



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



FERNANDA MONIQUE DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ POLIÉSTER
INSATURADO REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL EM DIFERENTES
ORIENTAÇÕES UTILIZANDO CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS

MOSSORÓ

2018

FERNANDA MONIQUE DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ POLIÉSTER
INSATURADO REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL EM DIFERENTES
ORIENTAÇÕES UTILIZANDO CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes, Prof. Dr.

Co-orientador: Zoroastro Torres Vilar, Prof. Dr.

MOSSORÓ
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 nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 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.

S586c Silva, Fernanda Monique da.
Caracterização mecânica de um compósito de matriz poliéster insaturado reforçado com fibras de sisal em diferentes orientações utilizando correlação digital de imagens / Fernanda Monique da Silva. - 2018.
112 f. : il.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes.
Coorientador: 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. Fibras de sisal. 3. Resina poliéster insaturado. 4. Caracterização mecânica. 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.

FERNANDA MONIQUE DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE UM COMPÓSITO DE MATRIZ POLIÉSTER
INSATURADO REFORÇADO COM FIBRAS DE SISAL EM DIFERENTES
ORIENTAÇÕES UTILIZANDO CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Rodrigo Nogueira de Codes,
Prof. Dr.

Co-orientador: Zoroastro Torres Villar, Prof.
Dr.

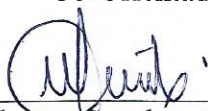
Defendida em: 26 / 02 / 2018.



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



Zoroastro Torres Villar, Prof. Dr. (UFERSA)
Co-Orientador



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



Cândido Jorge de Sousa Lobo, Prof. Dr. (UFC)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sempre iluminar os caminhos necessários para alcançar meus objetivos.

Aos meus familiares, pelo apoio incondicional prestado e motivação.

Ao meu namorado Thulio, por toda paciência, compreensão, confiança e amor.

À Pedro, amigo e mentor de ideias brilhantes para essa dissertação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Codes, e co-orientador, Prof. Dr. Zoroastro Vilar, pelas orientações, por aceitarem o desafio e sempre se mostrarem disponíveis.

Aos meus amigos e colegas de trabalho, por compreenderem minha ausência em momentos necessários para a conclusão deste trabalho.

“Algumas pessoas marcam a nossa vida para sempre, umas porque nos vão ajudando na construção, outras porque nos apresentam projetos de sonho e outras ainda porque nos desafiam a construí-los”.

RESUMO

A utilização de materiais compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras naturais, como o sisal, é de grande relevância para o benefício ambiental e social, visto que há um grande contingente de mão-de-obra envolvido nas atividades de implantação, manutenção, colheita e desfibramento das fibras. Por essa razão, esse trabalho tem como objetivo a confecção e a caracterização mecânica de compósitos de matriz poliéster insaturado reforçada com fibras de sisal. Essa confecção foi feita pelo método de moldagem por laminação manual, em virtude de ele ser adequado às condições disponíveis nas regiões produtoras de sisal. Foram realizados ensaios de tração nas fibras de sisal e nos compósitos unidirecionais sem e com tratamento alcalino em diferentes concentrações (2% e 5%), como forma de avaliar a influência deste nas suas propriedades mecânicas. Na resina e nos compósitos com as fibras, sem tratamento, nas direções longitudinal e transversal e naqueles com diferentes orientações, [90, 0, 0, 90] e [0, 90, 90,0], foram realizados ensaios de tração e de flexão, para avaliar a influência da orientação das fibras nas suas propriedades. Por fim, compósitos com orientação [0, 90, 90, 0] foram confeccionados com diferentes concentrações em volume de fibra (10%, 20% e 30%), para avaliar a influência da concentração nas suas propriedades mecânicas de tração. Utilizou-se a técnica da Correlação Digital de Imagens (CDI) nos ensaios de tração, como alternativa para medir os campos de deslocamentos e deformações ao longo da superfície desses materiais. A perda de massa, a densidade e as propriedades mecânicas do sisal e dos compósitos unidirecionais foram aumentadas conforme se aumentou a concentração de NaOH do tratamento químico. Os compósitos unidirecionais [0] tiveram boas propriedades mecânicas, enquanto que os testados na direção transversal da fibra [90] foram baixas. Os compósitos orientados nas duas configurações apresentaram mesmo resultado de tração. A resistência a tração dos compósitos aumentou com o incremento de concentração em volume da fibra.

Palavras-chave: Compósitos. Fibras de sisal. Resina poliéster insaturado. Caracterização mecânica. Correlação Digital de Imagens.

ABSTRACT

The use of composite materials of polymer matrix reinforced with natural fibers, such as sisal, is of great relevance for the environmental and social benefit, since there is a large contingent of labor involved in the implantation, maintenance, harvest and fiber defibration. For this reason, this work has the objective of confection and mechanical characterization of composites of unsaturated polyester matrix reinforced with sisal fibers. This preparation was done by the method of molding by manual lamination, because it is suitable the conditions available in the regions producing sisal. Traction tests were performed on sisal fibers and unidirectional composites with and without alkaline treatment at different concentrations (2% and 5%) as a way of evaluating the influence of this on their mechanical properties. In the resin and in the composites with the fibers, without treatment, in the longitudinal and transverse directions and in those with different orientations, [90, 0, 90] and [0, 90, 90,0], tensile and tensile tests were carried out. to evaluate the influence of fiber orientation on its properties. Finally, composites with orientation [0, 90, 90, 0] were made with different fiber volume concentrations (10%, 20% and 30%) to evaluate the influence of the concentration on its mechanical tensile properties. The Digital Image Correlation (CDI) technique was used in the tensile tests as an alternative to measure the displacement and deformation fields along the surface of these materials. The loss of mass, density and mechanical properties of sisal and unidirectional composites were increased as the NaOH concentration of the chemical treatment was increased. The unidirectional composites [0] had good mechanical properties, whereas those tested in the transverse direction of the fiber [90] were low. The composites oriented in the two configurations presented similar results. The tensile strength of the composites increased with increasing fiber concentration.

Keywords: Composites. Sisal fibers. Unsaturated polyester resin. Mechanical characterization. Digital Image Correlation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região do semi-árido produtora de sisal.....	18
Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço utilizado.....	23
Figura 3- Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço utilizado.....	24
Figura 4 - Representação de um compósito unidirecional com solicitação na direção longitudinal.....	26
Figura 5 - (a) Curvas tensão-deformação para materiais com fibras frágeis e matriz dúctil. (b) Curva tensão-deformação para um compósito reforçado com fibras alinhadas que está exposto a uma tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento; também estão superpostas as curvas para os materiais da fibra e da matriz mostradas na parte (a)	27
Figura 6 - Representação de um compósito unidirecional com solicitação na direção transversal.....	28
Figura 7 - Esquema de uma lâmina reforçada com fibras unidirecionais – sistema de coordenadas local (1-2-3).....	31
Figura 8 - Elemento infinitesimal submetido a um estado tridimensional de tensões.....	32
Figura 9 – Estado plano de tensões em uma lâmina	34
Figura 10 – Disposição das camadas de um laminado com n camadas.....	37
Figura 11 – Representação de um laminado cross-ply simétrico com quatro camadas	38
Figura 12- Representação da reação de obtenção do poliéster insaturado.....	40
Figura 13 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal.....	44
Figura 14 - Etapas do processamento das fibras de sisal: (a) plantação de sisal; (b) desfibramento; (c) secagem ao ar livre; (d) fibra de sisal.	45
Figura 15 - Equipamentos típicos utilizados na correlação digital de imagens	50
Figura 16 - Padrão da textura necessária para utilização do Correli Q4LMT.....	51

Figura 17 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho	53
Figura 18 - Fibras de sisal	54
Figura 19 - Tratamento alcalino em fibras de sisal.....	56
Figura 20: Imagens dos diâmetros das fibras de sisal analisados em microscópio óptico com resolução de 5x: (a) sisal sem tratamento; (b) sisal com 2% de NaOH; (c) sisal com 5% de NaOH. (Escala: 255 pixels = 0,01 mm).	57
Figura 21 - Ensaio de tração na fibra de sisal.....	58
Figura 22 - Padrão utilizado no ensaio de tração das fibras de sisal	59
Figura 23 – Esquema de balança com o dispositivo para determinação da densidade da resina e do compósito.....	60
Figura 24 - Corpos de prova de tração de compósitos unidirecionais sem tratamento químico	62
Figura 25 - Pintura do corpo de prova para análise na correlação digital de imagens	63
Figura 26 - Ensaio de tração em compósito utilizando correlação digital de imagens.....	64
Figura 27: Ensaio de flexão três pontos em compósito	66
Figura 28: Corpos de prova de flexão de compósitos unidirecionais sem tratamento químico.....	67
Figura 29: (a) Molde utilizado para confecção dos corpos de prova dos compósitos; (b) Placa do compósito obtido após a cura da resina.....	68
Figura 30 - Correlação digital de imagens da resina curada: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.	71
Figura 31 - Curva tensão-deformação da resina poliéster insaturado.....	72
Figura 32 - Gráfico da variação da perda de massa das fibras de sisal em função da variação de concentração do tratamento alcalino	74
Figura 33 - Curvas tensão-deformação das fibras de sisal com e sem tratamento alcalino	76

Figura 34 - Gráfico de variação do diâmetro das amostras de sisal em função da concentração do tratamento químico.	77
Figura 35 - Gráfico de variação da tensão máxima das amostras de sisal em função da concentração do tratamento químico.	78
Figura 36 - Gráfico de variação do módulo de elasticidade das amostras sisal em função da concentração do tratamento químico.	78
Figura 37 - Correlação digital de imagens para o compósito unidirecional com 20% de fibra: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.	80
Figura 38 - Curvas de tensão-deformação para os compósitos unidirecionais com e sem tratamento químico	81
Figura 39 - Gráfico de variação da tensão máxima de tração dos compósitos unidirecionais em função da concentração do tratamento químico.	83
Figura 40 - Gráfico de variação do Módulo de Elasticidade de tração dos compósitos unidirecionais em função da concentração do tratamento químico.	83
Figura 41 - Gráfico de variação da deformação máxima de tração dos compósitos unidirecionais função da concentração do tratamento químico.	84
Figura 42 - Correlação digital de imagens para o compósito unidirecional [90]: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.....	87
Figura 43 - Curva tensão-deformação do compósito unidirecional [90]	87
Figura 44 - Correlação digital de imagens para o compósito orientado [0 90 90 0]: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.....	90
Figura 45 - Curva tensão-deformação do compósito orientado [0 90 90 0]	90
Figura 46 - Correlação digital de imagens para o compósito orientado [90 0 0 90]: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.....	92

Figura 47 - Curva tensão-deformação do compósito orientado [90 0 0 90]	93
Figura 48 - Gráfico da variação da tensão máxima de tração dos compósitos unidirecionais e orientados em função da variação da orientação da fibra de sisal.....	95
Figura 49 - Gráfico da variação do módulo de elasticidade dos compósitos unidirecionais e orientados em função da variação da orientação da fibra de sisal.....	95
Figura 50 - Gráfico da variação da tensão máxima de flexão dos compósitos unidirecionais e orientados em função da variação da orientação da fibra de sisal.....	97
Figura 51 - Correlação digital de imagens para o compósito orientado com 10% de fibra de sisal: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.	98
Figura 52 - Correlação digital de imagens para o compósito orientado com 30% de fibra de sisal: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.	99
Figura 53 - Curvas de tração-deformação para os compósitos [90 0 0 90] com: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20%; (d) 30% de volume de fibras.	100
Figura 54 - Gráfico da variação da tensão máxima dos compósitos [0 90 90 0] em função da variação concentração de volume da fibra de sisal.....	102
Figura 55 - Gráfico da variação do módulo de elasticidade dos compósitos [0 90 90 0] em função da variação concentração de volume da fibra de sisal.....	102
Figura 56 - Resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade em função da concentração de fibras de sisal.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação e exemplo de fibras vegetais	42
Tabela 2 - Constituição básica de fibras vegetais.....	43
Tabela 3 – Quantidade de corpos de provas utilizados no ensaio de tração dos compósitos ..	62
Tabela 4 - Parâmetros utilizados para a análise da Correlação Digital de Imagens	65
Tabela 5 – Quantidade de corpos de prova utilizados no ensaio de flexão dos compósitos	67
Tabela 6 - Resultados de densidade da resina poliéster insaturado	69
Tabela 7 - Valores das propriedades de tração da resina poliéster insaturado	72
Tabela 8 - Valores das propriedades de flexão da resina poliéster insaturado	73
Tabela 9 – Perda de massa das amostras de sisal em função da concentração do tratamento alcalino	73
Tabela 10 – Densidade das fibras de sisal para cada nível de tratamento alcalino	75
Tabela 11 - Propriedades das amostras de sisal em função do tratamento químico.....	76
Tabela 12 - Propriedades dos compósitos unidirecionais sem tratamento químico	81
Tabela 13 - Valores teóricos de tensão e módulo de elasticidade para os compósitos.....	82
Tabela 14– Propriedades mecânicas de flexão dos compósitos unidirecionais [0]	85
Tabela 15 – Propriedades mecânicas de tração dos compósitos unidirecionais [90]	88
Tabela 16 – Propriedades mecânicas de flexão dos compósitos unidirecionais com fibras na direção transversal [90]	88
Tabela 17 - Propriedades mecânicas de tração dos compósitos orientados [0, 90, 90, 0]	91
Tabela 18 - Propriedades mecânicas de flexão dos compósitos orientados [0 90 90 0]	91
Tabela 19 - Propriedades mecânicas de tração dos compósitos orientados [90, 0, 0, 90]	93

Tabela 20 – Propriedades mecânicas de flexão dos compósitos orientados 94

Tabela 21 - Propriedades mecânicas de tração dos compósitos com diferentes volumes de
fibras de sisal. 101

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	21
2.1 OBJETIVO GERAL	21
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS	22
3.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS	23
3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS LAMINADOS.....	25
3.3.1 Análise micromecânica de uma lâmina	26
3.3.1.1 Propriedades de compósitos unidirecionais na direção longitudinal	26
3.3.1.2 Propriedades de compósitos unidirecionais na direção transversal	28
3.3.1.3 Fração volumétrica da fibra e da matriz	29
3.3.1.4 Fração mássica da fibra e da matriz	30
3.3.1.5 Densidade da fibra e da matriz.....	31
3.3.2. Análise macromecânica de uma lâmina	31
3.3.2.1 Relação tensão-deformação para materiais ortotrópicos no estado plano de tensões	32
3.3.3. Análise macromecânica de laminados	36
3.3.3.1 Tensões e deformações de um laminado	36
3.3.3.2 Equações constitutivas do laminado.....	37
3.3.3.3 Propriedades elásticas equivalentes de laminados <i>cross-ply</i>	38
3.4 MATRIZ POLIMÉRICA	39
3.4.1 Resina Poliéster Insaturado	40
3.5 FIBRAS NATURAIS.....	41
3.5.1 Fibras vegetais	42

3.5.1.1	Fibra de sisal	44
3.6	MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL DAS FIBRAS VEGETAIS	46
3.6.1	Tratamento alcalino	47
3.7	CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA	47
3.7.1	Ensaio de tração	48
3.7.2	Ensaio de flexão	48
3.8	CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (CDI)	50
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
4.1	MATERIAIS.....	54
4.1.1	Resina Poliéster Insaturado	54
4.1.2	Fibras de sisal	54
4.1.3	Reagentes	55
4.2	MÉTODOS	55
4.2.1	Preparação das fibras de sisal.....	55
4.2.1.1	Pré-cardagem e corte	55
4.2.1.2	Tratamento com hidróxido de sódio.....	55
4.2.2	Determinação da perda de massa e da densidade das fibras de sisal	56
4.2.3	Determinação do diâmetro das fibras.....	57
4.2.4	Ensaio de tração nas fibras	58
4.2.5	Determinação da densidade da resina curada.....	59
4.2.6	Preparação dos compósitos	60
4.2.7	Ensaio de tração nos compósitos e na resina curada.....	61
4.2.8.	Correlação digital de imagens.....	63
4.2.8.1	Aplicação de textura	63
4.2.8.2	Montagem do ensaio.....	64
4.2.8.3	Análise dos resultados	64
4.2.8.4	Obtenção das curvas tensão-deformação.....	65

4.2.9	Ensaio de flexão no compósito e na resina curada.....	66
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
5.1	CONFECÇÃO DOS COMPÓSITOS POR LAMINAÇÃO MANUAL.....	68
5.2	PROPRIEDADES DA MATRIZ POLIÉSTER INSATURADO.....	69
5.2.1.	Densidade.....	69
5.2.2.	Propriedades mecânicas de tração.....	70
5.2.3.	Propriedades mecânicas de flexão	73
5.3	INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO NAS PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE SISAL	73
5.3.1.	Perda de massa	73
5.3.2.	Densidade.....	75
5.3.3.	Diâmetro e propriedades mecânicas de tração.....	75
5.4	Influência do tratamento químico nas propriedades dos compósitos unidirecionais	79
5.5	PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS E ORIENTADOS	85
5.5.1.	Compósitos unidirecionais [0].....	85
5.5.1.1	Propriedades de tração.....	85
5.5.1.2	Propriedades de flexão.....	85
5.5.2.	Compósitos unidirecionais [90].....	86
5.5.2.1	Propriedades de tração.....	86
5.5.2.2	Propriedades de flexão.....	88
5.5.3.	Compósitos orientados [0 90 90 0]	89
5.5.3.1	Propriedades de tração.....	89
5.5.3.2	Propriedades de Flexão.....	91
5.5.4.	Compósitos orientados [90 0 0 90]	91
5.5.4.1	Propriedades de tração.....	92
5.5.4.2	Propriedades de Flexão.....	94

5.5.5.	Influência da orientação da fibra nos compósitos unidirecionais e orientados...	94
5.6	INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DA FIBRA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS ORIENTADOS [0 90 90 0]	98
6.	CONCLUSÕES.....	104
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1. INTRODUÇÃO

Com a crescente preocupação dos possíveis impactos ambientais gerados no mundo, a busca por novas alternativas de materiais visando amenizar esses problemas, intensificou a pesquisa e o desenvolvimento de materiais compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibras naturais (ISHIZAKI et al., 2006).

Os compósitos são definidos pela literatura como um material resultante da formação de dois ou mais com propriedades e características distintas. Essa classe tem como principal enfoque gerar melhores propriedades, pois um compósito, por ser multifásico, possui além das propriedades inerentes de cada constituinte, propriedades intermediárias decorrentes da formação de uma região interfacial (SILVA, 2014). Esses materiais possuem duas fases, uma denominada matriz, que é contínua e envolve a outra fase, denominada de dispersa ou reforço.

A matriz pode ser cerâmica, polimérica ou metálica e tem como principal função transmitir e distribuir na fase dispersa as cargas externamente aplicadas ao compósito (MEDEIROS, 2006). Os polímeros apresentam algumas vantagens em relação aos demais materiais, como baixo custo, facilidade de processamento e alta produtividade. Em razão disso, os compósitos de matrizes poliméricas estão sendo utilizados em larga escala para diversas aplicações, que vão desde as mais simples até as mais complexas, como as aeroespaciais (HOLANDA, 2013). Essas matrizes são classificadas em termoplásticas, termorrígidas ou elastoméricas.

As resinas termorrígidas são as mais utilizadas em compósitos, devido possuírem, em geral, maior resistência térmica e estabilidade dimensional e serem menos sensíveis a ataques químicos do que as resinas termoplásticas (SILVA, 2014). Destaca-se, entre elas, a resina poliéster insaturado, que é bastante utilizada em compósitos devido ao baixo custo e por apresentar propriedades mecânicas satisfatórias (NÓBREGA, 2007).

O reforço pode possuir diversas formas, como partículas, fibras, lâminas, entre outras, dispostas de maneira ordenada ou aleatória. É adicionado à matriz para modificar suas características, como resistência mecânica e fragilidade (JUNIOR, 2009). As fibras são classificadas de acordo com a sua natureza, em sintéticas e naturais.

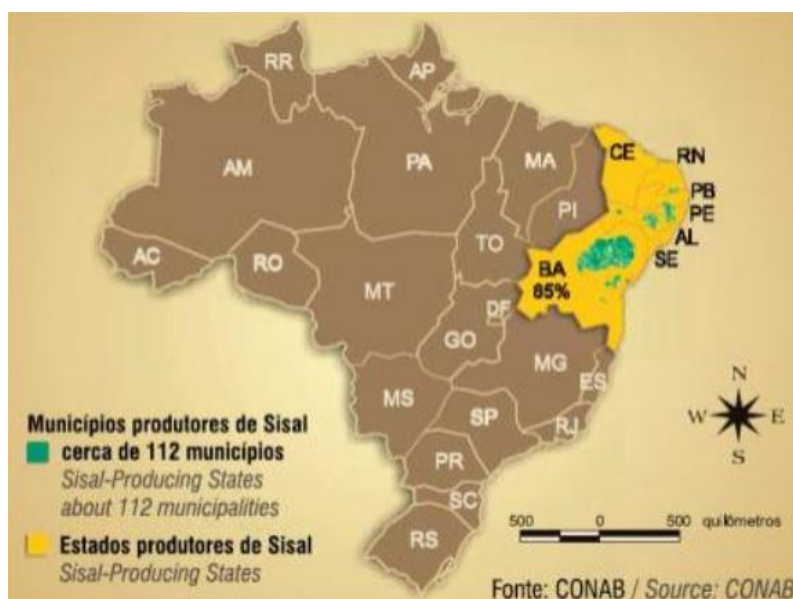
As fibras sintéticas, como a de vidro, possuem excelentes propriedades térmicas e mecânicas, porém não são ecologicamente corretas, por sua difícil eliminação no meio

ambiente e não serem recicláveis (HARISH et al., 2009). As fibras naturais são divididas em três grupos: de origem mineral, de origem animal e de origem vegetal.

O uso de fibras vegetais como reforço em compósitos poliméricos tem como principal finalidade substituir as fibras sintéticas (PRAVEEN et al., 2016). São comumente denominadas de fibras celulósicas ou lignocelulósicas, por possuírem em sua composição principalmente a celulose (HOLANDA, 2013).

O sisal, dentre estas, é uma das fibras vegetais mais utilizadas no mundo, sendo o Brasil o maior produtor, através da região do semi-árido, como é mostrado na Figura 1 (CERCHIARO, 2010). É aplicada na produção de fios, cordas e tapetes. São extraídas a partir das folhas da planta de sisal e geram um aproveitamento de apenas 4% para fins comerciais, sendo o restante descartado ou utilizado em adubos (MEDEIROS, 2006). Portanto, sua utilização como reforço em materiais compósitos é particularmente interessante, visto que são abundantes, provenientes de fontes renováveis, possuem baixo custo, baixa densidade, resistência específica elevada e não são abrasivas (JOSEPH et al, 1996).

Figura 1 - Região do semi-árido produtora de sisal



Fonte: CERCHIARO apud SINDIFIBRAS/CONAB, 2009

Compósitos com melhores propriedades mecânicas são obtidos pela transferência eficiente de tensões entre a matriz e o reforço. Para isso é necessário que haja uma boa adesão na interface polímero-fibra, uma vez que essa transferência ocorre na região de contato entre as fases (SEGATELLI et al., 2012). Um dos principais desafios que envolve a utilização do sisal é a busca por sua melhor aderência na matriz, visto que este possui baixa

compatibilidade com a matriz hidrofóbica, pois ele é hidrofílico, reduzindo assim o seu potencial (MEGGIATO et al, 2009). Diversos estudos são realizados para solucionar esse problema, sendo um dos métodos a realização de tratamentos químicos das fibras com o uso de agentes de acoplamento (ISMAIL et al., 2002).

