 29, n. 3, p. 407–416, 2010.

JOSEPH, K.; JAMES, B.; THOMAS, S.; CARVALHO, L. H. DE. A review on sisal fiber reinforced polymer. **Engenharia Agrícola**, v. 3, n. 083, p. 367–379, 1999.

JOSEPH, K.; THOMAS, S.; PAVITHRAN, C. Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites. **Polymer**, v. 37, n. 23, p. 5139–5149, 1996.

JOSEPH, K.; VARGHESE, S.; KALAPRASAD, G.; *et al*. Influence of interfacial adhesion on the mechanical properties and fracture behaviour of short sisal fibre reinforced polymer composites. **European Polymer Journal**, v. 32, n. 10, p. 1243–1250, 1996.

KALIA, S.; KAITH, B.S; KAUR, I. Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites—A Review Susheel. **Polym Eng Sci**, v. 47, p. 21–25, 2009.

KAW, A. K. **Mechanics of Composite Materials. 2 ed**. United States of America: CRC Press. 2006. 457 p. 2006.

KERSTING, Daniel de Freitas. **Avaliação de Resinas Epóxi para Fabricação de Materiais Compósitos pelo Processo de Pultrusão**. 2004. 117f. Dissertação (Mestrado em Engenharia

de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, RS, 2004.

KRISHNAIAH, P.; RATNAM, C. T.; MANICKAM, S. Enhancements in crystallinity, thermal stability, tensile modulus and strength of sisal fibres and their PP composites induced by the synergistic effects of alkali and high intensity ultrasound (HIU) treatments. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 34, p. 729–742, 2017. Elsevier B.V.

LEVY NETO, Flamínio; PARDINI, Luiz Cláudio. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. 1.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher. 2006. 313 p.

LI, Y.; MAI, Y.-W.; YE, L. Sisal fibre and its composites: a review of recente developments. **Composites Science and Technology**, v. 60, n. 11, p. 2037–2055, 2000.

MALLICK, P. K. **Fiber reinforced composites: materials, manufacturing and design. 3 ed.** United States of America: CRC Press. 2007. 616 p. 2007.

MANO, Eloisa Biasotto; MENDES, Luís Cláudio. **Introdução a polímeros**. São Paulo: Editora Blucher, 1999

MARINELLI, A. L.; MONTEIRO, M. R.; AMBRÓSIO, J. D.; *et al*. Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras vegetais naturais da biodiversidade: uma contribuição para a sustentabilidade amazônica. **Polímeros**, v. 18, n. 2, p. 92–99, 2008.

MARINUCCI, Gerson. **Materiais Compósitos Poliméricos:Fundamentos e Tecnologia.** 1. ed. São Paulo: Arliber Editora, 2011. 333p .

MARTINS NETO, JOSÉ ANTÔNIO. **Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal.** 2016. 100 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, 2016.

MILANESE, A. C. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibra de sisal e de vidro**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais). Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

MILANESE, A. C. **Processamento e caracterização de compósito fibra de sisal/resina epóxi via RTM**. 2012. 123 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica na área de Materiais), Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

MOHAN, T. P.; KANNY, K. Chemical treatment of sisal fiber using alkali and clay method. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 43, n. 11, p. 1989–1998, 2012.

MOHANTY, A. K.; MISRA, M.; HINRICHSEN, G. Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 276-277, p. 1–24, 2000.

MONTEIRO, S. N.; CALADO, V.; RODRIGUEZ, R. J. S.; MARGEM, F. M. Thermogravimetric behavior of natural fibers reinforced polymer composites-An overview. **Materials Science and Engineering A**, v. 557, p. 17–28, 2012.

MORIOKA, Kojiro; TOMITA, Yoshiyuki. Effect of lay-up sequences on mechanical properties and fracture behavior of CFRP laminate composites. **Materials Characterization**, v.45, p. 125–136, 2000.

MOTHÉ, C. G.; ARAUJO, C. R. DE. Caracterização térmica e mecânica de compósitos de poliuretano com fibras de Curauá. **Polímeros**, v. 14, p. 274–278, 2004.

PENG, Xinwen; ZHONG, Linxin; REN, Junli; SUN, Runcang. Laccase and alkali treatments of cellulose fibre: Surface lignin and its influences on fibre surface properties and interfacial behaviour of sisal fibre/phenolic resin composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 41, n. 12, p. 1848–1856, 2010.

PENNAFORT, L. C. G.; QUEIROZ, W. L. R. DE; CODES, R. N. DE; DEUS, E. P. DE. **Caracterização mecânica do compósito PVC/Fibra de coco pelos métodos de Emissão Acústica e de Correlação Digital de Imagem**. Ciencia e Tecnologia dos Materiais, v. 26, n. 1, p. 25–32, 2014.