Paula (1996) estudou a influência do tratamento químico de fibras de sisal nas propriedades mecânicas dos compósitos sisal/epóxi. As fibras foram tratadas com hidróxido de sódio a várias concentrações, com o intuito de melhorar a adesão entre a fibra e a matriz. Os resultados demonstraram que o tratamento químico incrementou a molhabilidade das fibras e, portanto, aumentou a adesão na interface fibra/matriz. Verificou-se também um aumento significativo de resistência e módulo nos compósitos com fibra de sisal tratada com NaOH 5%, demonstrando que o tratamento químico das fibras foi eficiente.

Cerchiaro (2010) desenvolveu um tecido com fibra de sisal para reforço de um compósito com matriz poliéster termofixa, por moldagem manual, com o intuito de avaliar a sua viabilidade em substituição aos compósitos com fibras de vidro. Concluiu após os estudos teóricos e experimentais que a substituição é viável para muitas aplicações que não requerem capacidades de cargas muito altas e que a tecnologia utilizada para o desenvolver também correspondeu aos fins propostos, visto que, além de obter propriedades comparáveis, o reduzido custo da fibra de sisal em relação a outros reforços permite uma alta competitividade dentro do mercado consumidor.

Holanda (2013) desenvolveu compósitos de resina epóxi com fibras de sisal totalmente alinhadas de forma unidirecional e em sobreposição, com a proporção fibra-matriz 20-80, e comparou as propriedades mecânicas desses materiais. Concluiu que os compósitos com configuração de sobreposição possuem melhores módulos de elasticidade na tração e na flexão em três pontos, enquanto que os compósitos totalmente alinhados demonstraram maiores resistência na tração.

Maurya (2015) estudou as propriedades mecânicas de compósitos epóxi reforçado com fibras curtas de sisal dispostas aleatoriamente. Foi utilizado o método por laminação manual com vários comprimentos de fibra, mas com a mesma porcentagem em peso de teor de fibra de sisal. Concluiu que a resistência a tração do compósito não foi aumentada através do reforço sisal, mas a resistência à flexão foi melhorada de 25% com fibras de 15 mm e as propriedades de impacto também melhoraram com adição de fibra de sisal de 20 mm.

Percebe-se que as propriedades de um compósito dependem de um conjunto de fatores, como as propriedades individuais da fibra e da matriz, a concentração e a orientação das fibras, a geometria e, principalmente, a adesão entre os componentes (JOSEPH et al, 1996).

Portanto, são vários os parâmetros que devem ser avaliados, de forma minuciosa, para se obter um estudo com resultados satisfatórios.

Neste contexto, a proposta geral do presente trabalho é de desenvolver um compósito de matriz poliéster insaturado reforçado com fibras de sisal em diferentes orientações, através do método por laminação manual, e estudar a influência de parâmetros como orientação e concentração da fibra nas propriedades mecânicas do compósito. Além de avaliar a influência de tratamento alcalino nas propriedades das fibras de sisal e de compósitos unidirecionais.

A justificativa desse estudo é que a utilização de fibras naturais, como o sisal, é de grande relevância para o benefício ambiental e social, já que são materiais de fonte renovável e que há um grande contingente de mão-de-obra envolvido nas atividades de implantação, manutenção, colheita e desfibramento da fibra. Em particular para a região do semi-árido brasileiro, pois esta é a maior produtora de sisal no Brasil e que não utiliza essas fibras de forma eficiente, descartando a maior parcela produzida.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral a confecção de um compósito de matriz poliéster insaturado reforçada com fibras de sisal, pelo método de moldagem por laminação manual e caracterizá-lo por ensaios mecânicos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Confeccionar de forma simples e com baixo custo compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal, para que possam ser utilizados como fonte de renda na zona rural;
- Caracterizar mecanicamente as fibras de sisal, realizando ensaios de tração, sem tratamento e com tratamento em diferentes concentrações de NaOH, como forma de avaliar a influência da variação da concentração do hidróxido de sódio nas propriedades da fibra;
- Caracterizar mecanicamente a resina poliéster insaturado e os compósitos, realizando ensaios de tração e de flexão três pontos, auxiliados pela técnica da correlação digital de imagens;
- Confeccionar corpos de prova de compósitos de poliéster insaturado reforçados com sisal, utilizando dois tipos de orientações para a fibra no método de laminação manual, como forma de avaliar a influência da variação da orientação da fibra nas propriedades mecânicas dos compósitos;
- Confeccionar corpos de prova de compósitos de poliéster insaturado com reforçados com sisal, utilizando diferentes frações em volume fibra/resina, como forma de avaliar a influência da variação da concentração da fibra nas propriedades mecânicas de tração dos compósitos;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

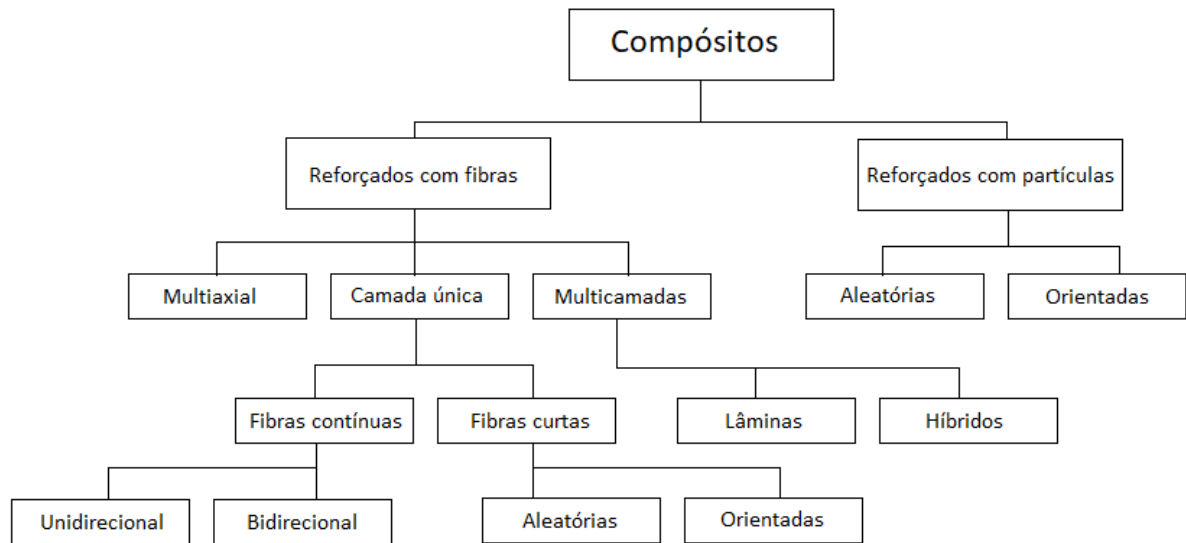
3.1 MATERIAIS COMPÓSITOS

Diversas aplicações tecnológicas necessitam de materiais com combinações de propriedades que não são obtidas nos materiais poliméricos, cerâmicos ou metálicos. Para não ser necessário desenvolver um novo material que pode ou não ter as propriedades exigidas para determinada aplicação, pode-se modificar um material já existente, através da incorporação de outro componente que faça com que este atenda aos requisitos especificados (DEMAR, 2009).

Nesse contexto, os compósitos estão sendo cada vez mais estudados e são definidos pela literatura como um material resultante da formação de dois ou mais com propriedades e características distintas separados por uma interface bem definida. Essa classe de materiais tem como principal enfoque obter certas propriedades que não são encontradas nos materiais isoladamente. Pois um compósito, por ser multifásico, possui propriedades superiores a cada fase da sua composição, decorrentes da formação de uma região interfacial (SILVA, 2014).

São constituídos de uma fase denominada matriz, que é contínua e envolve a outra fase, denominada de dispersa ou reforço (CALLISTER, 2012). A matriz pode ser cerâmica, polimérica ou metálica e tem como principal função transmitir e distribuir na fase dispersa as cargas externamente aplicadas ao compósito (MEDEIROS, 2006). O reforço pode se apresentar como partículas, fibras, lâminas, entre outras, dispostas de maneira ordenada ou aleatória, como mostra o fluxograma da Figura 2. É adicionado à matriz para modificar suas características, como aumento de resistência mecânica e diminuição da fragilidade (JUNIOR, 2009).

Figura 2 - Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço utilizado



Fonte: adaptado de HOLANDA, 2013.

Esses materiais são de fácil obtenção, baixo custo e há uma grande variabilidade de propriedades que podem ser obtidas com o desenvolvimento destes, pois elas dependem de um conjunto de fatores, que podem ser alterados e analisados conforme a aplicação desejada, como as propriedades dos seus componentes e a adesão entre eles, a concentração e orientação das fibras, a distribuição das frações volumétricas das fases e a geometria, a forma e o tamanho (JOSEPH *et al.*, 1996).

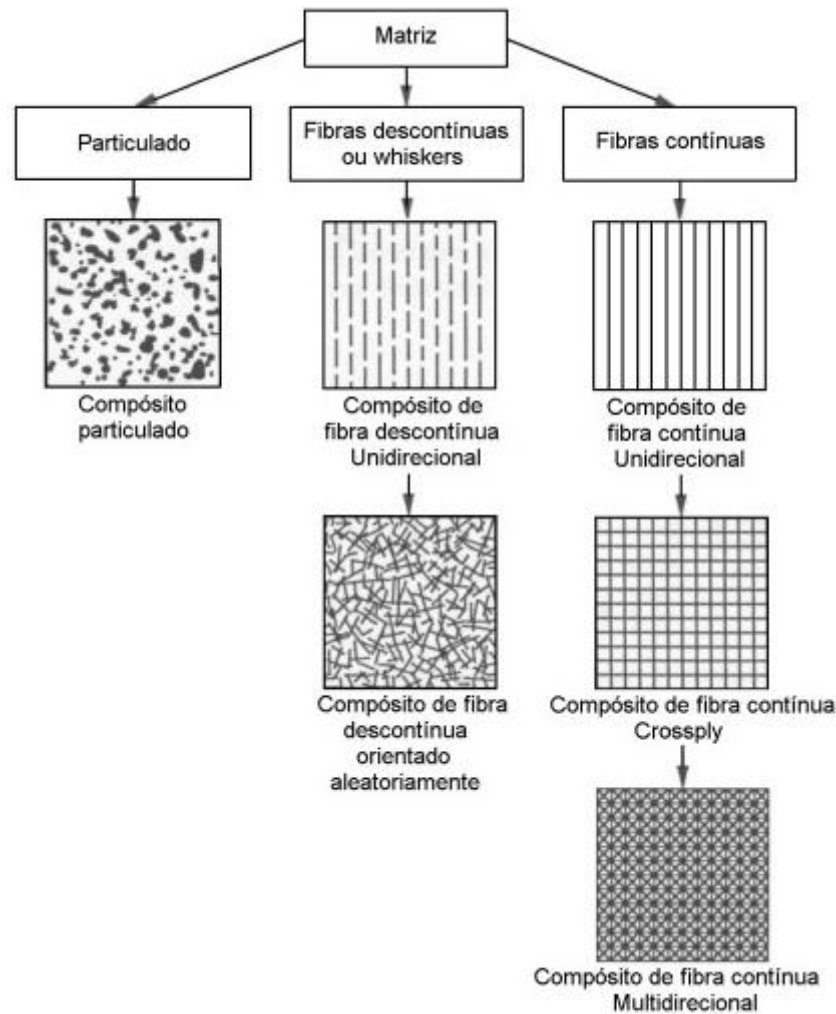
3.2 COMPÓSITOS POLIMÉRICOS REFORÇADOS COM FIBRAS

A exigência de materiais com elevado valor de resistência e rigidez específica é cada vez maior nas aplicações. Essas características são comumente encontradas em materiais compósitos, particularmente polímeros termofixos com reforços fibrosos (MARINUCCI, 2011).

Materiais poliméricos reforçados com fibras consistem em fibras de alta resistência incorporadas a uma matriz polimérica com interfaces distintas entre eles. Desta forma, ambas possuem suas características físicas e químicas distintas, mas produzem uma combinação de propriedades que não podem ser obtidas com qualquer um dos constituintes atuando isoladamente (MALLICK, 2007).

Como mostra a Figura 3, as fibras podem ser contínuas (longas) ou descontínuas (curtas), alinhadas ou distribuídas de forma aleatória, podendo ser em forma de fios, mantas ou tecidos com diferentes disposições (SILVA, 2003).

Figura 3- Classificação dos materiais compósitos segundo o reforço utilizado



Fonte: DANIEL, 1994.

Em geral, os compósitos poliméricos reforçados por fibras contínuas constituem os de melhor performance mecânica. Diferentemente dos compósitos com fibras descontínuas, que possuem um comportamento isotrópico em uma escala macroscópica, apresentam propriedades mecânicas ortotrópicas. São de alta resistência e rigidez na direção das fibras, mas, quando são solicitados na direção transversal possuem baixo desempenho. Em carregamentos multiaxiais são geralmente utilizados compósitos laminados, que são formados pela união de várias lâminas ou camadas com diferentes orientações. O desempenho destes

materiais depende do tipo de fibra e matriz, volume de fibra e da sequência de empilhamento das camadas (SILVA, 2003).

3.3 COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS LAMINADOS

O comportamento mecânico dos compósitos reforçados por fibras é analisado sob dois pontos de vista, micromecânico e macromecânico, devido à complexidade envolvida na previsão de seu comportamento, consequência de sua natureza fibrosa e das heterogeneidades resultantes da combinação de materiais (FILHO, 2000).

A análise micromecânica reconhece a heterogeneidade da lâmina do compósito, porém não considera a estrutura interna dos constituintes básicos (fibra e matriz). Para desenvolver essa metodologia de caracterização da resposta do material nesse nível de análise, várias hipóteses têm de ser introduzidas (FILHO, 2000).

A análise macromecânica desconsidera a microestrutura da lâmina e considera somente suas propriedades médias como sendo importantes. Nesse caso, cada lâmina é considerada homogênea e com propriedades diferentes na direção e perpendicularmente à fibra, ou seja, ortótropa. O compósito é considerado como resultante da superposição de várias lâminas para formar a estrutura desejada (FILHO, 2000).

Os compósitos reforçados por fibras são denominados de acordo com a orientação e o ângulo de suas camadas. Se as fibras estiverem orientadas na mesma direção, são denominados de compósitos unidirecionais. Caso as camadas de fibras que constituem o laminado possuam orientações diferentes, sendo as camadas sobrepostas com ângulos de orientação de fibras diferente de zero, o compósito resultante é denominado de laminado multidirecional (DANIEL, 1994).

Para estes últimos, se têm as seguintes denominações:

- Laminados simétricos: quando o material, o ângulo e a espessura das camadas são as mesmas acima e abaixo do plano médio. Exemplo: $[0/30/\overline{60}]_s$ (KAW, 2006);
- Laminados *cross-ply*: quando as camadas são feitas com apenas os ângulos de 0° e 90° . Exemplo: $[0/90_2/0/90]$ (KAW, 2006);

- Laminados *angle-ply*: quando as camadas do material e a espessura são orientadas com ângulos θ e $-\theta$. Exemplo: $[-40/40/-40 / 40]$ (KAW, 2006).

3.3.1 Análise micromecânica de uma lâmina

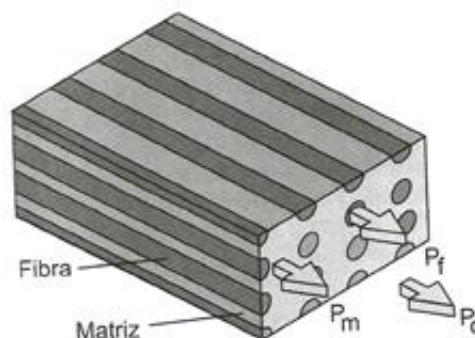
As propriedades dos compósitos dependem das propriedades das matérias-primas que o constituem, da interação entre estas e das suas respectivas distribuições. O objetivo da análise micromecânica é determinar as propriedades mecânicas do compósito em função de seus constituintes (fibra e matriz polimérica), bem como das proporções relativas destes (MARINUCCI, 2011).

Para essa análise, são feitas as seguintes hipóteses (MARINUCCI, 2011):

- A lâmina é elástica e livre de tensões internas e térmicas,
- As fibras possuem propriedades e diâmetro uniformes, são contínuas, paralelas e regularmente espaçadas no compósito,
- A matriz é homogênea e isotrópica com comportamento linear elástico,
- Há uma perfeita ligação entre a fibra e a matriz,
- Não há presença de vazios,

3.3.1.1 Propriedades de compósitos unidirecionais na direção longitudinal

Figura 4 - Representação de um compósito unidirecional com solicitação na direção longitudinal



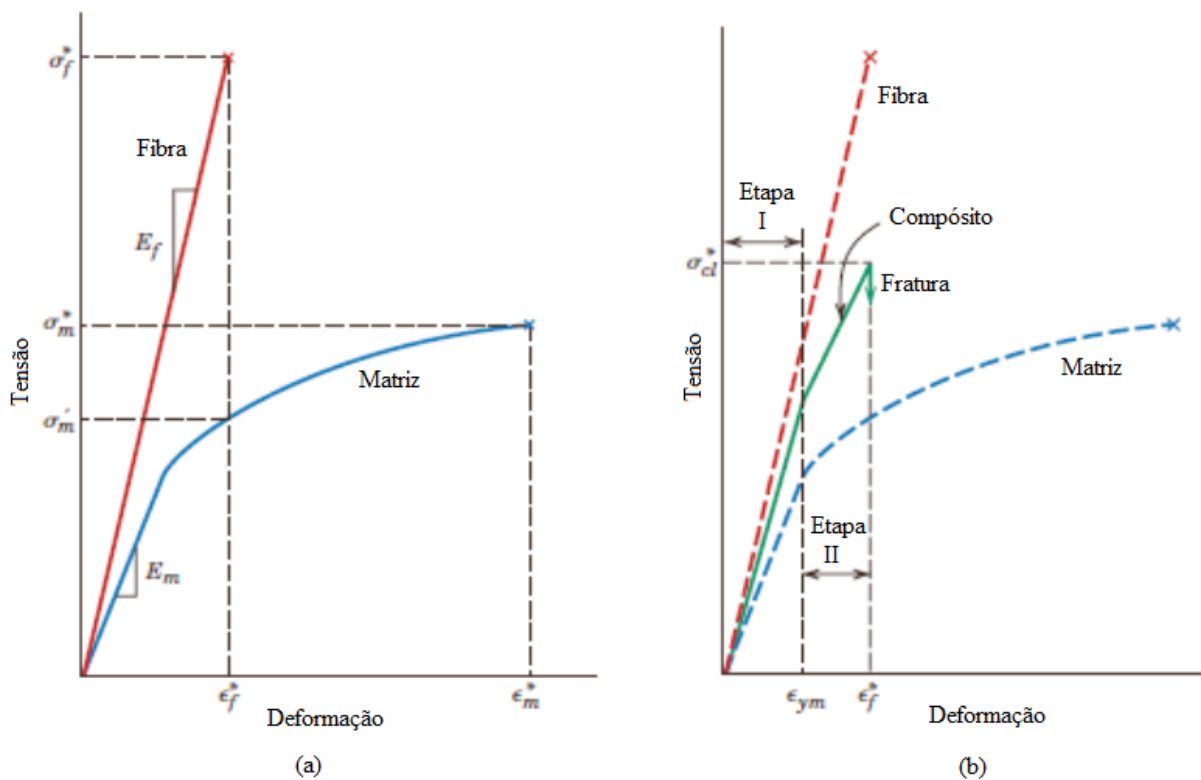
Fonte: MARINUCCI, 2011.

Considerando um comportamento elástico de um compósito reforçado com fibras contínuas e alinhadas, cujo carregamento P_c está na direção do alinhamento das fibras (Figura 4) e assumindo que quando as fibras falham o compósito inteiro falha, porque elas suportam a maior carga do compósito (Figura 5), temos que a tensão máxima à tração desse compósito é dado por (KAW, 2006):

$$(\sigma_c^*)_{\max} = (\sigma_f^*)_{\max} v_f + (\epsilon_f)_{\max} E_m (1 - v_f) \quad (3.1)$$

Sendo $(\sigma_f^*)_{\max}$ a tensão máxima suportada pela fibra e $(\epsilon_f)_{\max}$ a deformação máxima da fibra.

Figura 5 - (a) Curvas tensão-deformação para materiais com fibras frágeis e matriz dúctil. (b) Curva tensão-deformação para um compósito reforçado com fibras alinhadas que está exposto a uma tensão uniaxial aplicada na direção do alinhamento; também estão superpostas as curvas para os materiais da fibra e da matriz mostradas na parte (a)



Fonte: CALLISTER, 2012.

Seguindo as mesmas hipóteses, o módulo de elasticidade é expresso por:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.2)$$

ou

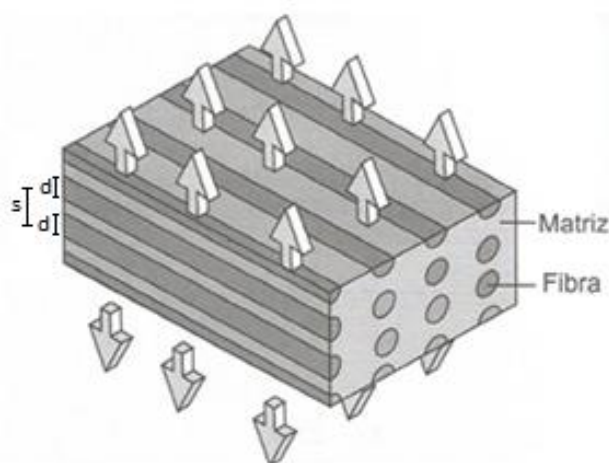
$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (3.2)$$

As equações 3.1 e 3.3 são denominadas de “regra das misturas”. Para esse modelo, conforme mostra as equações, a contribuição da fibra e da matriz em relação às propriedades médias do compósito são proporcionais às frações volumétricas (MARINUCCI, 2011).

3.3.1.2 Propriedades de compósitos unidirecionais na direção transversal

A seguir são mostradas as equações para os compósitos unidirecionais na direção transversal (Figura 6).

Figura 6 - Representação de um compósito unidirecional com solicitação na direção transversal



Fonte: adaptado de MARINUCCI, 2011.

A deformação máxima de uma lâmina tracionada transversalmente à orientação das fibras, considerando que quando essa falha é devido à ruptura da matriz, é dada por (KAW, 2006):

$$(\varepsilon_y^T)_{\max} = \left[\frac{d}{s} \frac{E_m}{E_f} + \left(1 - \frac{d}{s}\right) \right] (\varepsilon_m^T)_{\max} \quad (3.3)$$

Sendo d o diâmetro das fibras, s a distância entre os centros da fibra e $(\varepsilon_m^T)_{\max}$ a tensão máxima da matriz, d o diâmetro das fibras e s é a distância entre os centros da fibra (KAW, 2006).

$$(\varepsilon_y^T)_{\max} = \left[\frac{d}{s} \frac{E_m}{E_f} + \left(1 - \frac{d}{s}\right) \right] (\varepsilon_m^T)_{\max}$$

A tensão máxima transversal é dada por (KAW, 2006):

$$(\sigma_y^T)_{\max} = E_y (\varepsilon_y^T)_{\max} \quad (3.4)$$

O módulo de elasticidade na direção transversal é expresso por:

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{E_f} V_f + \frac{1}{E_m} V_m \quad (3.5)$$

3.3.1.3 Fração volumétrica da fibra e da matriz

Considerando um compósito constituído de fibra e matriz, tem-se que as frações de volume da fibra e da matriz são:

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (3.3)$$

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (3.4)$$

Onde $v_{c,f,m}$ corresponde ao volume do compósito, da fibra e da matriz, respectivamente. Nota-se que as somas das frações de volume é:

$$V_m + V_f = 1 \quad (3.5)$$

3.3.1.4 Fração mássica da fibra e da matriz

Considerando um compósito constituído de fibra e matriz, tem-se que as frações de massa da fibra e da matriz são (CALLISTER, 2012):

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (3.6)$$

$$W_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \quad (3.7)$$

Onde $\rho_{c,f,m}$ corresponde à densidade do compósito, da fibra e da matriz, respectivamente.