PIRES, E. N.; MERLINI, C.; AL-QURESHI, H. A.; SALMÓRIA, G. V.; BARRA, G. M. O. Efeito do tratamento alcalino de fibras de juta no comportamento mecânico de compósitos de matriz epóxi. **Polímeros**, v. 22, n. ahead, p. 00–00, 2012.

OLIVEIRA, F. H. **Avaliação comparativa de compósitos unidirecionais de poliéster com fibras de vidro ou de curauá**. 2015. 95 f. Dissertação (Mestre em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ORELL, Olli et al. Characterization of elastic constants of anisotropic composites in compression using digital image correlation. **Composite Structures**, [s. l.], v. 185, n. November 2017, p. 176–185, 2018.

ORUE, A.; JAUREGI, A.; UNSUAIN, U.; *et al*. The effect of alkaline and silane treatments on mechanical properties and breakage of sisal fibers and poly(lactic acid)/sisal fiber composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 84, p. 186–195, 2016. Elsevier Ltd.

RAO, S.; JAYARAMAN, K.; BHATTACHARYYA, D. Micro and macro analysis of sisal fibre composites hollow core sandwich panels. Composites Part B: Engineering, [s. l.], v. 43, n. 7, p. 2738–2745, 2012.

RIBEIRO, L. M**.. Estudo da flamabilidade e resistência à chama de compósito de poliéster insaturado e fibra da folha de abacaxizeiro (PALF)**, 2011. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade do Rio Grande do Norte. Natal-RN

ROCHA, Saulo *et al*. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber – matrix bond in cement based systems. **CONSTRUCTION & BUILDING MATERIALS**, v. 101, p. 730 –740, 2015.

RODRIGUES, Maria Regina Alves. **Estudo da reação de cura da resina epoxi (araldit f) com anidrido ftalico e trietilamina como iniciador**. 1991. 112f. Dissertação (Pós Graduação em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1991.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 38, n. 7, p. 1694–1709, 2007.

SCANAVEZ, C. **Estudo da influência do tratamento químico de fibras de sisal na resistência mecânica de compósitos sisal/epóxi**. 1996. 79 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP, Campinas. 1996.

SILAEX. **Silaex química Ltda**. 2017 – Disponível em: < http://www.silaex.com.br/datasheet/2001e3154.pdf >. Acessado em: 09 de julho de 2017.

SILVA, C. C. **Influência da Umidade nas Propriedades Mecânicas dos Compósitos Híbrido (Sisal/Vidro)**. 2012. 84 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. , 2012.

SILVA, I. L. A. **Propriedades e estrutura de compósitos poliméricos reforçados com fibras continuas de juta**. 2014. 95 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências de Materiais). Centro de Ciência e tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos. , 2014.

SILVA, R. *et al*. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos**. Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 661-671, 2009.

SOUZA, Sérgio Augusto de. **Ensaios mecânicos de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos**. 5.ed. São Paulo: Edgar Blüncher, 1982. 286p.

SREEKUMAR, P. A. et al. Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester composites fabricated by resin transfer molding. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, [s. l.], v. 40, n. 11, p. 1777–1784, 2009.

SUSHEEL KALIA, B.S. KAITH, I. K. Pretreatments of Natural Fibers and their Application as Reinforcing Material in Polymer Composites—A Review Susheel. **Engineering**, v. 47, p. 21–25, 2007.

THAKUR, V. K.; THAKUR, M. K. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. Carbohydrate Polymers, v. 109, p. 102–117, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.03.039>.

Truong M, Zhong W, Boyko S, Alcock M. **A comparative study on natural fibre density measurement**. J Text Inst 2009;100:525–9.

VASCO, M. C. **Efeito da radiação gama sobre as propriedades mecânicas de compósito de fibras de sisal/poliuretana sem uso de agentes de acoplamento**. 2014. 129 f. Dissertação (Mestre em Engenharia – Área de Concentração: Engenharia de Materiais). Programa de Pós-

Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

ZHANG, Zhongsen; LI, Yan; CHEN, Chaozhong. Synergic effects of cellulose nanocrystals and alkali on the mechanical properties of sisal fibers and their bonding properties with epoxy. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 101, p. 480–489, 2017.

ZHU, Feipeng et al. Accurate measurement of elastic modulus of specimen with initial bending using two-dimensional DIC and dual-reflector imaging technique. **Measurement**, [s. l.], v. 119, n. December 2016, p. 18–27, 2018.