3.3.1.5 Densidade da fibra e da matriz

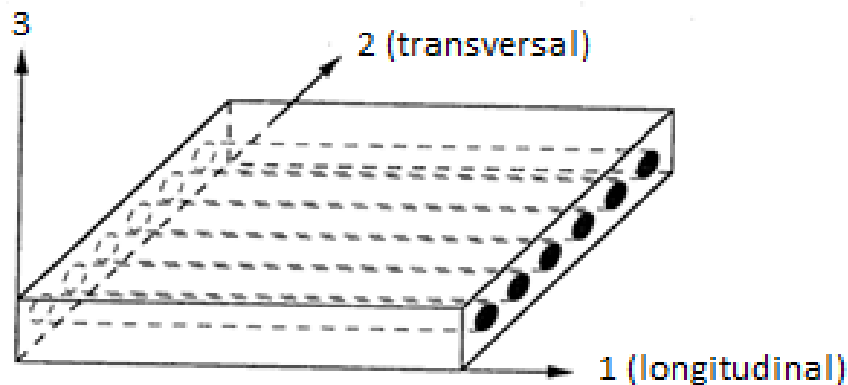
A densidade de um compósito em termos das frações mássicas pode ser encontrada através da expressão (CALLISTER, 2012):

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \quad (3.10)$$

3.3.2. Análise macromecânica de uma lâmina

Para o projeto e fabricação de compósitos laminados é de extrema importância estudar e conhecer o comportamento mecânico de uma lâmina, visto que ela é a unidade básica de construção de um laminado. Uma lâmina é definida como uma camada plana ou curva de fibras contínuas unidirecionais ou bidirecionais em uma matriz. A lâmina é um material ortotrópico, com eixos principais na direção das fibras (longitudinal), normal às fibras no plano da lâmina (transversal) e normal ao plano da lâmina. Esses eixos são denominados por 1, 2 e 3, respectivamente, e estão representados na Figura 7 (DANIEL, 1994).

Figura 7 - Esquema de uma lâmina reforçada com fibras unidirecionais – sistema de coordenadas local (1-2-3)



Fonte: DANIEL, 1994.

Para a análise de uma lâmina ortotrópica considera-se que as cargas nas fibras e na matriz não atuam em si individualmente, levando em conta a contribuição de cada um dos componentes e considerando o compósito um material homogêneo (MARINUCCI, 2011).

3.3.2.1 Relação tensão-deformação para materiais ortotrópicos no estado plano de tensões

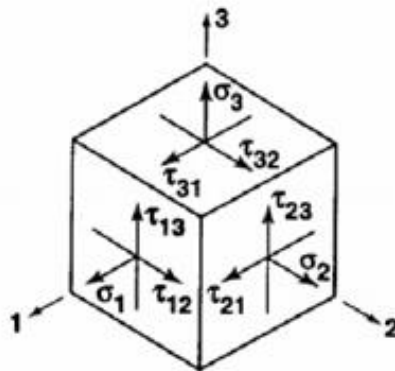
A equação de Hooke generalizada é mostrada na equação (3.13) considerando a notação tensorial, sendo a proporcionalidade entre o tensor de tensões $[\sigma_{ij}]$ e o tensor de deformações $[\varepsilon_{ij}]$ dada pela matriz de rigidez $[C]$. A relação entre deformação e tensão é obtida pela inversão da matriz $[C]$, sendo denominada de matriz de flexibilidade $[S]$ conforme mostra a equação (3.14) (KAW, 2006).

$$\{\sigma_{ij}\} = [C_{ijkl}]\{\varepsilon_{kl}\} \quad (3.8)$$

$$\{\varepsilon_{ij}\} = [S_{ijkl}]\{\sigma_{kl}\} \quad (3.9)$$

sendo σ_{ij} e σ_{kl} componentes de tensão, ε_{ij} e ε_{kl} componentes de deformação, C_{ijkl} elementos da matriz de rigidez e S_{ijkl} elementos da matriz de flexibilidade.

Figura 8 - Elemento infinitesimal submetido a um estado tridimensional de tensões



Considerando um elemento infinitesimal de um sólido anisotrópico elástico linear submetido a um estado tridimensional de tensões (Figura 8), a seguinte relação constitutiva, em notação matricial, pode ser considerada (KAW, 2006):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.10)$$

Um material que apresenta três planos de simetria entre si é denominado de ortotrópico e tem a matriz de rigidez formada por nove constantes independentes, conforme equação abaixo (KAW, 2006):

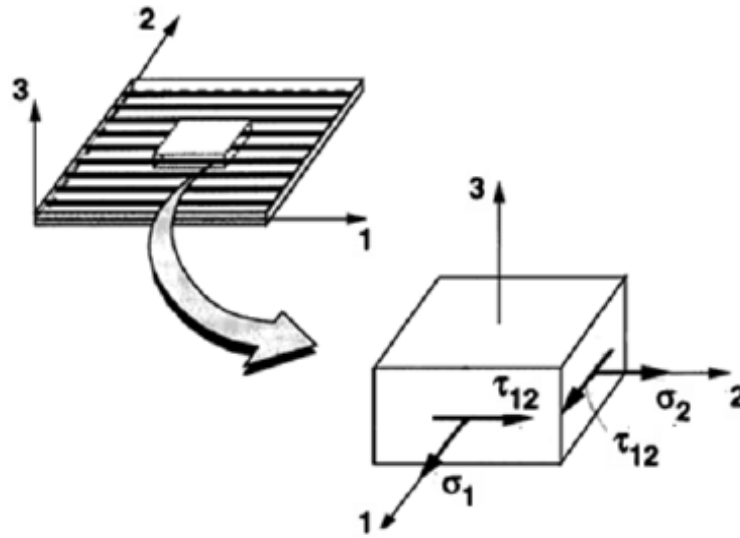
$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{31}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{1 - \nu_{23}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{31} - \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} & \frac{\nu_{32} - \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} & \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{31} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.11)$$

onde σ_{ij} e τ_{ij} são as tensões normais e de cisalhamento e ε_{ij} e γ_{ij} são as deformações normais e de cisalhamento, respectivamente.

As mesmas relações podem ser aplicadas para se obter a matriz de flexibilidade (3.16):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{13} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_1} & -\frac{\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{21}}{E_2} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{31}}{E_3} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

Figura 9 – Estado plano de tensões em uma lâmina



Fonte: REDDY, 2004.

Dado que as lâminas são relativamente finas quando comparadas a sua largura e ao seu comprimento, pode-se adotar que as mesmas estejam sob estado plano de tensões (Figura 9), ou seja, o estudo é feito para uma lâmina considerando-se apenas os efeitos nas direções 1 e 2 e no plano 1-2. Dessa forma, as tensões que atuam perpendicularmente ao plano da lâmina podem ser desprezadas, ou seja, $\sigma_3 = \tau_{23} = \tau_{13} = 0$.

Considerando, portanto, a hipótese de ortotropia e de estado plano de tensões, a matriz de rigidez (3.16) é reduzida para apenas quatro constantes independentes (MARINUCCI, 2011).

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

onde, [Q]3x3 é definida como a matriz de rigidez reduzida de uma lâmina sob estado plano de tensões.

Os elementos Q_{ij} desta matriz são escritos em funções das propriedades elásticas medidas nas direções de ortotropia 1 e 2, ou seja, na direção das fibras e perpendicular às fibras (MARINUCCI, 2011):

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (3.14)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12} \cdot E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (3.15)$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} \quad (3.16)$$

$$Q_{66} = G_{12} \quad (3.17)$$

onde:

E_i : Módulo de elasticidade na direção i ;

ν_{ij} : Coeficiente de Poisson (relaciona a deformação transversal na direção j devida uma deformação axial na direção i);

G_{ij} : Módulo de cisalhamento no plano ij .

3.3.3. Análise macromecânica de laminados

As equações anteriores foram desenvolvidas para uma única lâmina. Porém, é necessário serem desenvolvidas equações para laminados, visto que a estrutura de um compósito laminado possui duas ou mais lâminas unidirecionais ou empilhadas em várias orientações, que podem possuir diferentes espessuras e serem de diferentes materiais.

3.3.3.1 Tensões e deformações de um laminado

As deformações e tensões de qualquer uma das camadas do laminado são obtidas através da Teoria Clássica da Mecânica dos Laminados, por meio das deformações e curvaturas da superfície média. Para aplicação dessa teoria se admite que as lâminas estão perfeitamente interligadas, sem apresentar escorregamento entre elas e que a matriz é fina e não deformável por cisalhamento (MARINUCCI, 2011).

A relação linear entre as deformações e as curvaturas do laminado é dada por:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.18)$$

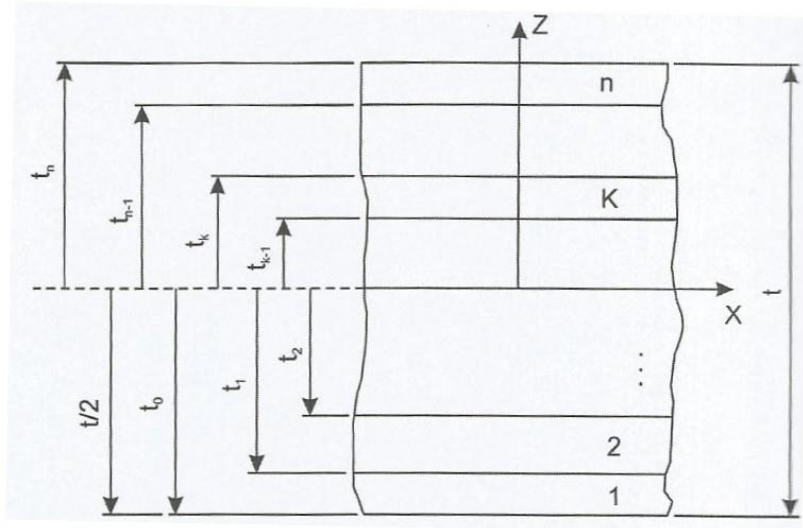
sendo ε_x^0 , ε_y^0 e γ_{xy}^0 e κ_x , κ_y e κ_{xy} são respectivamente as deformações e as curvaturas da linha média do laminado.

As tensões em cada lâmina podem ser obtidas por (KAW, 2006):

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.3.3.2 Equações constitutivas do laminado

Figura 10 – Disposição das camadas de um laminado com n camadas



Fonte: MARINUCCI, 2011.

As equações constitutivas podem ser obtidas através da relação das forças e dos momentos resultantes, com as deformações e curvaturas da linha média do laminado. Considerando um laminado que possui n camadas ortotrópicas (Figura 10), com cada uma possuindo uma espessura t_k , a contribuição de cada lâmina K para formar a força e o momento resultantes atuando no plano médio é dado por (MARINUCCI, 2011):

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

A matriz $[A]$ é denominada de matriz de rigidez extensional e relaciona as forças resultantes $[N]$ com as deformações $[\varepsilon^0]$, sendo:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k - h_{k-1}), \quad i = 1,2,6; \quad j = 1,2,6 \quad (3.21)$$

A matriz $[B]$ é denominada de matriz de acoplamento e estabelece ligação entre forças e momentos resultantes com curvaturas do plano médio $[\kappa]$ e deformações $[\varepsilon^0]$, sendo:

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad i = 1,2,6; \quad j = 1,2,6 \quad (3.22)$$

Em laminados simétricos em relação ao plano médio, a matriz $[B]$ é considerada nula.

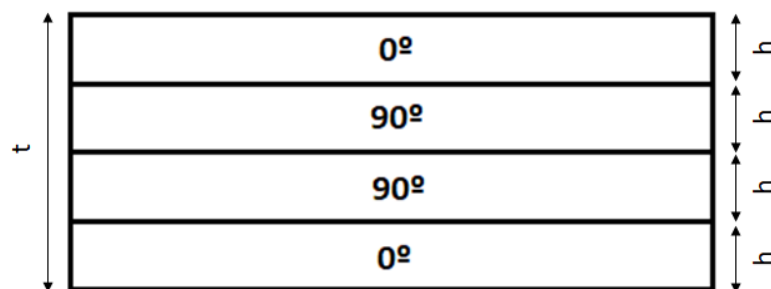
A matriz $[D]$ é denominada de matriz de rigidez de flexão e relaciona os momentos resultantes $[M]$ com as curvaturas $[\kappa]$, sendo:

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})]_k (h_k^2 - h_{k-1}^2), \quad i = 1,2,6; \quad j = 1,2,6 \quad (3.23)$$

3.3.3.3 Propriedades elásticas equivalentes de laminados *cross-ply*

Os laminados simétricos que utilizam fibras cruzadas a 0° - 90° são particularmente interessantes de serem analisados por serem amplamente aplicados na fabricação de embarcações, tubulações, cilindros e vazios de pressão (MARINUCCI, 2011).

Figura 11 – Representação de um laminado *cross-ply* simétrico com quatro camadas



Fonte: MARINUCCI, 2011.

Para esse tipo de laminado (Figura 11) as propriedades elásticas são obtidas por:

$$\bar{E}_x = \bar{E}_y = \frac{1}{2} \left[(Q_{11} + Q_{22}) - \frac{4Q_{12}^2}{(Q_{11} + Q_{22})} \right] \quad (3.24)$$

$$\bar{\nu}_x = \bar{\nu}_{yx} = \frac{2Q_{12}}{(Q_{11} + Q_{22})} \quad (3.30)$$

$$\bar{G}_{xy} = Q_{66} \quad (3.31)$$

3.4 MATRIZ POLIMÉRICA

As matrizes podem ser poliméricas, cerâmicas ou metálicas e possuem funções importantes em um compósito reforçado com fibra, que são: dispersar ou aglomerar as fibras, transmitir e distribuir tensões para estas e protegê-las da degradação mecânica e de ambientes adversos (MALLICK, 2007).

Os polímeros apresentam vantagens em relação aos demais materiais, como baixo custo, facilidade de processamento e alta produtividade. Em razão disso, os compósitos de matrizes poliméricas estão sendo utilizados em larga escala para diversas aplicações, que vão desde as mais simples até as mais complexas, como as aeroespaciais (HOLANDA, 2013). Um polímero é definido como uma molécula de cadeia longa contendo uma ou mais unidades repetitivas de átomos (meros), unidas entre si por ligações covalentes ou iônicas. São classificados em termofixos ou termorrígidos e termoplásticos, sendo diferenciados pelo comportamento que apresentam quando são aquecidos e sua escolha limitada pela temperatura necessária ao processamento (ISHIZAKI et al., 2006).

Nos polímeros termofixos as cadeias macromoleculares são unidas por ligações cruzadas e uma vez que essas ligações são formadas durante a reação de polimerização ou de cura estes não podem mais ser fundidos ou remodelados. Para seu manuseio, as resinas são mantidas em estado líquido, por diluição em um monômero inibidor solvente que reduz a viscosidade, sendo transformada em sólido após aplicação de calor ou por meio de um catalisador para iniciar o processo de cura irreversível (MALLICK, 2007). São bastante utilizadas como matrizes em compósitos de uso estrutural, por apresentarem propriedades

Essas resinas insaturadas são fornecidas normalmente na forma física de um líquido viscoso, que após a adição de produtos químicos apropriados (acelerador e catalisador), transforma-se no estado sólido. Tal transformação é definida como cura ou polimerização e é irreversível.

Podem ser utilizadas com e sem reforço, sendo estas últimas bastante utilizadas por possuir baixa viscosidade, baixo custo, cura rápida, além de boas propriedades físicas e químicas. Por outro lado, a resina pura é pouco resistente e quebradiça (CHEREMISINOFF, 1998). É bastante utilizado na fabricação de peças industriais curadas a frio.

A depender do ácido utilizado, as resinas poliésteres podem ser ortoftálicas, tereftálicas, isoftálicas ou bisfenólicas entre outras. A resina ortoftálica é a resina mais comum, e tem na sua composição o ácido ftálico ou seu anidrido. Esta resina possui grande potencial para se adequar a situações variadas, possuem menor custo e são usadas em aplicações mais básicas e menos nobres (CERCHIARO, 2010).

3.5 FIBRAS NATURAIS

As fibras possuem alta relação entre seu comprimento e sua seção transversal, sendo os principais constituintes em um material compósito reforçado com fibras. Possuem como principal função absorver a maior parcela de carga que é submetida ao compósito (MALLICK, 2007). São classificadas de acordo com a sua natureza, em sintéticas e naturais.

O interesse cada vez maior em desenvolver materiais naturais que causem menos impactos ambientais alteram a atenção da utilização de fibras sintéticas para as fibras naturais como reforço em materiais compósitos. Pois, as fibras sintéticas, como a de vidro, carbono e aramida, embora possuam excelentes propriedades térmicas e mecânicas, possuem desvantagens por sua não biodegradabilidade, além do alto custo, da abrasão e por apresentar riscos à saúde (KABIR *et al.*, 2012). As fibras naturais, por sua vez, por serem provenientes de recurso natural renovável, apresentam baixo custo, baixa densidade, biodegradabilidade, abundância e natureza não tóxica (JOSEPH *et al.*, 1999).

As fibras naturais são classificadas de acordo com sua origem em vegetais, animais e minerais. Entre estas, as fibras provenientes de plantas (fibras vegetais) ganharam grande destaque como agentes de reforço principalmente em compósitos com matrizes poliméricas.

3.5.1 Fibras vegetais

As fibras vegetais são estruturas alongadas distribuídas por todo vegetal podendo ser classificadas de acordo com a origem anatômica como fibras de caule, fibras de folha, fibras de folha e fibras de semente, como mostra os exemplos a Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação e exemplo de fibras vegetais

Caule	Fruto	Folha	Semente
Juta	Coco	Sisal	Linho
Malva	Algodão	Piaçava	
Bambu	Luffa	Bananeira	
Bagaço de cana			
Cânhamo			
Madeira			

Fonte: adaptado de THOMAS, 2011

As características das fibras vegetais são bastante heterogêneas, pois suas propriedades dependem do tipo de solo, das condições climáticas, dos fertilizantes utilizados, do local e das condições de processamento, do tipo de colheita, das folhas, dos frutos ou do caule dos vegetais, além de sua estrutura e composição química (GOWDA et al., 1999).

Sua composição é composta basicamente de celulose, hemicelulose, lignina, pectina e substâncias cerosas, por isso são comumente chamadas de fibras lignocelulósicas (NETO, 2016). Cada fibra possui uma composição diferente de cada componente, que influenciam as suas características e as propriedades do compósito, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Constituição básica de fibras vegetais

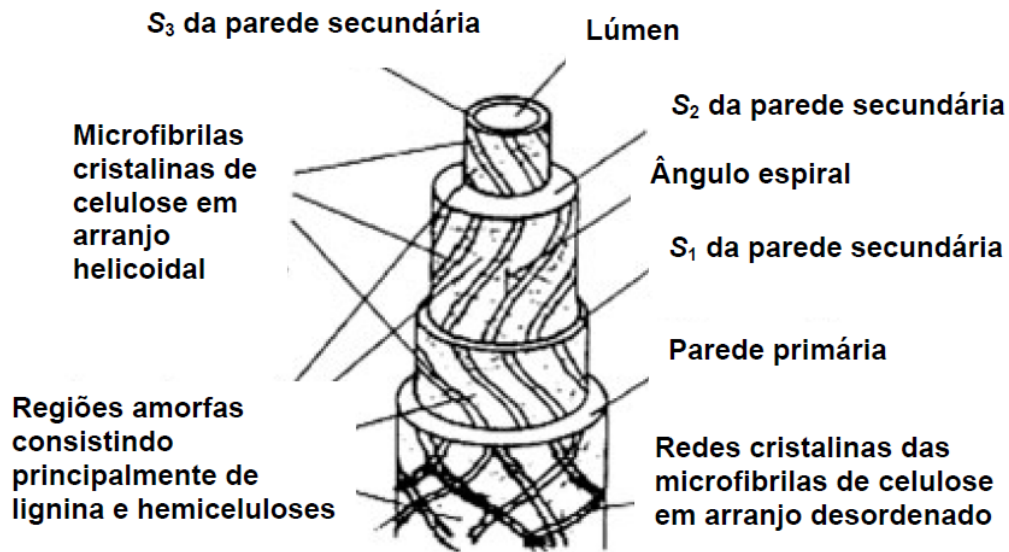
	Algodão	Juta	Linho	Rami	Sisal
Celulose	82,7	64,4	64,1	68,6	65,8
Hemicelulose	5,7	12,0	16,7	13,1	12,0
Pectina	5,7	0,2	1,8	1,9	0,8
Lignina	-	11,8	2,0	0,6	9,9
Solúvel a água	1,0	1,1	3,9	5,5	1,2
Cera	0,6	0,5	1,5	0,3	0,3
Água	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

Fonte: adaptado de BLEDZKI E GASSAN, 1999.

A celulose é o componente principal das fibras vegetais, sendo a base estrutural delas, fornecendo rigidez, força e estabilidade estrutural. Na fibra, a celulose está associada com outras substâncias como a lignina e a hemicelulose, ambas em quantidades consideráveis (FENGEL e WEGENER, 1989). A hemicelulose é responsável pela biodegradação e pela absorção de umidade da fibra, além de apresentar menor resistência (SAHEB e JOG, 1999).

A sua constituição, mostrada na Figura 13, é formada por várias fibras elementares fortemente ligadas entre si por um material de cementação, constituído principalmente de lignina, que é uma substância hidrofóbica com a função de sustentação da fibra. Possuem uma parede espessa constituída por várias microfibrilas, nas quais o principal componente é a celulose, que formam espirais ao longo do eixo da fibra, tendo um lúmen no centro. Cada fibra elementar é, em essência, um compósito no qual as rígidas microfibrilas de celulose estão envolvidas por uma matriz de lignina e hemicelulose. A hemicelulose trabalha então como interface entre a microfibrila de celulose e a lignina (KABIR, 2012).

Figura 13 - Constituição estrutural de uma fibra vegetal



Fonte: adaptado de RONG *et al.*, 2001.

As fibras vegetais apresentam vantagens na sua utilização como reforço em compósitos, conforme já foram apresentadas, porém elas possuem natureza hidrófila, sendo este um dos maiores problemas na sua utilização, devido a maioria dos polímeros serem hidrofóbicos. Além disso, possuem alta absorção de umidade, grande variação de propriedades, baixa resistência a microrganismos e baixa estabilidade térmica. Normalmente, a densidade destas são bem menores comparadas com as fibras sintéticas, sendo essa mais uma vantagem na sua utilização.

3.5.1.1 Fibra de sisal

Entre as fibras vegetais produzidas no Brasil, as fibras de sisal se destacam pelas suas características físico-químicas e propriedades mecânicas. Esta fibra está entre as fibras vegetais mais utilizadas mundialmente.

As fibras de sisal são obtidas da planta de espécie nativa da América Central *Agave Sisalana Perrine*, que geralmente é cultivada em climas tropicais e subtropicais, devido ao sisal requerer clima quente e grande luminosidade. As plantas de sisal estocam água na estação chuvosa e consomem na estação seca, sendo, portanto, facilmente adaptadas as

regiões semi-áridas. Sua produção se concentra na região nordeste do país, na Bahia e Paraíba (GONÇALVES, 2007).

Para a extração das fibras é necessário o desfibramento. Neste processo as folhas são separadas por tamanho em função da melhora do rendimento e da qualidade. Em seguida, as mesmas passam por uma máquina, que ao golpeá-las elimina a polpa que envolve as fibras. Após o desfibramento estende-se as fibras para secagem em espalhadeiras de arame, ao sol. Por fim são armazenadas e podem ser utilizadas em diversas aplicações (SILVA, 1999). Este processo é mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Etapas do processamento das fibras de sisal: (a) plantação de sisal; (b) desfibramento; (c) secagem ao ar livre; (d) fibra de sisal.



Fonte: NETO, 2016.

A cultura do sisal é de suma importância socioeconômica para o Brasil, por ser economicamente viável na região Semi-Árida do Nordeste, dela dependendo muitas pessoas para sua subsistência. As fibras são altamente resistentes e são utilizadas em larga escala para produzir artesanatos, vassouras, sacos, bolsas, chapéus, barbantes, cordas, entre outras (MATTOSO *et al.*, 1997).

A sua versatilidade, por se adaptarem a diferentes processos de conformação, torna este material estrategicamente importante no desenvolvimento de novos compósitos. Entre outras vantagens, pode-se apontar ainda a facilidade de modificação superficial, sua abundância no Brasil e a facilidade de cultivo (AMICO, 2004).

Nessa realidade, a estrutura e as propriedades da fibra de sisal estão sendo estudadas por vários pesquisadores, pois a compreensão da relação estrutura-propriedade não é apenas de desenvolver novas aplicações para essas fibras, mas também para enfatizar a importância deste material agrícola, que constitui um dos recursos renováveis abundantemente disponíveis no mundo.

3.6 MODIFICAÇÃO SUPERFICIAL DAS FIBRAS VEGETAIS

O comportamento mecânico dos compósitos reforçados por fibras não depende somente das propriedades da fibra e da matriz, mas também da região interfacial entre estes. A interface matriz-fibra é uma zona de difusão ou reação, em que duas fases são combinadas quimicamente e/ou mecanicamente (KABIR, 2012). É através da interface que os esforços atuantes na matriz são transmitidos ao reforço, sendo, portanto, as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos fortemente dependentes dessa interação (SILVA, 2003). Uma adesão inadequada entre as fases envolvidas poderá provocar o início de falhas interfaciais, comprometendo o desempenho do compósito (NETO, 2016).

Essa interface é formada pelas ligações químicas, mecânicas e de reação entre a fibra e matriz. A ligação química é formada entre a superfície da fibra e da matriz. O travamento causado pela rugosidade natural da fibra pode formar uma adesão mecânica entre elas. A ligação de reação ocorre quando átomos ou moléculas da fibra e da matriz se difundem na interface, criando uma camada interfacial distinta com propriedades diferentes da fibra ou da matriz (KAW, 2006).

A maior preocupação na utilização de fibras naturais como reforço na matriz é que elas possuem natureza hidrofílica, trocando constantemente umidade com o ambiente, enquanto que a matriz é hidrofóbica. A incompatibilidade inerente entre estas duas fases resulta em enfraquecimento da ligação na interface (KABIR, 2012). Como se sabe, as fibras vegetais são constituídas basicamente de celulose e de uma quantidade relativamente alta de lignina e hemicelulose, que influi diretamente em suas propriedades adesivas. Nos compósitos, a celulose é responsável pela ligação das fibras ao polímero enquanto a lignina atua impedindo a difusão da matriz na celulose, dificultando assim a aderência da fibra ao polímero (DOTAN *et al.*, 1989).

Para modificar a superfície da fibra e otimizar o contato entre a fibra e a matriz, podem ser utilizados diferentes tratamentos químicos, aditivos reativos e agentes de acoplamento, que expõem mais grupos reativos na superfície da fibra e, assim, podem reduzir sua tendência hidrofílica e melhorar a compatibilidade com a matriz polimérica. Como resultado, melhores propriedades mecânicas dos compósitos podem ser alcançadas (KABIR, 2012). Entre estes tratamentos, o tratamento alcalino é simples e o mais viável economicamente.

3.6.1 Tratamento alcalino

O tratamento alcalino ou mercerização é um dos métodos mais utilizados para modificação das fibras vegetais. Tem o objetivo de limpar a superfície da fibra de ceras e graxas, que são provenientes do manuseio e manufatura, além de remover parcialmente a hemicelulose e a lignina, como forma de melhorar a adesão da fibra à matriz (FENGEL e WEGENER, 1989). A efetividade do tratamento depende das condições em que este é aplicado, como concentração, tempo e temperatura, além do sistema fibra/matriz (JOSEPH *et al.*, 1996). Deve-se encontrar uma concentração ótima no tratamento alcalino no sentido de promover uma adesão adequada entre as fases sem comprometer as características mecânicas das fibras.

Com o tratamento alcalino, aumenta-se a rugosidade superficial da fibra e melhora-se a aderência mecânica, devido a remoção parcial de algumas das fases presentes na superfície das fibras, levando a separação destas em filamentos finos. Este processo é chamado de fibrilação, o qual quebra o feixe de fibras em fibras menores, aumentando a área superficial efetiva. Como consequência, ocorre uma maior molhabilidade entre os componentes do material compósito e a ligação interfacial entre eles se torna mais efetiva (RAY, 2001).

3.7 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA

É de fundamental importância para a seleção e utilização de um material em um projeto que sejam avaliadas as suas propriedades mecânicas e o seu comportamento mecânico. Estas características são obtidas através de ensaios mecânicos normalizados.

3.7.1 Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em submeter um material, com forma e dimensões padronizadas, a uma carga uniaxial que tende a alongá-lo até a ruptura. Para efetuação do ensaio, o corpo de prova é fixado em garras mecânicas em uma máquina que aplica esforços crescentes na direção axial, ao mesmo tempo que mede contínua e simultaneamente as deformações resultantes. Os ensaios são conduzidos através da aplicação de velocidades de carregamento estipuladas por normas técnicas (AUGUSTO, 1989).

Quando realizado adequadamente, o teste de tração resulta no levantamento da curva de tensão de tração pela deformação sofrida pelo corpo, que quantificam propriedades mecânicas importantes de um material, como módulo de elasticidade e a resistência à tração (GARCIA, 2012).

A resistência máxima de tração $\sigma_{m\acute{a}x}$ é avaliada pela carga máxima $F_{m\acute{a}x}$ atingida durante o ensaio por unidade de área, no momento de ruptura, sendo calculada pela expressão:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{F_{m\acute{a}x}}{A_0}$$

(3.32)

O módulo de elasticidade E é medido pela razão entre a tensão σ e a deformação ϵ , dentro do regime elástico, onde a deformação é totalmente reversível e proporcional a tensão. Ele indica a rigidez do material ou a resistência do material a deformação plástica e pode ser obtido pela equação (3.33) (HIBBELER, 2010).

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

(3.33)

3.7.2 Ensaio de flexão

Os ensaios de flexão são frequentemente utilizados devido a sua simplicidade na preparação dos corpos-de-prova e a sua facilidade de realização. O ensaio consiste

basicamente em apoiar um corpo de prova e aplicar uma força de flexão, que pode ser concentrada ou distribuída, de forma a produzir uma deflexão no mesmo até sua ruptura. A parte superior do corpo de prova sofre esforço de compressão, enquanto a sua superfície inferior está sujeita a esforço de tração. O plano central contém o eixo neutro e está submetido a tensão zero de flexão (GARCIA, 2012).

Uma das variações do ensaio de flexão é o de três pontos, onde o corpo de prova é apoiado sob dois apoios distanciados entre si a uma distância L , sendo a carga de flexão aplicada no centro do corpo de prova.

O valor da carga aplicada (tensão de flexão) versus o deslocamento do ponto central (flecha) consiste na resposta do ensaio. Deste ensaio pode-se obter a resistência a flexão, que significa o valor máximo da tensão de tração ou de compressão nas fibras externas do corpo de prova durante o ensaio, sendo obtido para materiais de seção retangular a partir da expressão (SOUZA, 1982):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3P_{m\acute{a}x}L}{2bh^2}$$

(3.34)

onde:

$F_{m\acute{a}x}$ é a carga máxima atingida no ensaio;

L a distância entre os apoios;

b a largura do corpo de prova;

h a sua espessura.

Outra propriedade importante que pode ser obtida é a deflexão, que é a deformação que o corpo sofre após esforço de flexão, sendo expressa pela distância entre a posição final do corpo e a linha neutra original. A equação da flecha de uma barra é dada por (HIBBELER, 2010):

$$v = \frac{PL^3}{4Ebh^3}$$

(3.35)

Onde v é a deflexão ou flecha medida para carga P aplicada.

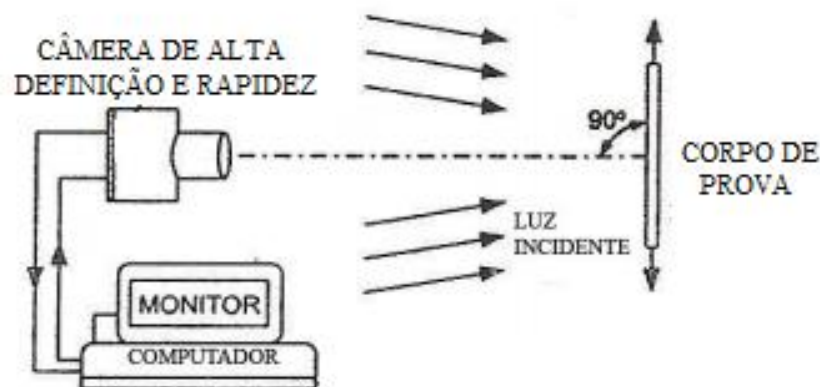
3.8 CORRELAÇÃO DIGITAL DE IMAGENS (CDI)

Um dos elementos mais conhecidos para se determinar os deslocamentos de corpos de prova, quando submetidos a carregamentos, são os extensômetros. Técnicas de extensometria alternativas às mecânicas e elétricas, como a correlação digital de imagens, têm se desenvolvido nos últimos anos, transmitindo alta precisão e confiabilidade dos resultados em todas as direções do plano estudado.

A técnica se baseia em um *software*, Correli Q4^{LMT}, que mede campos de deslocamentos e deformações através da correlação digital de imagens, e tem sua rotina implementada no *software* MatLabTM. 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, 2006).

No ensaio são capturadas, em diversos instantes, várias fotos a uma alta velocidade, sendo necessário, portanto, para utilização da técnica uma câmera de alta definição e rapidez. Essas câmeras devem ser equipadas com lentes livres de distorções para se evitar erros induzidos. O número de imagens dependerá da velocidade de deformação que será utilizada no ensaio (JUNIOR, 2008). Os equipamentos típicos utilizados na técnica são mostrados na Figura 15.

Figura 15 - Equipamentos típicos utilizados na correlação digital de imagens

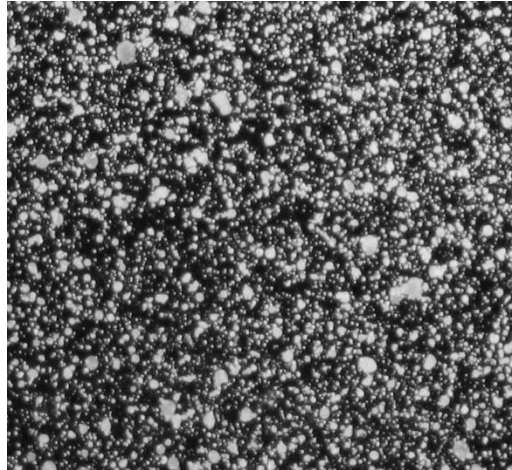


Fonte: JUNIOR, 2008.

Para que seja efetuada a correlação e os cálculos de deslocamentos corretamente no programa, o corpo de prova deve ser texturizado com um padrão (Figura 16) de tons de cinza.

Essa textura é realizada fazendo uma pintura homogênea da superfície com tinta preta, seguida da deposição aleatória de gotículas de tinta branca (HILD, 2006).

Figura 16 - Padrão da textura necessária para utilização do Correli Q4LMT



Fonte: autoria própria, 2017.

O software calcula o deslocamento no plano usando a correlação entre a imagem inicial, chamada imagem de referência e uma seguinte, que corresponde ao estado deformado da mesma superfície. Para isso, uma área do corpo de prova é selecionada, sendo esta chamada de região de interesse (ROI – *Region of interest*) de estudo, que é automaticamente dividida em pequenas regiões chamadas zonas de interesse (ZOI – *Zones of interest*) (HILD, 2006).

Para se obter os dados do programa, faz-se necessário inserir neste alguns parâmetros, como:

- Tamanho da ZOI (*ZOI size* - pixels): Definição do tamanho da zona de interesse (4, 8, 16, 32, 64 pixels). Nesta determinação deve-se levar em conta que quanto menor o tamanho da ZOI maior será o erro gerado por ruídos.
- *ZOI shift* (pixels): Definição da transição entre duas regiões vizinhas. A mudança é normalmente de um tamanho de ZOI.
- Máximo número de iterações (*Max. number of iterations*): Define o número máximo de iterações para evitar repetições infinitas. Quanto maior o número de iterações, mais precisos serão os resultados, porém será mais demorado e pode sobrecarregar a memória do computador.

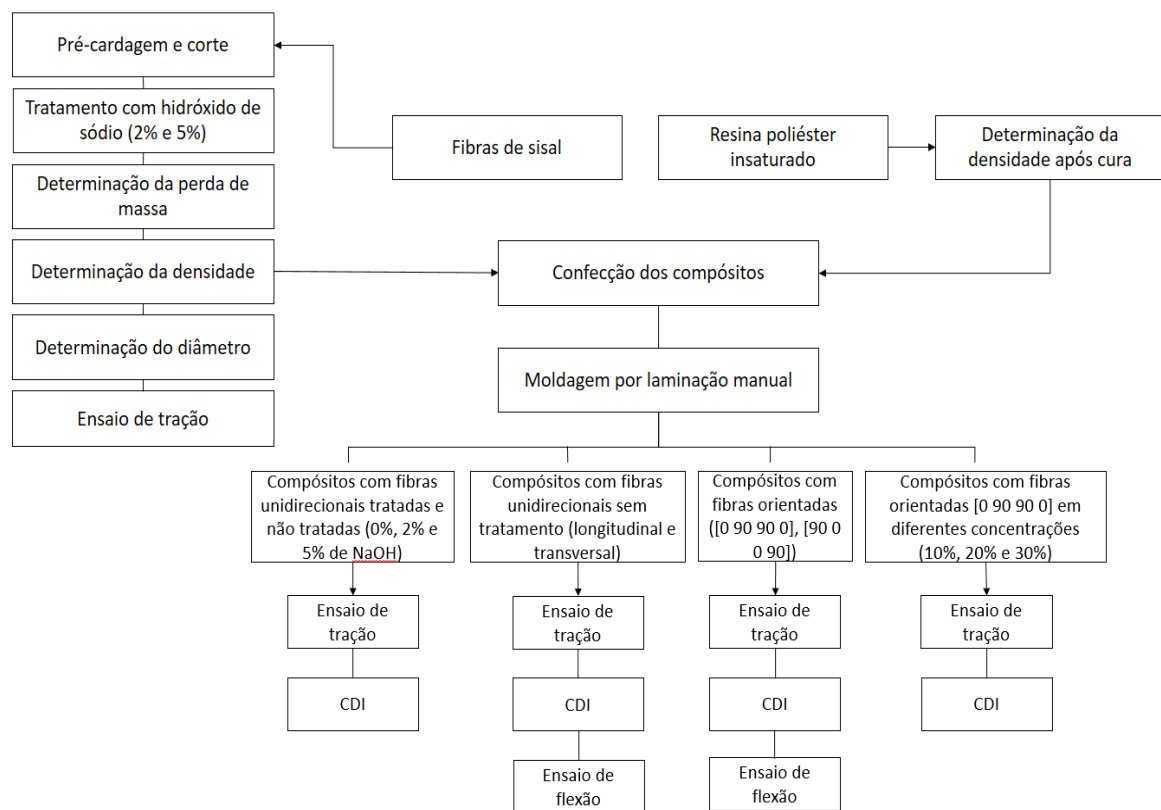
- Número de imagens para analisar (*Numbers of images to analyze*): Quando uma série de fotos é tomada, é possível escolher o número de imagens que farão parte das análises. A imagem de referência não está incluída neste número.

O princípio básico do Correli é o de reconhecer a mesma zona de interesse de uma imagem para outra, ou seja, acompanhar o deslocamento de uma pequena porção de material e calculá-lo. A qualidade da medida do deslocamento baseia-se principalmente na qualidade da textura da imagem, pois esta confere a cada zona traços específicos que as caracterizam e tornam possível seu reconhecimento de uma imagem para outra (HILD, 2006).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados para a confecção dos compósitos poliméricos reforçados com fibras de sisal e os métodos aplicados para a execução da pesquisa e estudo das propriedades mecânicas é descrito a seguir. Na Figura 17 é apresentado o fluxograma de todos os procedimentos realizados no presente trabalho.

Figura 17 - Fluxograma da metodologia utilizada no trabalho



Fonte: autoria própria, 2017.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Resina Poliéster Insaturado

Para a matriz do compósito foi utilizada uma resina poliéster ortoftálica insaturado, por ser uma resina de baixo custo e de fácil aplicação. Ela é obtida no estado líquido, sendo necessário um catalisador para iniciar o processo de cura e se tornar uma resina termofixa irreversível. O catalisador utilizado foi o Butanox, com proporção de 1% em massa-peso.

Ambos foram obtidos através da empresa Hidroglass Equipamentos e Produtos Químicos Ltda, localizada em Mossoró no Rio Grande do Norte.

4.1.2 Fibras de sisal

Como reforço para o compósito foram utilizadas fibras cruas de sisal sem tratamentos prévios (Figura 18), obtidas através da empresa SISALTEC Indústria de Fibras de Sisal, localizada em Natal no Rio Grande do Norte.

Figura 18 - Fibras de sisal



Fonte: autoria própria, 2017.

4.1.3 Reagentes

Para a realização do tratamento alcalino nas fibras foi utilizado como reagentes hidróxido de sódio P.A – ACS (Microperolas) e ácido acético glacial P.A – ACS, obtidos pela fornecedora Dinâmica.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Preparação das fibras de sisal

4.2.1.1 Pré-cardagem e corte

As fibras de sisal foram submetidas a uma pré-cardagem manual ou paralelização, utilizando uma escova de aço. O objetivo da cardagem é o de separar as fibras umas das outras, libertando-as das impurezas que ainda possam estar na matéria-prima.

Após a cardagem, as fibras foram cortadas uniformemente com o comprimento pré-determinado de 35 cm.

4.2.1.2 Tratamento com hidróxido de sódio

Com o objetivo de remover as impurezas presentes nas fibras, de melhorar a interação entre a fibra e a matriz polimérica, além de avaliar a influência deste nas propriedades mecânicas do sisal e dos compósitos, foi aplicado o tratamento alcalino em amostras de fibras de sisal (Figura 19).

Como mostra a Figura 19, inicialmente as fibras foram imersas em solução de hidróxido de sódio com diferentes concentrações (2% e 5%) à temperatura de 80°C por 1 hora, agitando-as esporadicamente. Em seguida, estas foram imersas em solução de ácido acético a 2%

durante 15 minutos para neutralizar o restante de NaOH presente na fibra tratada. Ao final do tratamento foram lavadas com água destilada e submetidas à secagem em estufa a uma temperatura de 100°C por 24 horas. Para a secagem foi utilizada uma estufa de esterilização e secagem da ODONTOBRAS.

No tratamento foi utilizado uma relação de 1:20 gramas de fibra/mililitros de solução. Para o aquecimento da solução foi utilizado uma chapa aquecedora modelo XMTD-701 da EDUTEC.

Figura 19 - Tratamento alcalino em fibras de sisal



Fonte: autoria própria, 2017.

4.2.2 Determinação da perda de massa e da densidade das fibras de sisal

Para determinar a perda de massa provocada pelo tratamento químico, as fibras foram pesadas antes e após o tratamento. A densidade das fibras sem tratamento e com tratamento alcalino, nas diferentes concentrações de NaOH, foi determinada através da norma ASTM D3800 – 99. Utilizou-se o procedimento descrito na norma, com quatro amostras para cada nível de tratamento.

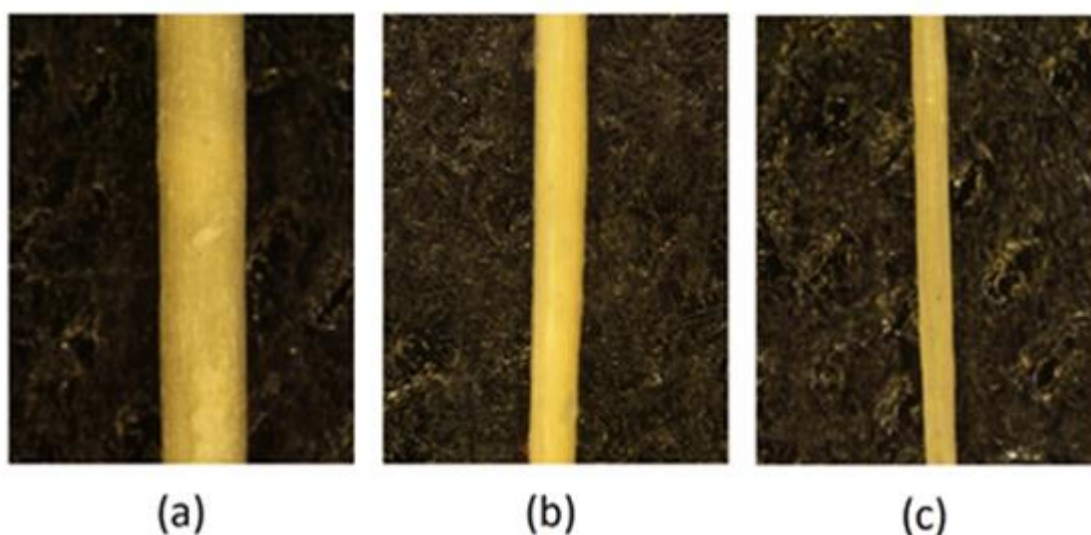
Foi utilizado como fluido de imersão o óleo de canola, com densidade de $0,8906 \text{ g/cm}^3$ e para a pesagem foi utilizada uma balança analítica digital modelo SHIMADZU AUY 220.

4.2.3 Determinação do diâmetro das fibras

Nas fibras naturais há uma grande dispersão nos valores dos diâmetros entre diferentes fibras e até mesmo em um monofilamento. Para determiná-los se utilizou um microscópio óptico modelo NIKON SMZ18 equipado com uma lupa modelo NIKON DS-Fi2, localizado no LABPLASMA da UFRSA.

Foi realizado a análise em 20 amostras de fibras não tratadas e 20 amostras de fibras tratadas para cada nível de concentração do tratamento. As imagens obtidas (Figura 20) foram realizadas em 8 posições ao longo do comprimento da fibra, sendo os diâmetros médios determinados através da análise das imagens conhecendo a resolução do microscópio.

Figura 20: Imagens dos diâmetros das fibras de sisal analisados em microscópio óptico com resolução de 5x: (a) sisal sem tratamento; (b) sisal com 2% de NaOH; (c) sisal com 5% de NaOH. (Escala: 255 pixels = 0,01 mm).



Fonte: autoria própria, 2017.

4.2.4 Ensaio de tração nas fibras

Os ensaios de tração nas fibras foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA para caracterizar as fibras de sisal, obtendo suas propriedades mecânicas nos diferentes níveis de tratamento para compará-las como forma de avaliar a influência do tratamento nestas. Os testes foram feitos na máquina de ensaios EMIC modelo DL10000, com célula de carga modelo Z de 5 kN.

Para isso, as amostras, cujos diâmetros foram medidos no microscópio óptico, foram submetidas ao ensaio com através da norma ASTM D-3379/75, como mostra a Figura 21.