# APÊNDICE

Tabela A1 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para fibras sem tratamento.

| Ensaio | Diâmetro (mm) | Deformação Máxima | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,30 | 0,057 | 152,74 | 2305,93 |
| 2 | 0,26 | 0,063 | 222,98 | 2456,58 |
| 3 | 0,27 | 0,061 | 196,18 | 4068,20 |
| 4 | 0,36 | 0,072 | 179,08 | 2714,77 |
| 5 | 0,24 | 0,040 | 176,13 | 3027,62 |
| 6 | 0,17 | 0,040 | 373,45 | 8656,13 |
| 7 | 0,31 | 0,041 | 127,05 | 2361,26 |
| 8 | 0,24 | 0,040 | 174,92 | 6303,32 |
| 9 | 0,42 | 0,046 | 84,09 | 2210,06 |
| 10 | 0,25 | 0,030 | 169,43 | 6457,39 |
| 11 | 0,32 | 0,044 | 134,30 | 2601,91 |
| 12 | 0,21 | 0,041 | 233,38 | 9606,86 |
| 13 | 0,32 | 0,046 | 123,96 | 2644,71 |
| 14 | 0,41 | 0,074 | 111,12 | 1420,42 |
| 15 | 0,32 | 0,048 | 124,02 | 4143,51 |
| 16 | 0,35 | 0,040 | 62,94 | 2550,56 |
| 17 | 0,27 | 0,059 | 247,23 | 8671,98 |
| 18 | 0,25 | 0,061 | 270,11 | 5937,26 |
| 19 | 0,35 | 0,079 | 213,22 | 5445,20 |
| 20 | 0,46 | 0,087 | 155,65 | 719,00 |

Fonte: autoria própria, 2018.

Tabela A2 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para fibras tratadas com 2% de NaOH.

| Ensaio | Diâmetro (mm) | Deformação Máxima | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,19 | 0,037 | 249,53 | 12021,91 |
| 2 | 0,24 | 0,054 | 236,88 | 3676,46 |
| 3 | 0,20 | 0,034 | 305,56 | 8209,96 |
| 4 | 0,24 | 0,061 | 259,88 | 3394,68 |
| 5 | 0,30 | 0,044 | 140,18 | 4057,62 |
| 6 | 0,18 | 0,060 | 325,06 | 2175,85 |
| 7 | 0,15 | 0,037 | 319,70 | 9392,98 |
| 8 | 0,20 | 0,043 | 214,03 | 7617,46 |
| 9 | 0,18 | 0,042 | 330,57 | 9113,14 |
| 10 | 0,17 | 0,034 | 261,75 | 6466,37 |
| 11 | 0,18 | 0,038 | 240,70 | 6237,25 |
| 12 | 0,16 | 0,054 | 292,98 | 3454,35 |
| 13 | 0,41 | 0,087 | 125,63 | 2597,80 |
| 14 | 0,17 | 0,058 | 422,32 | 3497,09 |
| 15 | 0,18 | 0,038 | 262,07 | 9006,63 |
| 16 | 0,22 | 0,061 | 317,23 | 5002,29 |
| 17 | 0,25 | 0,040 | 204,02 | 8136,64 |
| 18 | 0,21 | 0,055 | 271,97 | 8091,74 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 19 | 0,21 | 0,062 | 388,31 | 11162,95 |
| 20 | 0,23 | 0,051 | 276,08 | 5240,69 |

Fonte: autoria própria, 2018.

Tabela A3 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para fibras tratadas com 5% de NaOH.

| Ensaio | Diâmetro (mm) | Deformação Máxima | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,18 | 0,052 | 298,45 | 6440,24 |
| 2 | 0,15 | 0,032 | 321,96 | 13727,64 |
| 3 | 0,16 | 0,040 | 392,31 | 14587,07 |
| 4 | 0,17 | 0,051 | 313,98 | 10210,42 |
| 5 | 0,15 | 0,040 | 318,06 | 18814,44 |
| 6 | 0,14 | 0,036 | 315,01 | 11189,23 |
| 7 | 0,20 | 0,040 | 306,45 | 15420,30 |
| 8 | 0,17 | 0,041 | 279,67 | 11296,84 |
| 9 | 0,15 | 0,051 | 401,19 | 13530,58 |
| 10 | 0,18 | 0,056 | 338,30 | 8105,12 |
| 11 | 0,12 | 0,021 | 294,83 | 17799,23 |
| 12 | 0,14 | 0,029 | 273,33 | 9894,74 |
| 13 | 0,11 | 0,041 | 355,92 | 16079,30 |
| 14 | 0,18 | 0,051 | 343,28 | 4262,56 |
| 15 | 0,15 | 0,028 | 318,28 | 12772,98 |
| 16 | 0,21 | 0,049 | 240,52 | 4440,84 |
| 17 | 0,18 | 0,042 | 230,10 | 6949,95 |
| 18 | 0,25 | 0,048 | 231,38 | 7605,95 |
| 19 | 0,21 | 0,044 | 281,22 | 5785,68 |
| 20 | 0,23 | 0,039 | 190,54 | 6198,63 |

Fonte: autoria própria, 2018.