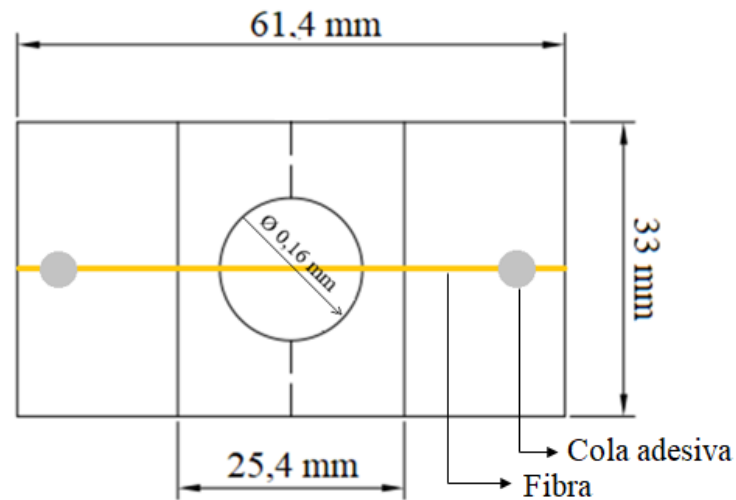
Figura 21 - Ensaio de tração na fibra de sisal



Fonte: autoria própria, 2017.

As amostras foram coladas de forma alinhada ao centro em recortes de papel A4, Figura 22, através de cola de secagem rápida. Em seguida, foram fixadas em garras de pressão na máquina e as laterais da guia foram cortadas antes do início do ensaio para que entre as garras tivesse somente a fibra. Os testes foram conduzidos numa velocidade de 0,027 mm/s.

Figura 22 - Padrão utilizado no ensaio de tração das fibras de sisal

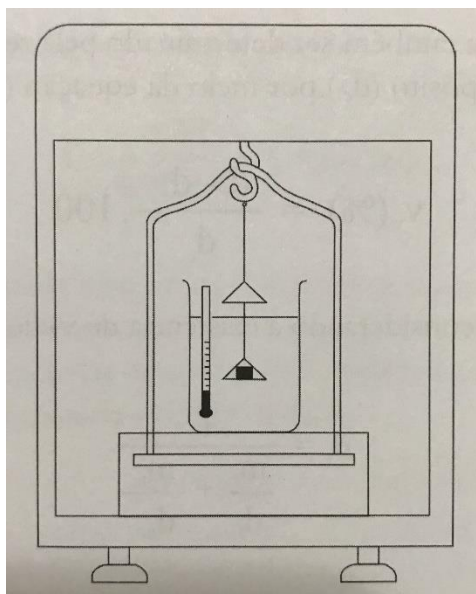


Fonte: autoria própria, 2017.

4.2.5 Determinação da densidade da resina curada

Seguindo a norma ASTM D-792/13 para determinar a densidade da resina de poliéster após o processo de cura, foi retirado quatro amostras de tamanho pequeno, sendo estas pesadas em uma balança equipada com um dispositivo composto de um suporte e de um termômetro para medir a temperatura do líquido contido no béquer localizado sob o suporte, conforme Figura 23. A amostra foi pesada ao ar livre e em imersão em líquido. Com a diferença entre essas medidas de peso e conhecendo-se a densidade do fluido pôde se determinar a densidade da resina.

Figura 23 – Esquema de balança com o dispositivo para determinação da densidade da resina e do compósito



Fonte: MARINUCCI, 2011.

Foi utilizado como fluido de imersão água destilada com temperatura controlável a 25°C. Para a pesagem foi utilizada balança analítica digital modelo SHIMADZU AUY 220.

4.2.6 Preparação dos compósitos

Após obter a densidade da fibra e da resina, os compósitos foram confeccionados através da moldagem por laminação manual. Nesse método, se coloca os reforços de fibra sobre um molde, em seguida se aplica a resina, sendo esta dispersada de forma uniforme sobre as fibras com esforço manual e, por fim, espera-se a polimerização final da resina. O molde utilizado foi de madeira em formato de caixa, com dimensões internas de 300x150x20 mm, e uma base de vidro, sendo este especificado de forma detalhada no tópico de resultados e discussões.

Para o processo, inicialmente, a base de vidro foi limpa e um desmoldante foi aplicado para facilitar a retirada do compósito. Foram aplicadas camadas de resina poliéster insaturado e fibras de sisal até se atingir a espessura desejada. Para realizar o assentamento das fibras e remoção das bolhas de ar utilizou-se um rolete. Ao término da aplicação das camadas o molde foi fechado com uma tampa de vidro, com o objetivo de que o compósito apresente uma

superfície lisa em ambos os lados. Ao final do processo esperou-se o processo de cura ocorrer. Após a cura, os corpos de prova foram cortados para serem submetidos aos ensaios mecânicos.

Foram confeccionados compósitos unidirecionais utilizando fibras tratadas e não tratadas. Os corpos de prova foram cortados no sentido das fibras para realização dos ensaios de tração, com o objetivo de avaliar a influência do tratamento químico nas propriedades mecânicas destes. A concentração volumétrica utilizada foi de 20% de peso em fibra.

Compósitos unidirecionais e com diferentes orientações das fibras sem tratamento também foram confeccionados. Os corpos de prova unidirecionais foram cortados no sentido longitudinal da fibra [0] e no sentido transversal [90], e com as configurações [90 0 0 90] e [0 90 90 0]. Foram realizados ensaios de tração e flexão nestes como forma de avaliar a influência da orientação das fibras nas propriedades dos compósitos.

Por último, como forma de analisar a influência da concentração das fibras de sisal, compósitos foram confeccionados com a seguinte configuração [0 90 90 0] e com diferentes concentrações em volume de fibra: 10%, 20% e 30%. Os corpos de prova foram retirados no sentido longitudinal e submetidos a ensaios de tração.

4.2.7 Ensaio de tração nos compósitos e na resina curada

Os ensaios de tração foram realizados no laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA para caracterizar os compósitos e a resina curada, determinando sua resistência máxima à tração, deformação e módulo de elasticidade. Os testes foram realizados na máquina de ensaios EMIC modelo DL10000, com célula de carga de 100 kN. Os corpos de prova dos compósitos e da resina são retangulares com dimensões de 120x20mm (Figura 24).

Figura 24 - Corpos de prova de tração de compósitos unidirecionais sem tratamento químico



Fonte: autoria própria, 2017.

Foram ensaiados 5 corpos de prova da resina curada e para os compósitos a quantidade é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 – Quantidade de corpos de provas utilizados no ensaio de tração dos compósitos

Orientação	Concentração em volume de fibra (%)	Tratamento alcalino	Quantidade de corpos de prova
Unidirecional [0]*	20	ST	5
	20	2%	5
	20	5%	5
Unidirecional [90]**	20	ST	5
[90 0 0 90]	20	ST	5
[0 90 90 0]	20	ST	5
[0 90 90 0]	10	ST	5
	20		5
	30		5

*sentido longitudinal da fibra. ** sentido transversal da fibra. ST – sem tratamento.

Fonte: autoria própria, 2017.

Os ensaios foram realizados em um ambiente com temperatura de 25°C, com velocidade de deslocamento 0,01 mm/s, de acordo com a norma ASTM D3039.

4.2.8. Correlação digital de imagens

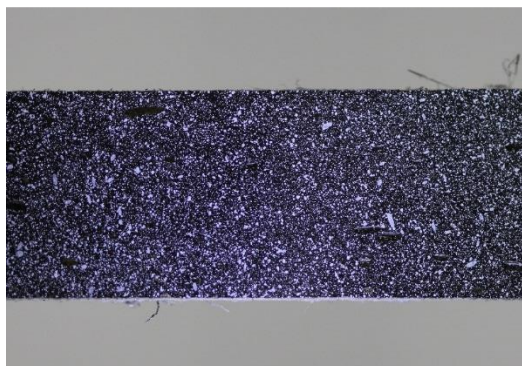
Os ensaios de tração foram auxiliados pela técnica de Correlação Digital de Imagens, descrita no item 3.8 e de forma mais detalhada no manual feito por Hild (2008), como forma de obter as propriedades mecânicas de tração.

4.2.8.1 Aplicação de textura

A utilização desta técnica necessita de uma preparação da superfície do corpo de prova, pois há a necessidade de existir uma textura bem estabelecida. A maneira mais comum para criar este padrão é aplicando-se uma tinta por spray na superfície a ser analisada.

As superfícies dos corpos de prova foram pintadas de forma homogênea por uma camada de tinta preta e em seguida por gotículas de tinta branca, sendo estas depositadas de forma aleatória, como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Pintura do corpo de prova para análise na correlação digital de imagens



Fonte: autoria própria, 2017.

4.2.8.2 Montagem do ensaio

Para o ensaio utilizou-se a máquina de ensaios EMIC DL 10000 e um câmera de alta definição, Canon EOS 60D. Ela foi fixada a um tripé e posicionada de frente à máquina, de forma que seu foco centralizasse na superfície analisada. A montagem do ensaio é mostrada na Figura 26.

Figura 26 - Ensaio de tração em compósito utilizando correlação digital de imagens



Fonte: autoria própria, 2017.

4.2.8.3 Análise dos resultados

Para realizar a análise das imagens obtidas no ensaio de tração, utilizou-se o software Correli Q4^{LMT} em um computador ligado à câmera, que controlava os intervalos de tempo da captura das fotos, sendo este de 5 segundos. O programa possui como uma de suas

características indicar o campo de deslocamento entre as imagens, além de fornecer as deformações de uma região dentro da ROI selecionada.

Para todos os ensaios, os valores utilizados como parâmetros para a análise foram os mostrados na Tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para a análise da Correlação Digital de Imagens

Tamanho da ZOI (pixels)	Mudança da ZOI (pixels)	Número de escalas	Número máximo de interações
64	64	3	5

Fonte: autoria própria, 2017.

Após analisadas as imagens no Correli, utilizou-se a função *gauge* pertencente ao programa. Com essa função se é calculado a deformação média em uma pequena região do corpo de prova, como um *strain gauge*, sendo por isso chamado de virtual *gauge*. Para a análise dessa deformação é selecionado a região de interesse da imagem, sendo esta de formato retangular com tamanho variado, que é escolhida a critério de quem manuseia o virtual *gauge*. Deve se tomar cuidado para tentar selecionar a área na figura onde provavelmente ocorrerá a deformação no corpo de prova. Os *gauges* selecionados nas imagens analisadas deste trabalho são mostrados nos resultados e discussões.

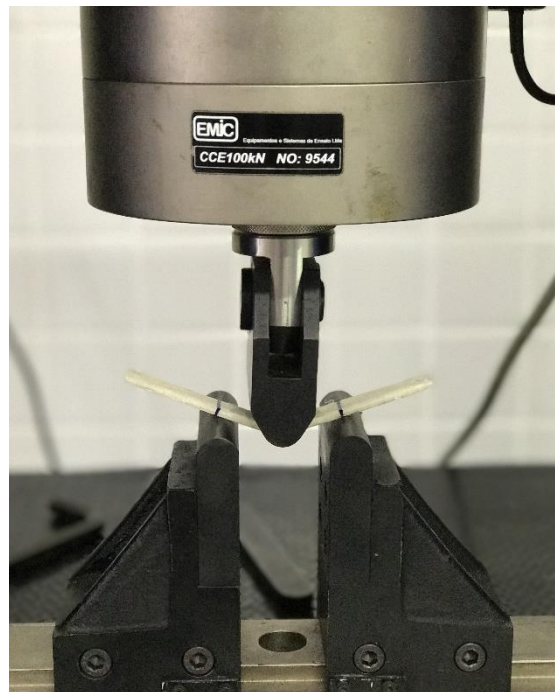
4.2.8.4 Obtenção das curvas tensão-deformação

Com os valores de tensão e da deformação obtida pelo *gauge*, traçou-se o diagrama tensão-deformação, sendo as propriedades mecânicas retiradas deste e analisadas. As imagens analisadas possuem os deslocamentos em pixels, que se é convertido para mm.

4.2.9 Ensaio de flexão no compósito e na resina curada

Os ensaios de flexão foram realizados nos compósitos e na resina, como mostra a Figura 27, com o objetivo de determinar a tensão de flexão e a deflexão máxima destes. Os testes também foram efetivados no laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA, na mesma máquina utilizada no ensaio de tração (EMIC modelo DL10000).

Figura 27: Ensaio de flexão três pontos em compósito



Fonte: autoria própria, 2017.

Os corpos de prova (Figura 28) possuíam dimensões de 127x12,7 mm e a distância entre os apoios utilizada foi de 52 mm. A taxa de velocidade do ensaio foi determinada seguindo recomendações da norma ASTM D790.

Figura 28: Corpos de prova de flexão de compósitos unidirecionais sem tratamento químico



Fonte: autoria própria, 2017.

Foram ensaiados 5 corpos de prova da resina curada e para os compósitos a quantidade é mostrada na Tabela 5.

Tabela 5 – Quantidade de corpos de prova utilizados no ensaio de flexão dos compósitos

Orientação	Concentração em volume de fibra (%)	Tratamento alcalino	Quantidade de corpos de prova
Unidirecional [0]*	20	ST	5
Unidirecional [90]**	20	ST	5
[90, 0, 0, 90]	20	ST	5
[0, 90, 90, 0]	20	ST	5

*sentido longitudinal da fibra. ** sentido transversal da fibra. ST – sem tratamento.

Fonte: autoria própria, 2017.

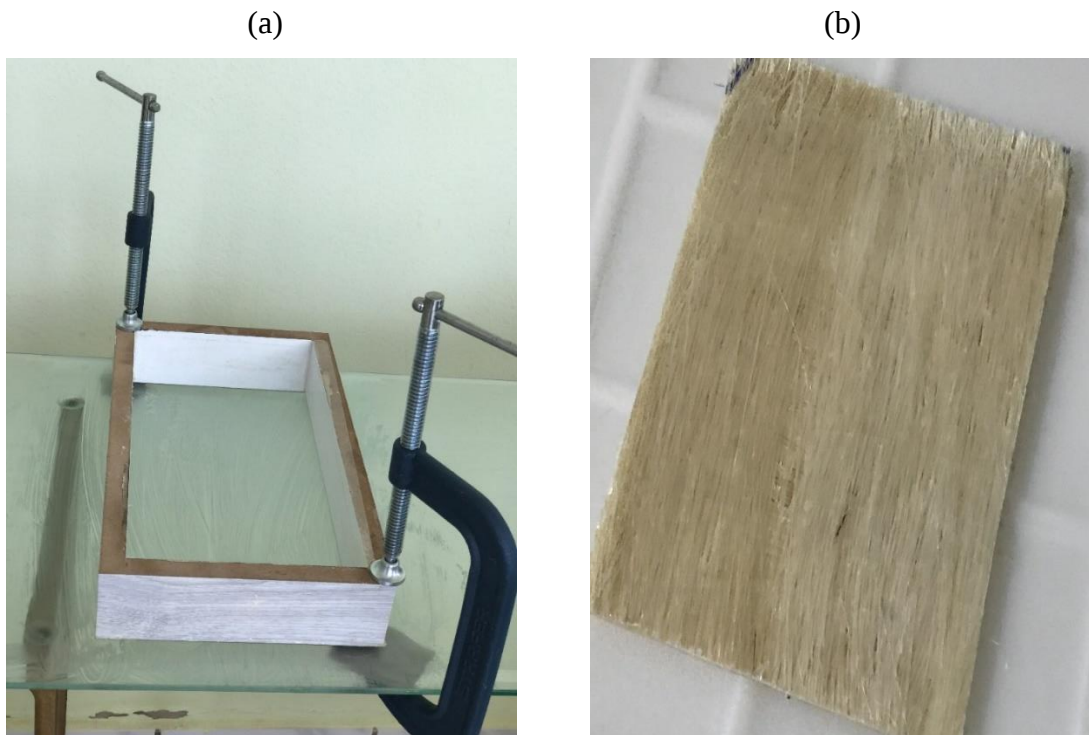
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CONFEÇÃO DOS COMPÓSITOS POR LAMINAÇÃO MANUAL

Conforme um dos objetivos apresentados para este trabalho, buscava-se confeccionar os compósitos de forma simples e de baixo custo. Portanto, utilizou-se um molde com material acessível e que fosse facilmente utilizado (Figura 29 (a)).

O molde tinha um formato de caixa em material MDF, uma base e uma tampa de vidro, além dos grampos de aperto para garantir que a resina não escoasse para fora do molde. Ao final do processo, se obteve uma placa de compósito (Figura 29 (b)), a qual foi cortada nos tamanhos determinados dos corpos de prova já mostrados e estes foram ensaiados. Os compósitos obtidos apresentaram superfícies lisas, com poucas falhas e com pouca variação de espessura ao longo da placa, sendo, portanto, viáveis de serem fabricados pelo método e molde escolhido.

Figura 29: (a) Molde utilizado para confecção dos corpos de prova dos compósitos; (b) Placa do compósito obtido após a cura da resina



Fonte: autoria própria, 2017.

5.2 PROPRIEDADES DA MATRIZ POLIÉSTER INSATURADO

A determinação da densidade e a realização de ensaios de tração e flexão da resina têm como objetivo caracterizar esse material que, posteriormente, será utilizado como matriz do compósito. Os valores obtidos intervêm nos cálculos do módulo de elasticidade teórico para validação dos resultados dos ensaios.

5.2.1. Densidade

Como o fabricante não forneceu as características da resina, a densidade desta curada foi determinada conforme o item 4.2.5. Os resultados das quatro amostras utilizadas são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados de densidade da resina poliéster insaturado

Amostra	Densidade (g/cm³)
1	1,24
2	1,23
3	1,23
4	1,23
Média	1,23
Desvio-Padrão	0,002

Fonte: autoria própria, 2017

Os pesquisadores Sanchez et al. (2010) e Satyanarayana (1996) apresentaram o valor de densidade da resina poliéster insaturado de 1,17 g/cm³ e 1,3 g/cm³, respectivamente.

5.2.2. Propriedades mecânicas de tração

Como forma de obter as propriedades mecânicas de tração da resina foi utilizada a técnica de correlação de imagens através do Correli Q4^{LMT}, que disponibiliza uma interface de resultados, onde estão os campos de deslocamento e de deformação nas duas direções do plano. Estes resultados são obtidos através da comparação de duas imagens em qualquer instante do ensaio. Na análise a seguir foram comparadas a última imagem antes da ruptura em relação à imagem de referência.

Para a obtenção dos valores de deslocamento e de deformação, tem-se uma escala em cores, onde cada cor representa valores dados em pixels, sendo 1 pixel correspondente a 0,0198 mm, para o caso em questão. Essa escala de conversão milímetro-pixel foi calculada com base nas dimensões da imagem e do corpo de prova.

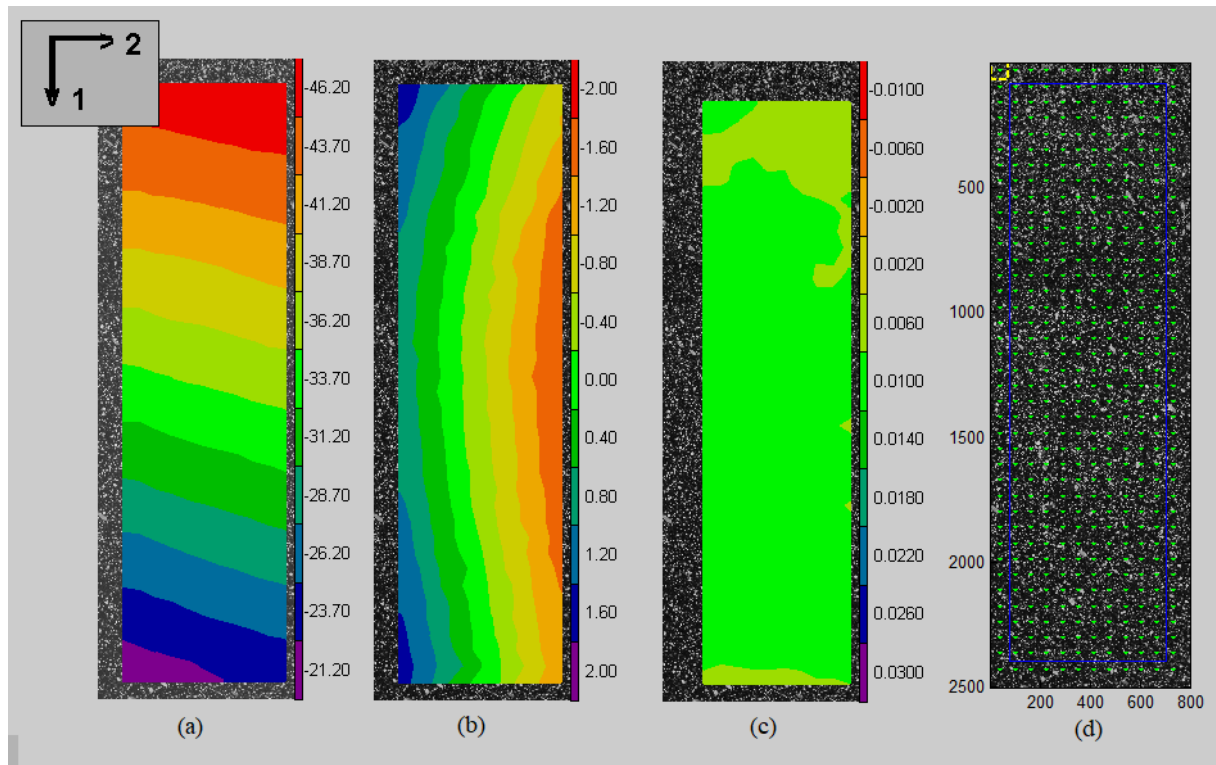
Os resultados obtidos da correlação digital de imagens da resina poliéster após a cura são mostrados na Figura 30.

As faixas horizontais representando os deslocamentos gradativamente na direção vertical, mostrados na Figura 30 (a), se apresentam de forma uniforme, com pouca variação. Por consequência, não há uma região de estricção, sendo a deformação sofrida na direção 1 também uniforme ao longo de todo o corpo de prova (Figura 30 (c)).

O deslocamento na direção horizontal (direção 2) sofrido pela resina também apresenta comportamento semelhante, com pouca variação entre elas (Figura 30 (c)). É possível observar que os deslocamentos são positivos à esquerda e negativos à direita do centro do corpo de prova, havendo uma convergência para o eixo longitudinal de simetria do corpo de prova à medida que ele é deformado. Isso é explicado porque o corpo de prova sofreu um alongamento na direção 1 através do esforço de tração e, consequentemente, um encurtamento na direção 2.

Devido haver uma deformação uniforme em todo o corpo de prova, o gauge selecionado para se retirar os dados médios de deformação e traçar o diagrama tensão-deformação foi de todo o comprimento útil do corpo de prova, como mostra a Figura 30 (d).

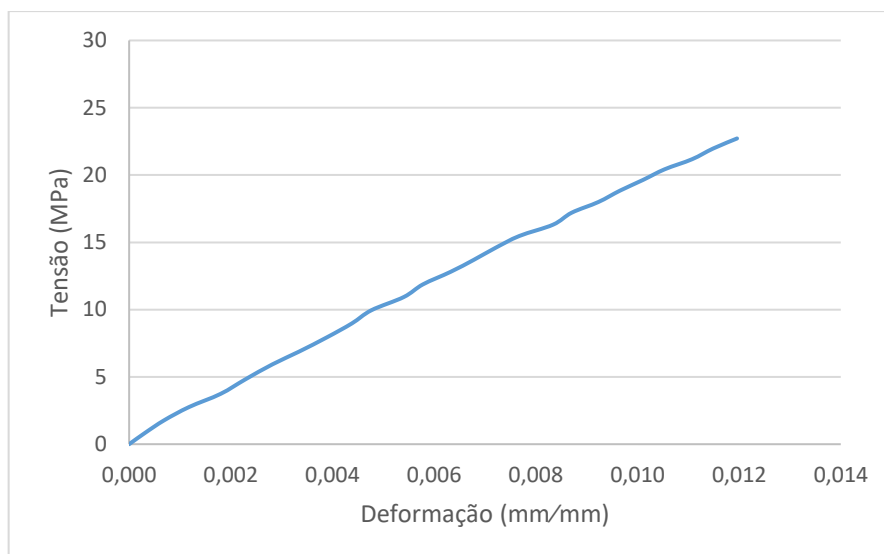
Figura 30 - Correlação digital de imagens da resina curada: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.



Fonte: autoria própria, 2017.

Com os valores de deformação obtidos através da análise da correlação digital de imagens e de carga obtidos da máquina de ensaios foi possível traçar a curva tensão x deformação. A Figura 31 mostra a curva obtida no ensaio de tração do corpo de prova 4 da resina.

Figura 31 - Curva tensão-deformação da resina poliéster insaturado



Fonte: autoria própria, 2017.

Pode-se observar que a matriz de poliéster apresentou comportamento elástico até sua ruptura, não apresentando escoamento. Portanto, o comportamento da resina foi de um material frágil, que se rompe com pouca deformação.

Com o gráfico da Figura 31, retirou-se os valores de resistência à tração, deformação e o módulo elástico das cinco amostras de resina poliéster insaturado ensaiadas (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores das propriedades de tração da resina poliéster insaturado

	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima	Módulo de elasticidade (MPa)
Média	25,37	0,013	1882,24
Desvio-Padrão	1,41	0,001	87,55

Fonte: autoria própria, 2017

Os pesquisadores Cerchiaro (2010) e Neto (2010) obtiveram como resultados de tração na resina poliéster uma tensão máxima de média $24,83 \pm 9,36$ MPa e $32,00 \pm 8,30$ MPa, respectivamente, sendo valores coerentes com os encontrados nesta pesquisa.

5.2.3. Propriedades mecânicas de flexão

A Tabela 8 exibe os valores de tensão máxima de flexão e deflexão máxima das cinco amostras de resina poliéster insaturado ensaiadas.

Tabela 8 - Valores das propriedades de flexão da resina poliéster insaturado

	Tensão máxima (MPa)	Deflexão máxima
Média	55,05	7,59
Desvio-Padrão	6,96	1,19

Fonte: autoria própria, 2017.

Os pesquisadores Caldas (2014) e Reis (2013) obtiveram como resultados de flexão na resina poliéster uma tensão máxima de média $60,20 \pm 3,10$ MPa e $60,40 \pm 11,16$ MPa, respectivamente, sendo coerentes com os encontrados nesta pesquisa.

5.3 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO ALCALINO NAS PROPRIEDADES DAS FIBRAS DE SISAL

5.3.1. Perda de massa

Os resultados da perda de massa sofrida pelas fibras de sisal com o tratamento químico, de acordo com as etapas preestabelecidas no item 4.2.2, são mostrados na Tabela 9.

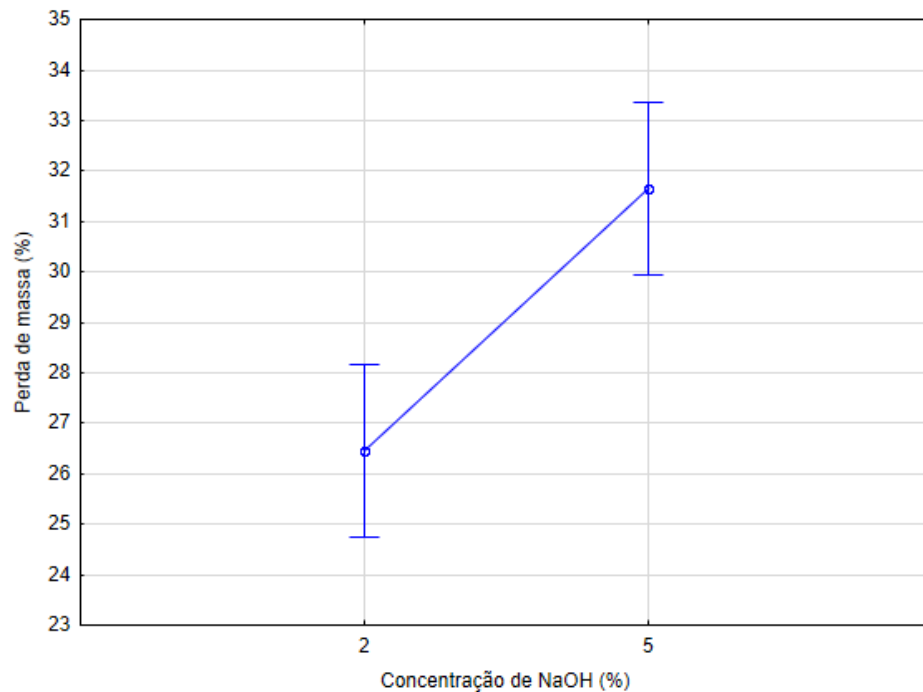
Tabela 9 – Perda de massa das amostras de sisal em função da concentração do tratamento alcalino

Concentração de NaOH	Média (%)	Desvio-Padrão
2%	26,45	1,41
5%	31,65	1,37

Fonte: autoria própria, 2017.

Conforme se observa no gráfico estatístico da Figura 32, houve um aumento da porcentagem de massa perdida pela fibra de sisal conforme se aumentou a concentração de NaOH.

Figura 32 - Gráfico da variação da perda de massa das fibras de sisal em função da variação de concentração do tratamento alcalino



Fonte: autoria própria, 2017.

Esse resultado é explicado porque o tratamento alcalino remove impurezas das fibras deixando-a mais limpa, além de alguns dos seus constituintes, como hemicelulose e lignina (Joseph, 1996). Um indicador da retirada dessas substâncias da fibra foi a coloração da solução alcalina, que inicialmente era incolor e após o tratamento apresentou-se de cor marrom claro, ficando cada vez mais escura conforme se aumentava a concentração da solução.

5.3.2. Densidade

A Tabela 10 apresenta os dados obtidos das densidades das fibras com os diferentes níveis do tratamento alcalino.

Tabela 10 – Densidade das fibras de sisal para cada nível de tratamento alcalino

Concentração de NaOH (%)	Densidade (g/cm ³)
0	1,11
2	1,26
5	1,29

Fonte: autoria própria, 2017

Observa-se um pequeno aumento da densidade da fibra com o aumento da concentração de NaOH. Isso se deve ao aumento da cristalinidade da fibra após o tratamento químico, devido a remoção parcial de hemicelulose e lignina, que promove um crescimento na fração mássica de celulose, as quais são responsáveis pela cristalinidade da fibra (Krishnaiah *et al*, 2017).

Os resultados apresentados estão coerentes com os de Fernandes et al (2013), que realizou tratamento químico em fibras de sisal com 5% de NaOH durante 2h em temperatura ambiente. Ele observou que houve aumento na densidade de 0,77 g/cm³ das fibras não tratadas para 0,84 g/cm³ para as tratadas quimicamente.

5.3.3. Diâmetro e propriedades mecânicas de tração

A Tabela 11 exhibe os valores de diâmetro, tensão máxima à tração e o módulo de elasticidade das amostras de sisal não tratadas e tratadas com concentrações de tratamento químico de 2% e 5%. Observa-se com o aumento da concentração do tratamento houve uma diminuição do diâmetro e aumento das propriedades mecânicas das fibras.

Tabela 11 - Propriedades das amostras de sisal em função do tratamento químico

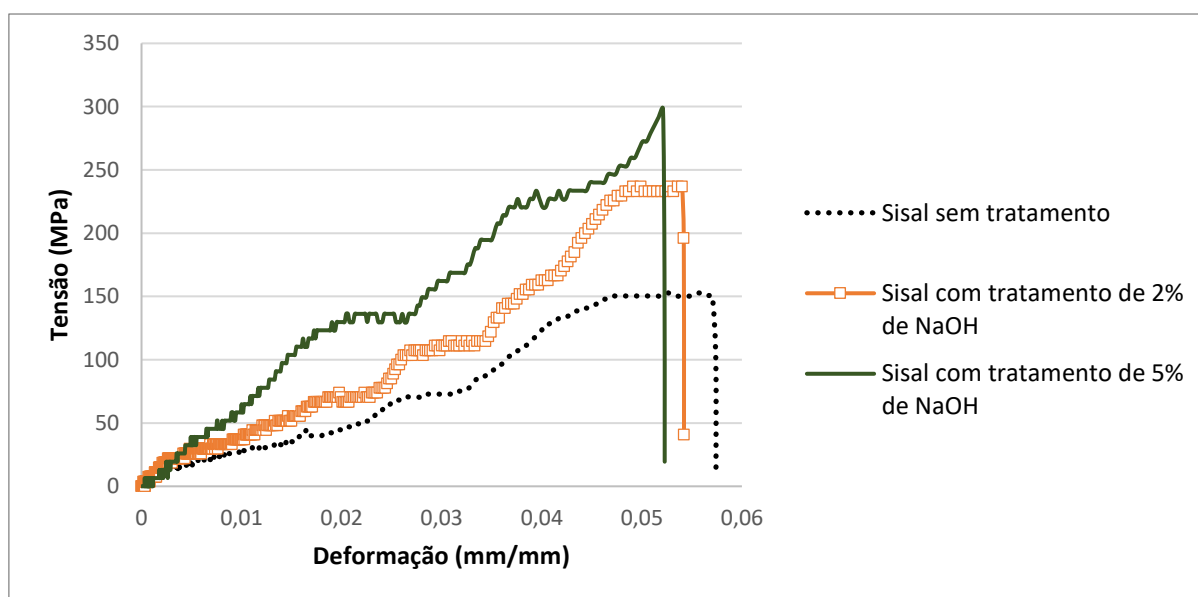
Tratamento alcalino	Diâmetro (mm)	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
ST	0,27 ± 0,04	215,62 ± 93,85	4993,05 ± 2597,85
2%	0,21 ± 0,04	256,89 ± 79,64	6576,53 ± 2636,51
5%	0,17 ± 0,03	298,46 ± 53,80	11155,99 ± 4184,75

ST – Sem tratamento

Fonte: autoria própria, 2017.

As curvas de tensão-deformação para as fibras de sisal são mostradas na Figura 33. Observa-se que o comportamento das fibras no ensaio de tração não sofreu influência com o tratamento químico, mas as propriedades das fibras foram diferentes para cada tratamento.

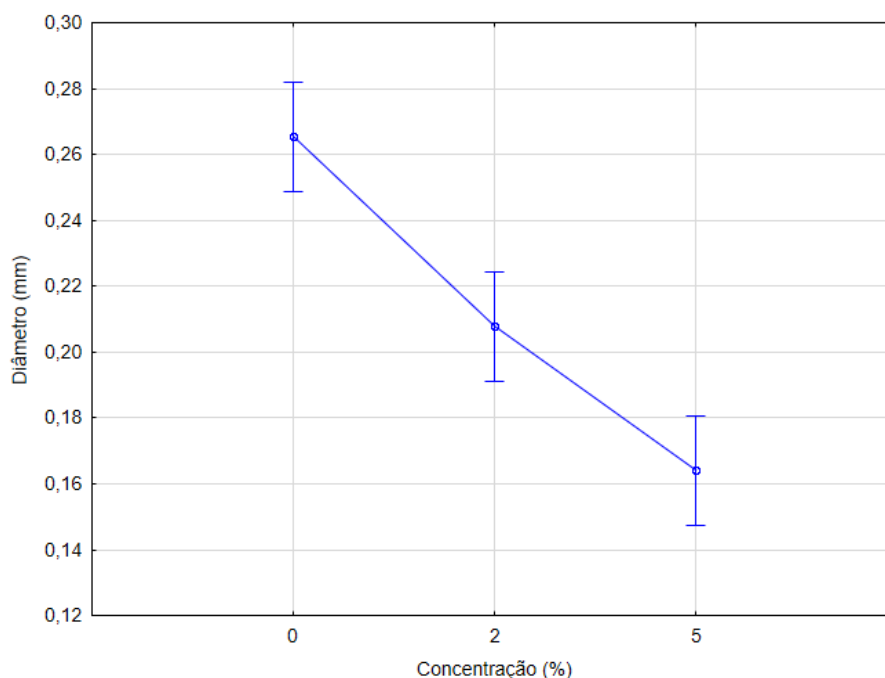
Figura 33 - Curvas tensão-deformação das fibras de sisal com e sem tratamento alcalino



Fonte: autoria própria, 2017.

Os gráficos das Figuras 34, 35 e 36 referem-se aos resultados estatísticos da variação do diâmetro, tensão máxima e módulo de elasticidade em função da concentração do tratamento químico.

Figura 34 - Gráfico de variação do diâmetro das amostras de sisal em função da concentração do tratamento químico.



Fonte: autoria própria, 2017

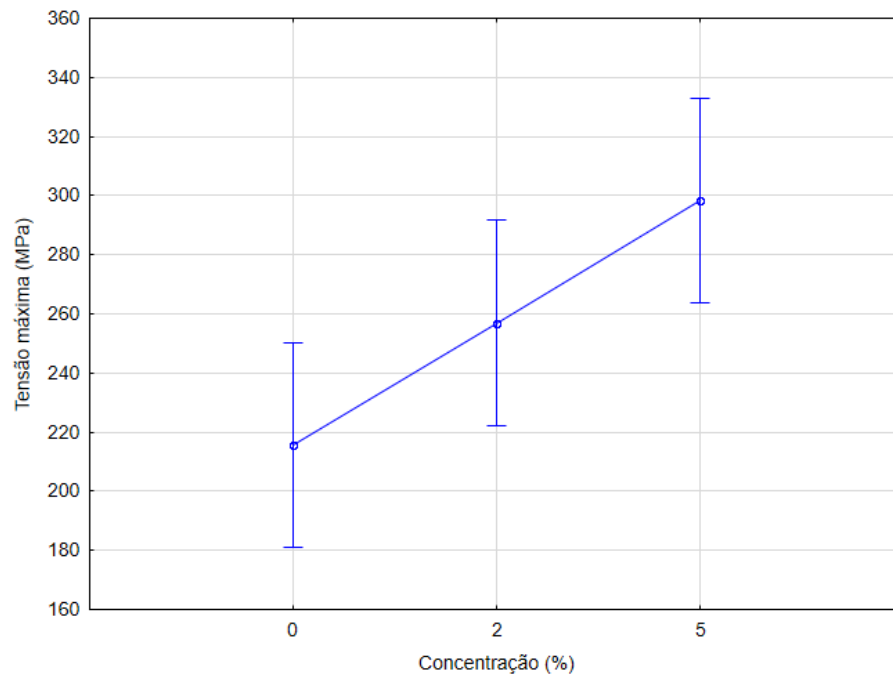
Na figura 34 observa-se que o diâmetro médio diminuiu com o tratamento alcalino, sendo cada vez menor conforme se aumentava a concentração de NaOH. Esse resultado era esperado, visto que o tratamento alcalino reduz o diâmetro da fibra através da remoção de materiais amorfos da superfície da fibra, que causam a fibrilação do feixe de fibras em fibras menores e aumentam a morfologia áspera (Bogoeva *et al.*, 2007).

Zhang et al (2017) realizou tratamento alcalino em fibras de sisal durante 2h a uma temperatura de 23°C e avaliou a influência deste em relação ao diâmetro das fibras. Obteve resultados análogos ao do presente trabalho, com diminuição do diâmetro de $0,17 \pm 0,031$ mm para $0,14 \pm 0,018$ mm após tratamento.

As Figuras 35 e 36 mostram que houve um aumento da tensão máxima e do módulo de elasticidade das fibras tratadas a 5% de NaOH, sendo para o tratamento de 2% estatisticamente igual o resultado em relação as fibras não tratadas.

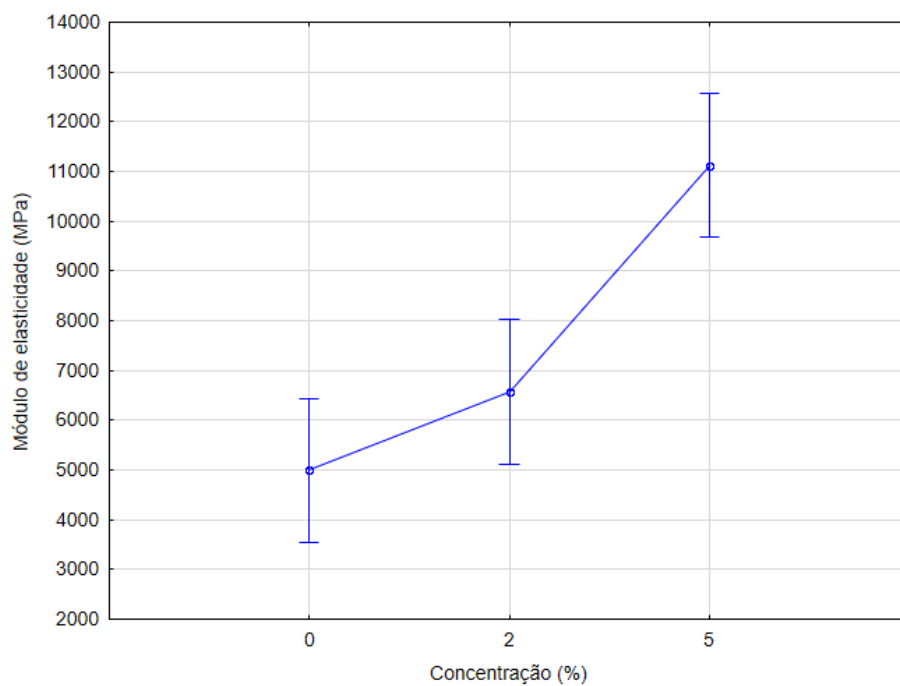
Esses resultados concordam com os encontrados na literatura. Zhang et al (2017) também obteve aumento nas propriedades das fibras para tensão de $529,9 \pm 102$ MPa para $692,9 \pm 73$ MPa e para o módulo de elasticidade de 13600 ± 2900 MPa para 18800 ± 3000 MPa após realização de tratamento alcalino.

Figura 35 - Gráfico de variação da tensão máxima das amostras de sisal em função da concentração do tratamento químico.



Fonte: autoria própria, 2017

Figura 36 - Gráfico de variação do módulo de elasticidade das amostras sisal em função da concentração do tratamento químico.



Fonte: autoria própria, 2017

A resistência e a rigidez das fibras naturais dependem principalmente do seu teor de celulose, fazendo-se necessária a remoção da lignina e da hemicelulose para a melhoria das propriedades dessas fibras. O motivo do incremento na resistência à tração e no módulo de elasticidade após o tratamento é, portanto, a remoção desses componentes, de materiais não celulósicos e de impurezas, que permanecem dispersados na região interfibrilar das fibras (Ferreira *et al.*, 2015).

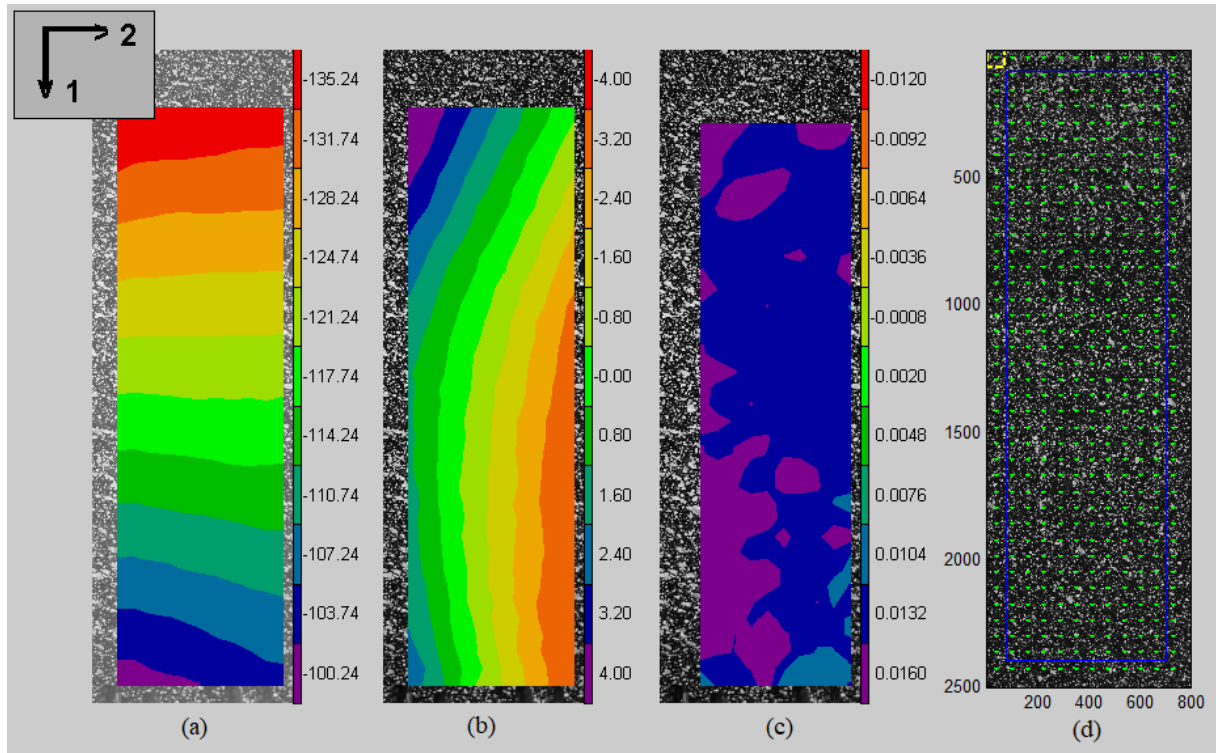
No entanto, a melhoria dessas propriedades depende principalmente da concentração da solução alcalina. Uma porcentagem otimizada de tratamento alcalino só pode remover os materiais amorfos parcialmente da superfície das fibras naturais. Se a concentração for superior ao ótimo, as fibras tornam-se enfraquecidas ou danificadas, o que leva à redução da resistência mecânica e das propriedades térmicas dos compósitos reforçados.

5.4 INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO QUÍMICO NAS PROPRIEDADES DOS COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS

O tratamento químico foi realizado também nos compósitos unidirecionais com composição de 20% de volume em fibra para analisar a influência deste nas suas propriedades.

Os resultados obtidos da correlação digital de imagens para o compósito unidirecional tracionado no sentido da fibra, sem tratamento, do ensaio do corpo de prova 5 são mostrados na Figura 37 e se mostra semelhante ao analisado da resina. Para os outros corpos de prova os resultados foram semelhantes. Para este caso, 1 pixel corresponde a 0,0188 mm.

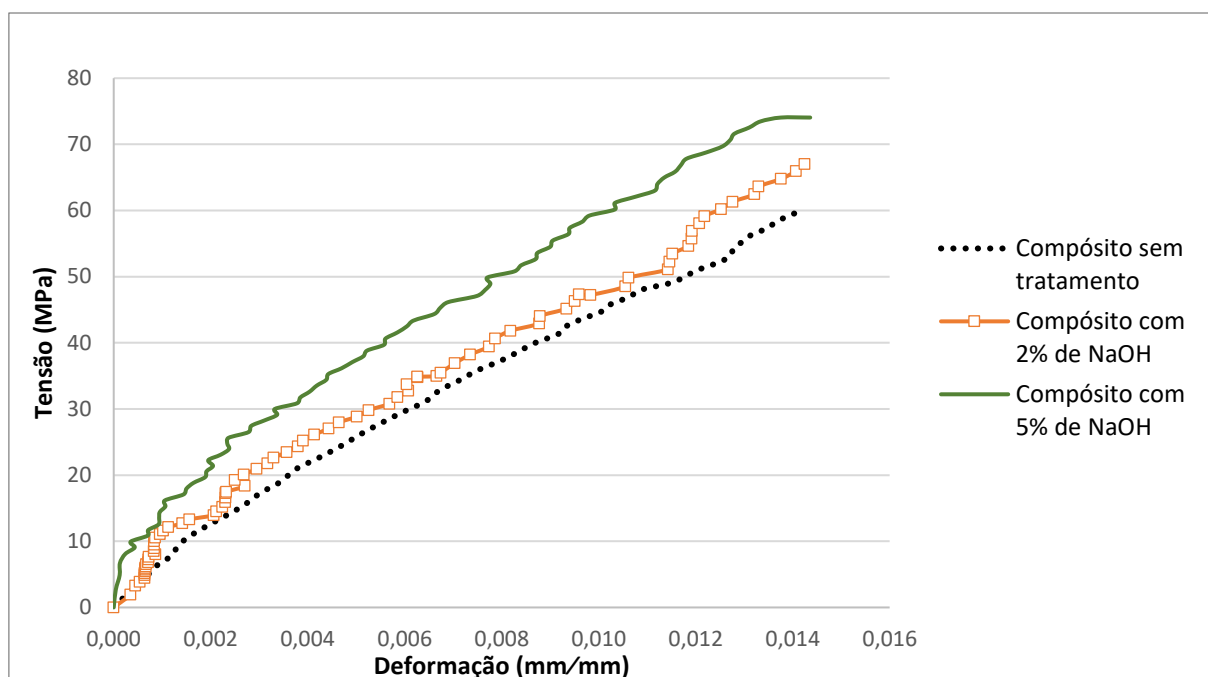
Figura 37 - Correlação digital de imagens para o compósito unidirecional com 20% de fibra: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.