Tabela A4 – Diâmetro e resultados do ensaio de tração para fibras tratadas com 8% de NaOH.

| Ensaio | Diâmetro (mm) | Deformação Máxima | Tensão Máxima (MPa) | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 0,13 | 0,035 | 389,75 | 19470,50 |
| 2 | 0,13 | 0,045 | 420,85 | 18707,63 |
| 3 | 0,13 | 0,049 | 371,18 | 12114,14 |
| 4 | 0,19 | 0,063 | 353,83 | 10449,02 |
| 5 | 0,20 | 0,064 | 337,72 | 10898,21 |
| 6 | 0,16 | 0,073 | 334,84 | 9793,45 |
| 7 | 0,14 | 0,050 | 312,62 | 6455,96 |
| 8 | 0,12 | 0,046 | 420,83 | 16304,97 |
| 9 | 0,14 | 0,050 | 302,67 | 13090,79 |
| 10 | 0,18 | 0,066 | 411,83 | 12466,26 |
| 11 | 0,18 | 0,070 | 461,30 | 6095,96 |
| 12 | 0,12 | 0,049 | 351,86 | 14135,47 |
| 13 | 0,10 | 0,047 | 331,25 | 12987,73 |
| 14 | 0,17 | 0,051 | 364,54 | 15307,85 |
| 15 | 0,15 | 0,071 | 404,05 | 11641,17 |
| 16 | 0,16 | 0,073 | 387,48 | 13049,14 |
| 17 | 0,16 | 0,059 | 305,61 | 12887,16 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 18 | 0,14 | 0,057 | 335,50 | 7682,59 |
| 19 | 0,15 | 0,038 | 438,46 | 24171,77 |
| 20 | 0,15 | 0,038 | 457,05 | 17647,25 |

Fonte: autoria própria, 2018.

Tabela A5 – Resultado dos ensaios nos compósitos unidirecionais [0] tratados e não tratados.

| | Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Deformação máxima | Módulo de elasticidade (MPa) |
|---|---|---|---|---|
| Sem tratamento | 1 | 49,73 | 0,0133 | 3773,93 |
| | 2 | 62,30 | 0,0135 | 3993,05 |
| | 3 | 53,68 | 0,0134 | 3909,04 |
| | 4 | 53,71 | 0,0125 | 4106,60 |
| | 5 | 56,40 | 0,0154 | 4136,75 |
| | Média | 55,17 | 0,0136 | 3983,87 |
| | Desvio padrão | 4,64 | 0,0010 | 148,49 |
| | Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Deformação máxima | Módulo de elasticidade (MPa) |
| Tratado com 2% de NaOH | 1 | 59,11 | 0,0119 | 4759,61 |
| | 2 | 59,05 | 0,0150 | 4523,46 |
| | 3 | 59,67 | 0,0119 | 4657,46 |
| | 4 | 59,37 | 0,0126 | 4311,21 |
| | 5 | 59,22 | 0,0135 | 4274,65 |
| | Média | 59,29 | 0,0130 | 4505,28 |
| | Desvio padrão | 0,22 | 0,0012 | 189,22 |
| | Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Deformação máxima | Módulo de elasticidade (MPa) |
| Tratado com 5% de NaOH | 1 | 69,84 | 0,0147 | 4605,12 |
| | 2 | 70,28 | 0,0136 | 4920,29 |
| | 3 | 72,15 | 0,0144 | 5024,46 |
| | 4 | 68,14 | 0,0139 | 4643,56 |
| | 5 | 70,97 | 0,0140 | 4590,83 |
| | Média | 70,28 | 0,0141 | 4756,85 |
| | Desvio padrão | 1,48 | 0,0004 | 201,09 |
| | Ensaio | Tensão máxima (MPa) | Deformação máxima | Módulo de elasticidade (MPa) |
| Tratado com 8% de NaOH | 1 | 69,63 | 0,0138 | 4733,88 |
| | 2 | 75,76 | 0,0154 | 5108,91 |
| | 3 | 70,72 | 0,0145 | 4672,95 |
| | 4 | 69,97 | 0,0146 | 4822,26 |
| | 5 | 80,95 | 0,0162 | 4780,17 |
| | Média | 73,41 | 0,0149 | 4823,63 |
| | Desvio padrão | 4,89 | 0,0009 | 168,84 |

Fonte: autoria própria, 2018.