Fonte: autoria própria, 2017.

Com os resultados da correlação digital de imagens e os dados colhidos da máquina, foram traçadas as curvas de tensão-deformação, que estão mostradas na Figura 38, e, através delas, obtidas as propriedades dos compósitos unidirecionais não tratados e tratados quimicamente.

Figura 38 - Curvas de tensão-deformação para os compósitos unidirecionais com e sem tratamento químico



Fonte: autoria própria, 2017.

O comportamento das curvas para os compósitos tratados e não tratados é semelhante. Possuem comportamento elástico até a ruptura e se rompem com pouca deformação, sendo, portanto, materiais frágeis. Os aspectos descontínuos das curvas estão relacionados às rupturas localizadas de uma ou mais fibras dos compósitos e a redistribuição dos esforços nas fibras ainda sem romper.

Os dados dos valores médios de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade estão mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades dos compósitos unidirecionais sem tratamento químico

	Tensão máxima (MPa)	Deformação máxima	Módulo de elasticidade (MPa)
ST	61,35 ± 2,94	0,015 ± 0,001	3986,77 ± 152,26
2%	63,49 ± 3,73	0,012 ± 0,001	4241,18 ± 189,66
5%	71,80 ± 3,33	0,014 ± 0,002	5032,70 ± 263,58

Fonte: autoria própria, 2017

Comparando-se com os dados da Tabela 7, nota-se que a resistência à tração assim como a rigidez aumenta em todos os compósitos com a incorporação de fibra à matriz de poliéster, indicando que a utilização de fibras de sisal em compósitos de resina poliéster proporciona efetivo reforço na resistência à tração destes materiais.

A Tabela 13 mostra os valores teóricos de tensão máxima e módulo de elasticidade para os compósitos com fibras tratadas e não tratadas, calculados a partir das equações 3.1 e 3.2.

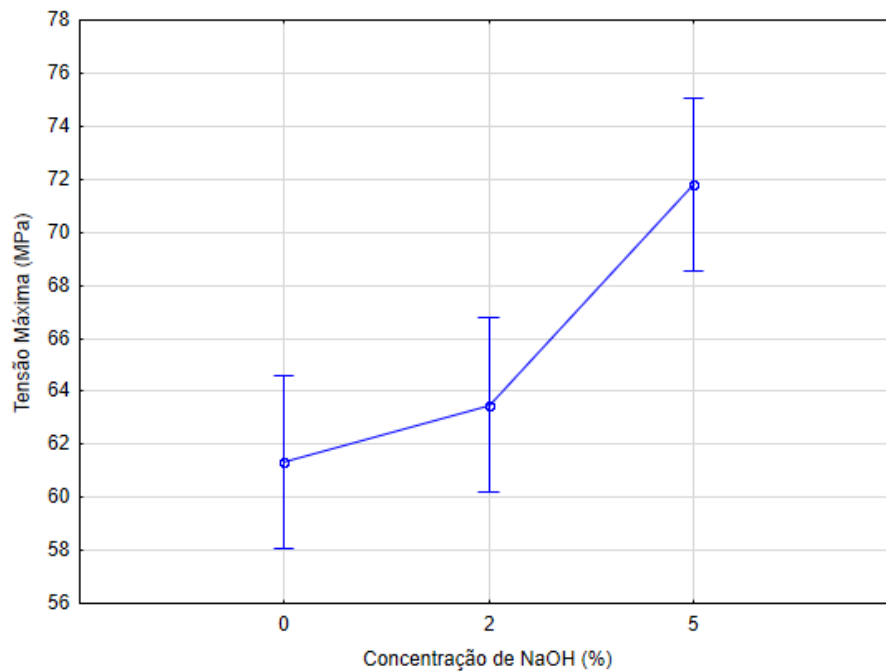
Tabela 13 - Valores teóricos de tensão e módulo de elasticidade para os compósitos

	Tensão Máxima Teórica (MPa)	Módulo de Elasticidade Teórico (MPa)
ST	124,07	2504,40
2%	119,92	2821,09
5%	120,86	3730,43

Observa-se que as equações descrevem que os compósitos suportariam tensões maiores que as encontradas nos experimentos realizados. Isso é explicado devido ao fato de que os compósitos foram fabricados de forma manual, com fibras naturais, acarretando maiores presenças de vazios e falhas, que podem ter comprometido a resistência final. O módulo de elasticidade teórico foi inferior ao encontrado, mas descreveu o mesmo comportamento do real, com aumento em função do tratamento químico.

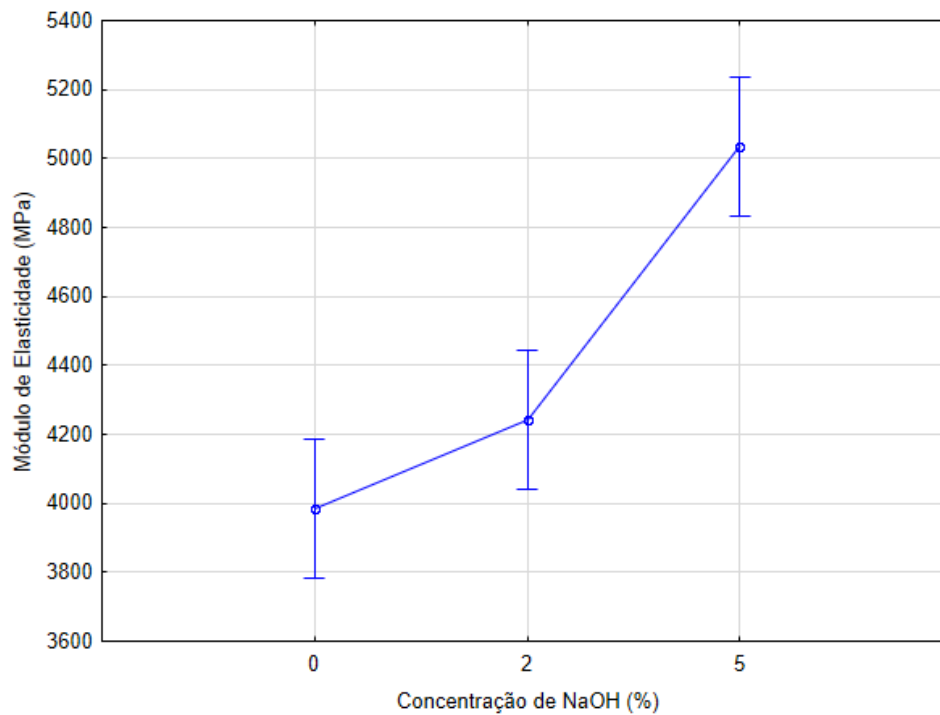
As Figuras 39 e 40 mostram os resultados estatísticos da influência do tratamento químico nas propriedades de tensão máxima, módulo de elasticidade e deformação máxima dos compósitos unidirecionais.

Figura 39: Gráfico de variação da tensão máxima de tração dos compósitos unidirecionais em função da concentração do tratamento químico.



Fonte: autoria própria, 2017.

Figura 40: Gráfico de variação do Módulo de Elasticidade de tração dos compósitos unidirecionais em função da concentração do tratamento químico.



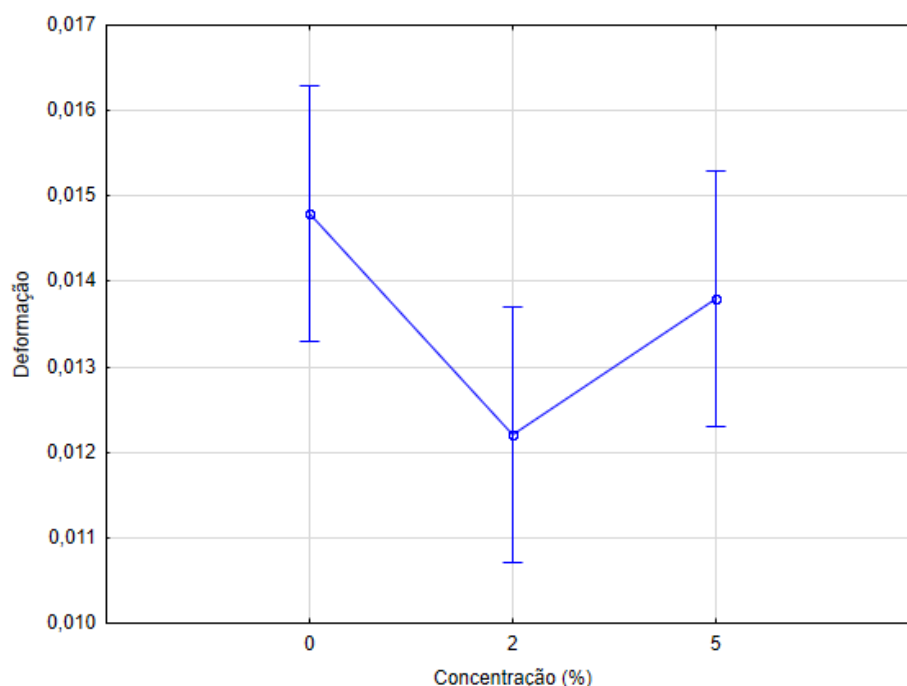
Fonte: autoria própria, 2017.

Observa-se que o tratamento alcalino de 2% não gerou diferença significativa na tensão máxima de tração e na rigidez em comparação aos compósitos não tratados. Em contrapartida, o tratamento de 5% teve influência no aumento das propriedades analisadas. Isso se deve ao fato de que o tratamento químico melhora a adesividade da superfície da fibra, através da remoção de impurezas, produzindo uma superfície mais áspera. Além disso, o tratamento promove a fibrilação das fibras, quebrando-as em fibras menores, fazendo com que a área superficial efetiva para contato com a matriz seja aumentada.

Sreekumar et al (2011) realizaram tratamento alcalino em fibras de sisal com 5% de NaOH durante 30 minutos a uma temperatura de 70°C e analisou a sua influência nas propriedades dos compósitos poliéster/sisal. Observaram um aumento na tensão de 67 ± 23 MPa para $79 \pm 1,8$ MPa e no módulo de elasticidade de 2196 ± 54 MPa para 3002 ± 45 MPa. Sendo, os resultados encontrados nesta pesquisa coerentes com a literatura.

A Figura 41 mostra a variação da deformação máxima dos compósitos unidirecionais com a concentração do tratamento químico. É possível observar que o tratamento não teve influência na deformação máxima sofrida, pois estatisticamente as deformações em todos os níveis de tratamento foram iguais.

Figura 41 - Gráfico de variação da deformação máxima de tração dos compósitos unidirecionais função da concentração do tratamento químico.



Fonte: autoria própria, 2017.

5.5 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS UNIDIRECIONAIS E ORIENTADOS

5.5.1. Compósitos unidirecionais [0]

Este compósito foi produzido com as quatro camadas com as fibras de sisal alinhadas com o carregamento axial do ensaio, sendo denominados de [0]. A fração volumétrica foi de 80% para a matriz e 20% para o reforço.

5.5.1.1 Propriedades de tração

Os resultados de tração para esses compósitos [0], sem tratamento químico, já foram mostrados e discutidos no tópico 5.4 na Tabela 12. Os valores médios obtidos foram de tensão máxima de $61,35 \pm 2,94$ MPa, deformação de $0,015 \pm 0,001$ e módulo de elasticidade de $3986,77 \pm 152,26$ MPa.

5.5.1.2 Propriedades de flexão

A Tabela 14 mostra a média dos valores de tensão máxima de flexão e deflexão máxima obtidos dos compósitos unidirecionais [0] ensaiados.

Tabela 14– Propriedades mecânicas de flexão dos compósitos unidirecionais [0]

	Tensão máxima (MPa)	Deflexão máxima
Média	101,06	7,44
Desvio-Padrão	6,92	0,58

Fonte: autoria própria, 2017.

5.5.2. Compósitos unidirecionais [90]

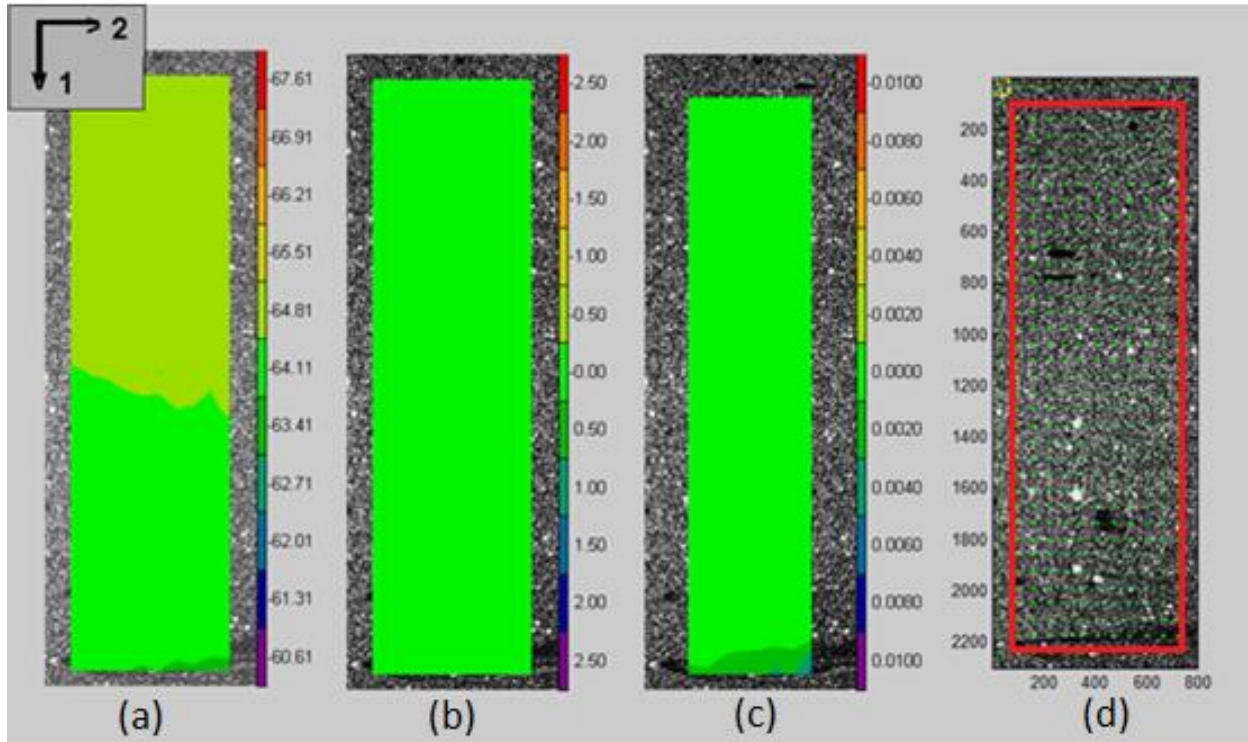
Este compósito foi produzido com as quatro camadas com as fibras de sisal perpendiculares ao carregamento axial do ensaio [90], sendo denominado de [90]. A fração volumétrica foi de 80% para a matriz e 20% para o reforço.

5.5.2.1 Propriedades de tração

Os resultados da correlação digital de imagens são mostrados na Figura 42. Para esse caso, 1 pixel corresponde a 0,015mm.

Como pode ser observado, para esses compósitos com as fibras alinhadas na direção transversal ao esforço do ensaio, o corpo de prova analisado não sofreu praticamente deslocamento em nenhuma das duas direções (Figura 42 (a) e (b)). Isso pode ser comprovado na figura 42 (c) que mostra que o corpo de prova teve deformação quase nula, em virtude desse material suportar pequenas tensões.

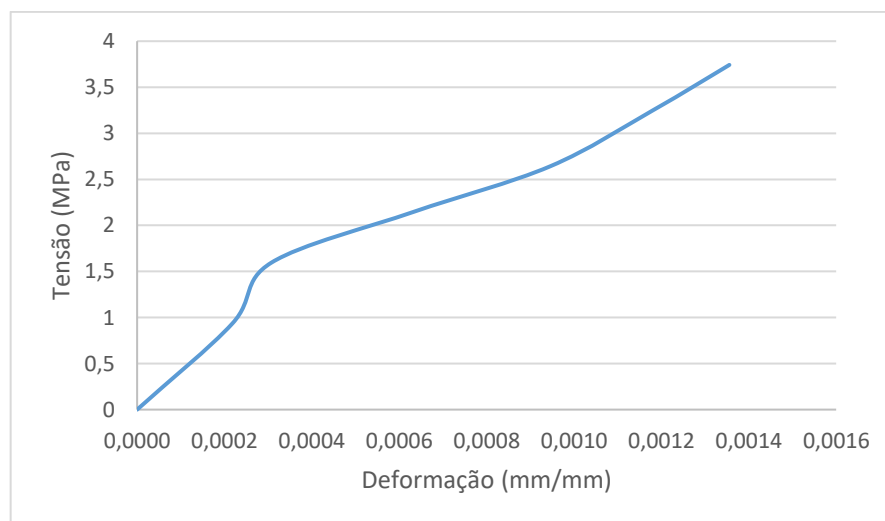
Figura 42 - Correlação digital de imagens para o compósito unidirecional [90]: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.



Fonte: autoria própria, 2017.

Com os dados de deformação da correlação digital de imagens e de tensão da máquina traçou-se a curva tensão-deformação desses compósitos, mostrada na Figura 43.

Figura 43 - Curva tensão-deformação do compósito unidirecional [90]



Fonte: autoria própria, 2017.

Conforme era esperado com os resultados da análise de imagens, os compósitos [90] suportaram tensões e deformações pequenas, como podemos ver na curva acima. O comportamento foi semelhante aos demais, sendo um material frágil.

Os dados de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade obtidos através das curvas dos ensaios de tração são mostrados na Tabela 15. Os valores teóricos foram calculados através das equações 3.4 e 3.5.

Tabela 15 – Propriedades mecânicas de tração dos compósitos unidirecionais [90]

	Tensão Máxima (MPa)	Deformação Máxima	Módulo de elasticidade (MPa)
Média	2,38	0,002	1713,45
Desvio-Padrão	1,34	0,0019	464,58
Teórico	20,30	-	2116,52

Fonte: autoria própria, 2017.

Da mesma forma aos compósitos longitudinais, as equações descrevem que os compósitos suportariam tensões maiores que as encontradas nos experimentos realizados. O módulo de elasticidade teórico calculado foi próximo ao real.

5.5.2.2 Propriedades de flexão

A Tabela 16 mostra a média dos valores de tensão máxima de flexão e deflexão máxima obtidos dos compósitos unidirecionais [90] ensaiados.

Tabela 16 – Propriedades mecânicas de flexão dos compósitos unidirecionais com fibras na direção transversal [90]

	Tensão máxima (MPa)	Deflexão máxima
Média	7,71	7,70
Desvio-Padrão	2,50	0,23

Fonte: autoria própria, 2017.

5.5.3. Compósitos orientados [0 90 90 0]

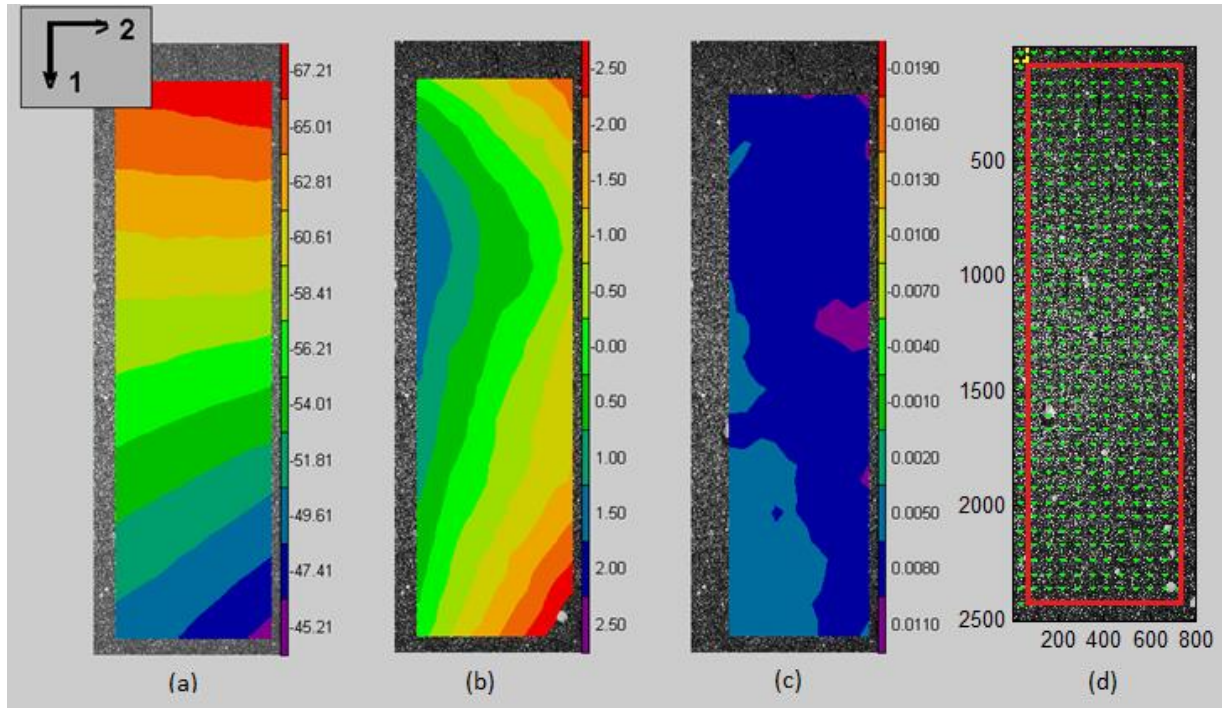
Este compósito foi produzido usando quatro camadas alternadas com as fibras de sisal orientadas, sendo a primeira e a última camada alinhadas [0] ao carregamento axial do ensaio, e a segunda e a terceira perpendiculares [90]. Possuem denominação de [0 90 90 0]. A fração volumétrica foi de 80% para a matriz e 20% para o reforço.

5.5.3.1 Propriedades de tração

Os resultados da correlação digital de imagens para esses compósitos são mostrados na Figura 44. Neste caso, 1 pixel corresponde a 0,0186 mm.

A superfície analisada na correlação digital de imagens para o compósito [0 90 90 0] é a parte da camada cujas fibras estão alinhadas à direção do carregamento, assim como para os compósitos orientados na direção longitudinal [0]. Em virtude disso, o comportamento destes é semelhante a eles.

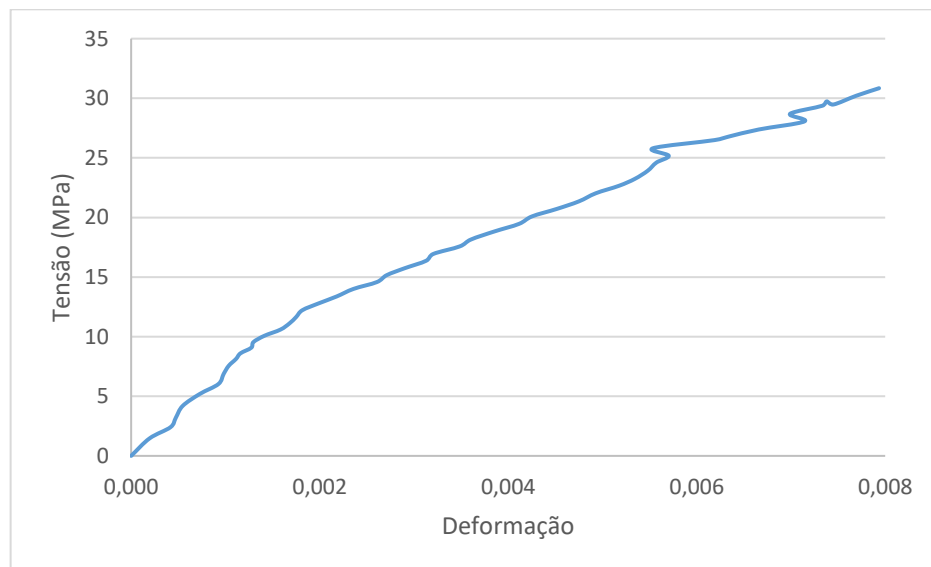
Figura 44: Correlação digital de imagens para o compósito orientado $[0 \ 90 \ 90 \ 0]$: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.



Fonte: autoria própria, 2017.

Com os dados de deformação obtidos da correlação digital de imagens e de tensão da máquina traçou-se a curva tensão-deformação desses compósitos, mostrada na Figura 45.

Figura 45: Curva tensão-deformação do compósito orientado $[0 \ 90 \ 90 \ 0]$



Fonte: autoria própria, 2017.

Os compósitos orientados [0 90 90 0], como pode ser observado na curva acima, apresentaram comportamento elástico até a ruptura e se romperam com pouca deformação. O modo de ruptura foi frágil, sendo que a superfície da fratura aconteceu nas proximidades dos fios transversais.

Os dados de tensão máxima, deformação máxima e módulo de elasticidade obtidos através das curvas dos ensaios de tração são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Propriedades mecânicas de tração dos compósitos orientados [0, 90, 90, 0]

	Tensão (MPa)	Deformação	Módulo de elasticidade (MPa)
Média	29,30	0,010	3112,39
Desvio-Padrão	2,10	0,001	614,29

Fonte: autoria própria, 2017.

5.5.3.2 Propriedades de Flexão

A Tabela 18 mostra a média dos valores de tensão máxima de flexão e deflexão máxima obtidos dos compósitos orientados [0 90 90 0] ensaiados.

Tabela 18 - Propriedades mecânicas de flexão dos compósitos orientados [0 90 90 0]

	Tensão máxima (MPa)	Deflexão máxima
Média	95,55	7,04
Desvio-Padrão	4,57	0,15

Fonte: autoria própria, 2017.

5.5.4. Compósitos orientados [90 0 0 90]

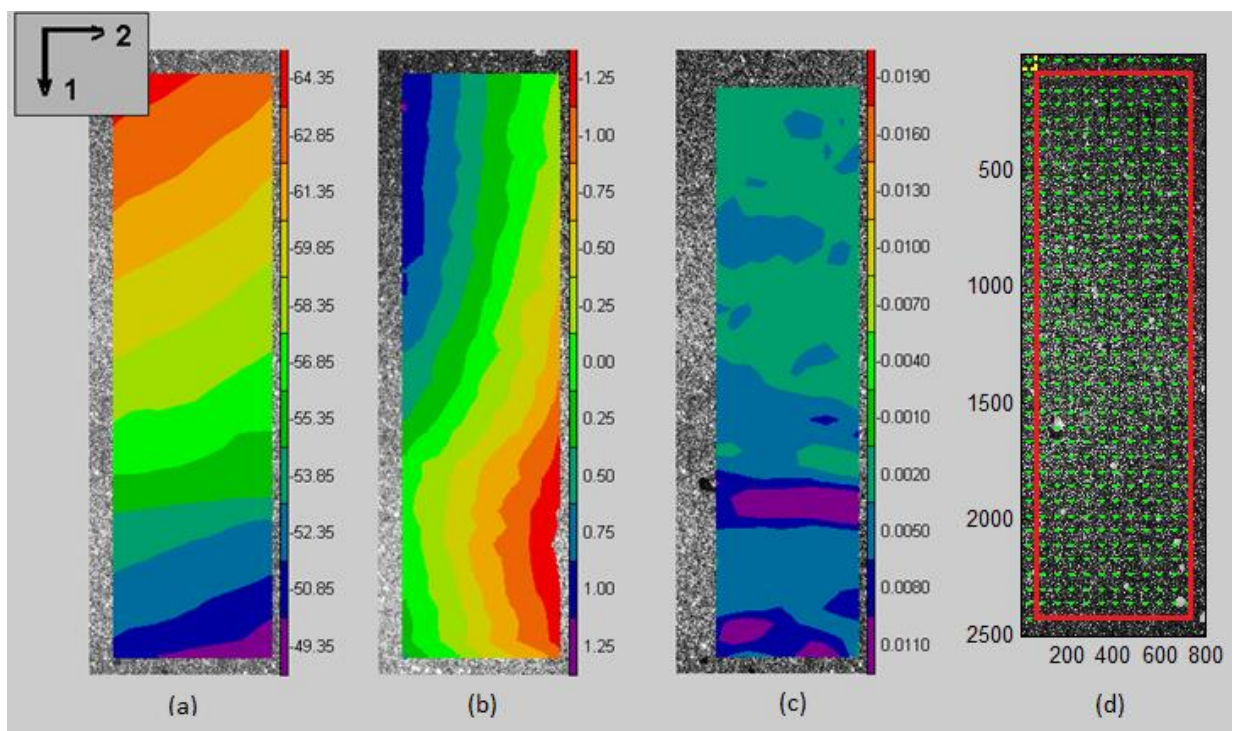
Este compósito foi produzido usando quatro camadas alternadas com as fibras de sisal orientadas, sendo a primeira e a última camada perpendiculares [90] ao carregamento axial do

ensaio, e a segunda e a terceira alinhadas [0]. Possuem denominação de [90 0 0 90]. A fração volumétrica foi de 80% para a matriz e 20% para o reforço.

5.5.4.1 Propriedades de tração

Os resultados da correlação digital de imagens são mostrados na Figura 46. Neste caso, 1 pixel corresponde a 0,0162 mm.

Figura 46: Correlação digital de imagens para o compósito orientado [90 0 0 90]: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.



Fonte: autoria própria, 2017.

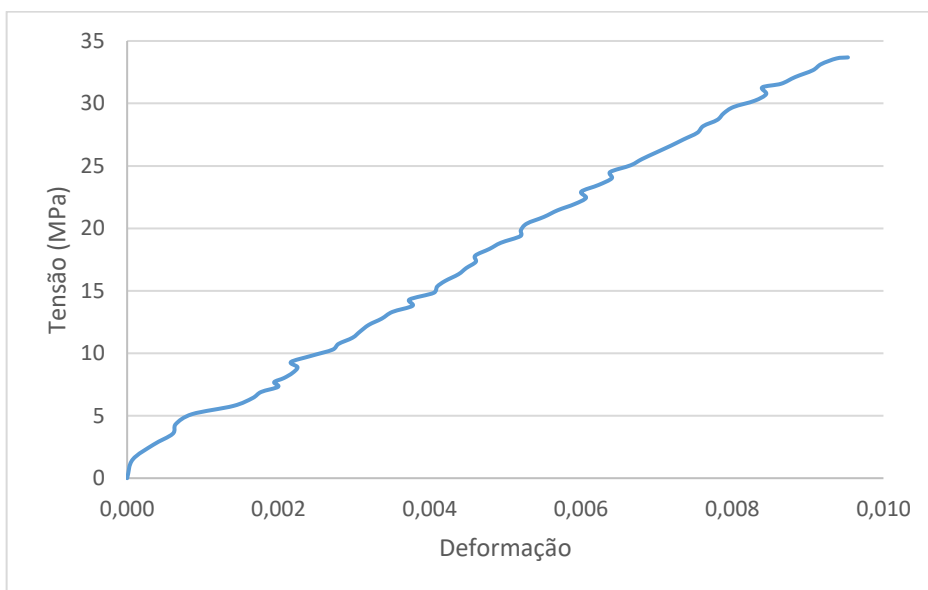
A superfície analisada na correlação digital de imagens para o compósito [90 0 0 90] é a parte da camada cujas fibras estão perpendiculares à direção do carregamento. Por isso, para estes, o comportamento na análise da CDI foi diferente ao mostrado do compósito [0 90 90 0].

Nessa direção, as fibras suportam pouca carga e, conseqüentemente, os deslocamentos não são uniformes. Isso explica as faixas de deslocamento vertical (Figura 46 (a)) com

variação de tamanho na parte inferior do corpo de prova e, por isso, este possui uma concentração de deformação nessa região, como mostra a Figura 46 (c). O deslocamento horizontal sofrido por esse compósito (Figura 46 (b)) possui comportamento característico do ensaio de tração, assim como os demais analisados.

A curva tensão-deformação desses compósitos foi obtida com os resultados da correlação digital de imagens e é mostrada na Figura 47.

Figura 47: Curva tensão-deformação do compósito orientado [90 0 0 90]



Fonte: autoria própria, 2017.

Observa-se que o comportamento da curva é semelhante ao mostrado para os compósitos com a configuração [0 90 90 0], com comportamento de material frágil.

Os valores das propriedades de tração obtidos através das curvas são mostrados na Tabela 19.

Tabela 19 - Propriedades mecânicas de tração dos compósitos orientados [90, 0, 0, 90]

	Tensão (MPa)	Deformação	Módulo de elasticidade (MPa)
Média	29,07	0,009	3173,79
Desvio-Padrão	5,87	0,003	397,15

Fonte: autoria própria, 2017.

5.5.4.2 Propriedades de Flexão

A Tabela 20 mostra a média dos valores de tensão máxima de flexão e deflexão máxima obtidos dos compósitos orientados [90 0 0 90] ensaiados.

Tabela 20 – Propriedades mecânicas de flexão dos compósitos orientados

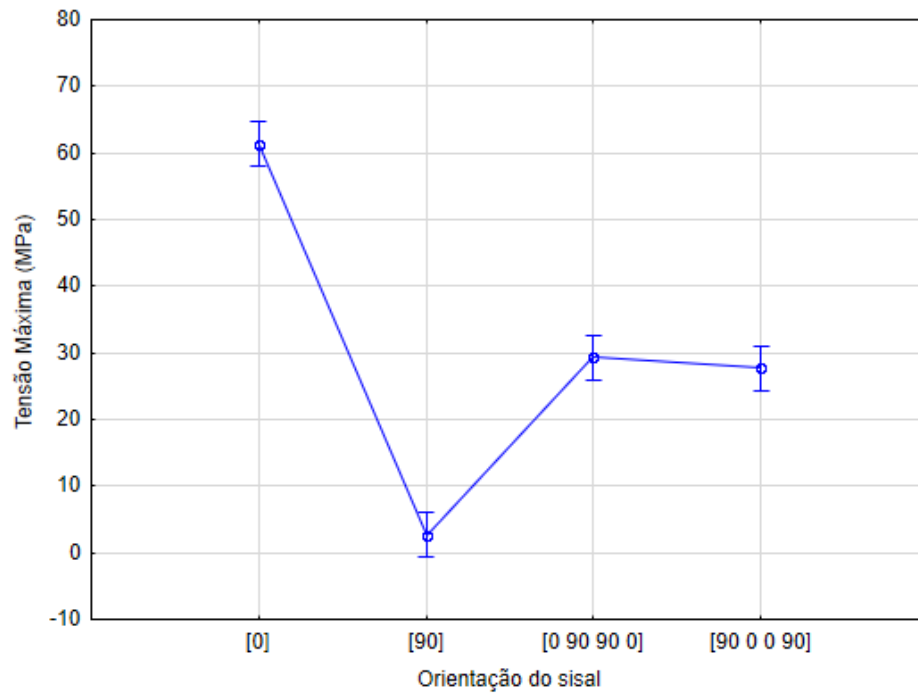
	Tensão máxima (MPa)	Deflexão máxima
Média	45,92	6,77
Desvio-Padrão	3,21	0,27

Fonte: autoria própria, 2017.

5.5.5. Influência da orientação da fibra nos compósitos unidirecionais e orientados

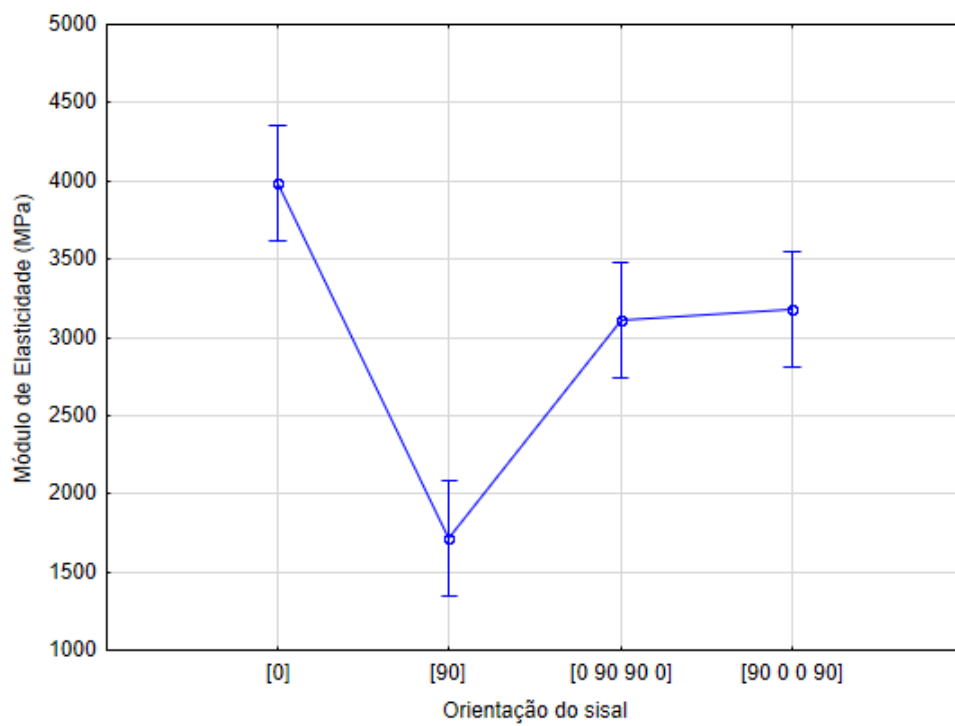
Os compósitos possuem características de anisotropia e, portanto, suas propriedades são influenciadas fortemente pela orientação do reforço, como mostram as análises estatísticas das Figuras 48 e 49.

Figura 48: Gráfico da variação da tensão máxima de tração dos compósitos unidirecionais e orientados em função da variação da orientação da fibra de sisal



Fonte: autoria própria, 2017.

Figura 49: Gráfico da variação do módulo de elasticidade dos compósitos unidirecionais e orientados em função da variação da orientação da fibra de sisal



Fonte: autoria própria, 2017.

As Figuras 48 e 49 mostram o gráfico de tensão máxima e módulo de elasticidade em função da orientação da fibra de sisal nos compósitos unidirecionais e orientados. Observa-se que os compósitos com as fibras alinhadas na direção longitudinal [0] ao esforço, possui maior resistência e rigidez que os demais.

Esses são anisotrópicos e o máximo na resistência é obtido quando o material é testado na direção do alinhamento das fibras. Já com as fibras alinhadas na direção transversal, o reforço é virtualmente inexistente e, portanto, o material falha em tensões muito baixas. Este comportamento é tido como indicativo que, quando dispostas transversalmente ao esforço, as fibras atuam como defeitos, concentrando tensões e reduzindo a resistência do compósito.

Joseph et al. (1999) analisou também a influência da orientação da fibra nas propriedades dos compósitos poliéster com fibras de sisal longas, moldados por compressão, e obteve resultados análogos aos apresentados no presente trabalho. Os resultados de tensão e módulo de elasticidade, respectivamente, para as fibras na direção longitudinal foram $115,82 \pm 3,01$ MPa e $3,07 \pm 0,09$ GPa, e para aquelas alinhadas na direção transversal foram $11,59 \pm 1,33$ MPa e $0,91 \pm 0,06$ GPa.

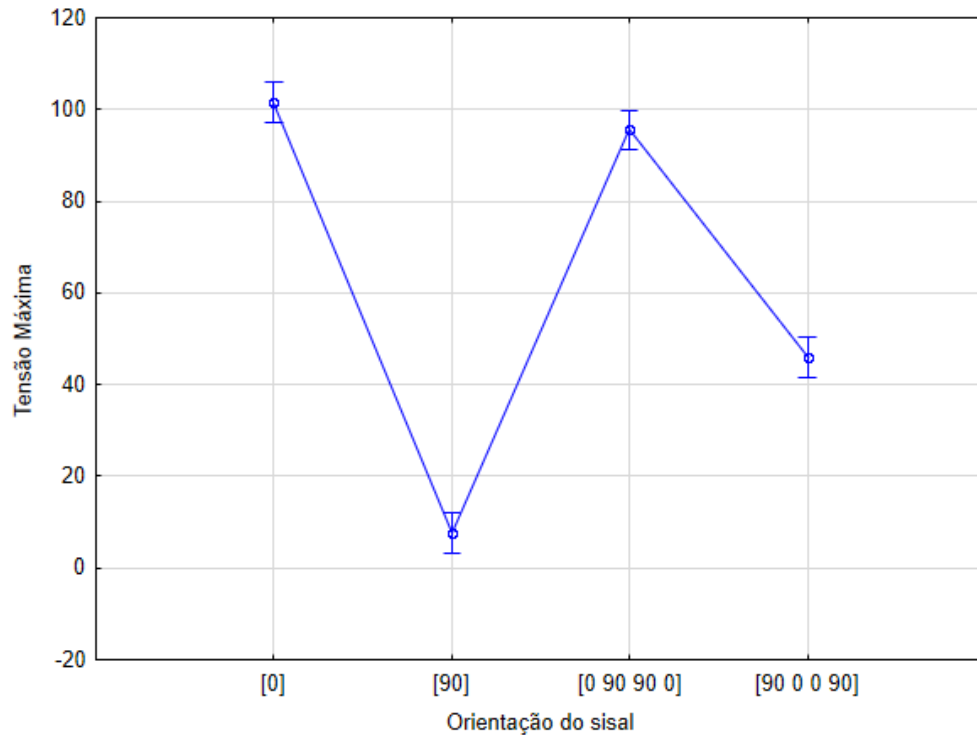
Esses extremos podem ser compensados através da utilização de laminados multidirecionais, com as camadas em diferentes orientações, como acontece com os compósitos [0 90 90 0] e [90 0 0 90]. Observa-se que as propriedades de tração foram semelhantes, não havendo variação entre as duas configurações. Esse comportamento era esperado em virtude da análise macromecânica desses laminados cross-ply simétricos, as quais as equações 3.28, 3.30 e 3.31 mostram que para esses independentemente da ordem de orientação das camadas as propriedades de tração são as mesmas.

Além disso, eles apresentaram propriedades intermediárias às exibidas pelos compósitos unidirecionais. Isso também já era esperado, pois as camadas cujas fibras estão alinhadas ao esforço possuem resistência elevada, mas aquelas que estão perpendiculares à direção axial do esforço pouco contribuem na resistência à tração.

Em coerência com os resultados encontrados nesse trabalho, Cerchiaro (2010) também analisou compósitos orientados [0 90 0 90] de poliéster com fibras de sisal em fração volumétrica de 9,38%. Obteve nesses compósitos propriedades de tração intermediárias aos compósitos unidirecionais [0] e [90], com tensão média de $22,49 \pm 12,42$ MPa e módulo de elasticidade de $2,06 \pm 1,26$ GPa.

A Figura 50 mostra a análise estatística para os resultados de flexão dos compósitos em função da orientação do reforço.

Figura 50: Gráfico da variação da tensão máxima de flexão dos compósitos unidirecionais e orientados em função da variação da orientação da fibra de sisal



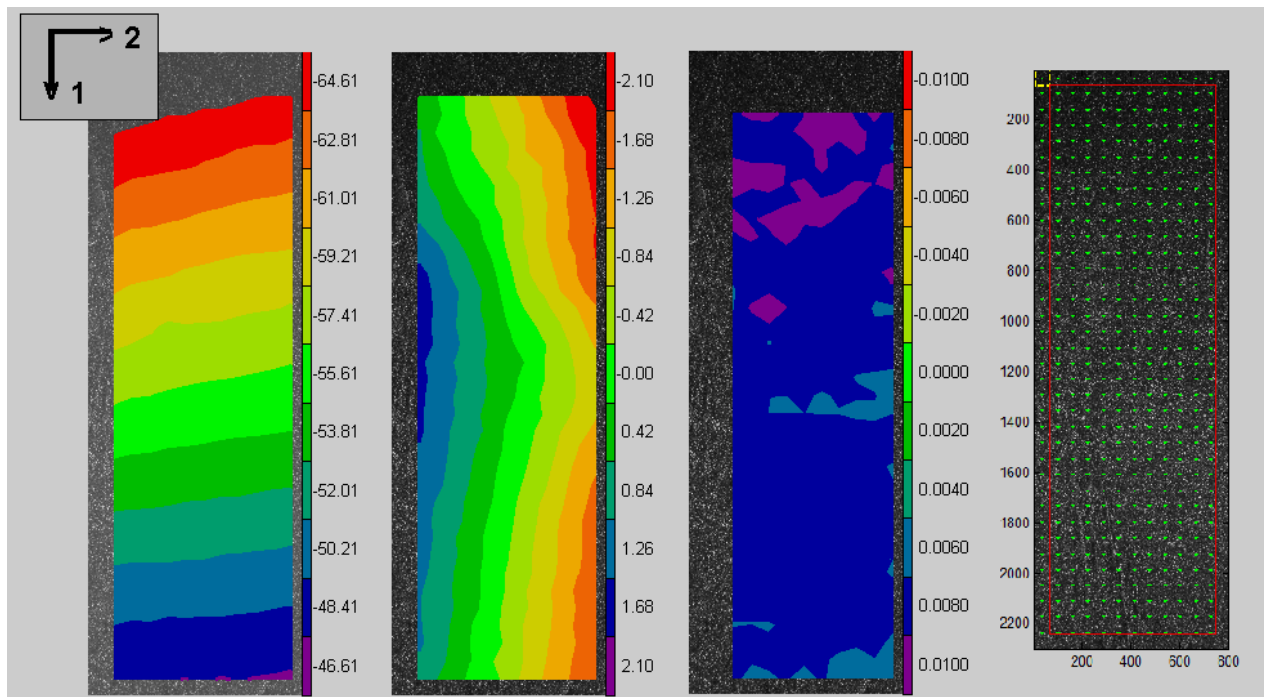
Observa-se que o comportamento de flexão dos compósitos unidirecionais [0] e [90] foi análogo ao obtido com tração. Porém, para os compósitos orientados as propriedades de flexão não foram iguais. Aqueles com configuração [0 90 90 0] possuem maior resistência a flexão que [90 0 0 90]. Esse resultado é explicado em virtude da última camada do compósito [0 90 90 0], que sofre esforço de tração no ensaio de flexão, estar na direção longitudinal, possuindo maior resistência. Enquanto que a última camada do compósito [90 0 0 90] está na direção transversal, possuindo pouca resistência.

5.6 INFLUÊNCIA DA CONCENTRAÇÃO DA FIBRA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS COMPÓSITOS ORIENTADOS [0 90 90 0]

Os compósitos orientados com a configuração [0 90 90 0] foram confeccionados variando a composição do reforço em 10%, 20% e 30% em volume, como forma de avaliar a influência dessa concentração nas propriedades de tração dos mesmos.

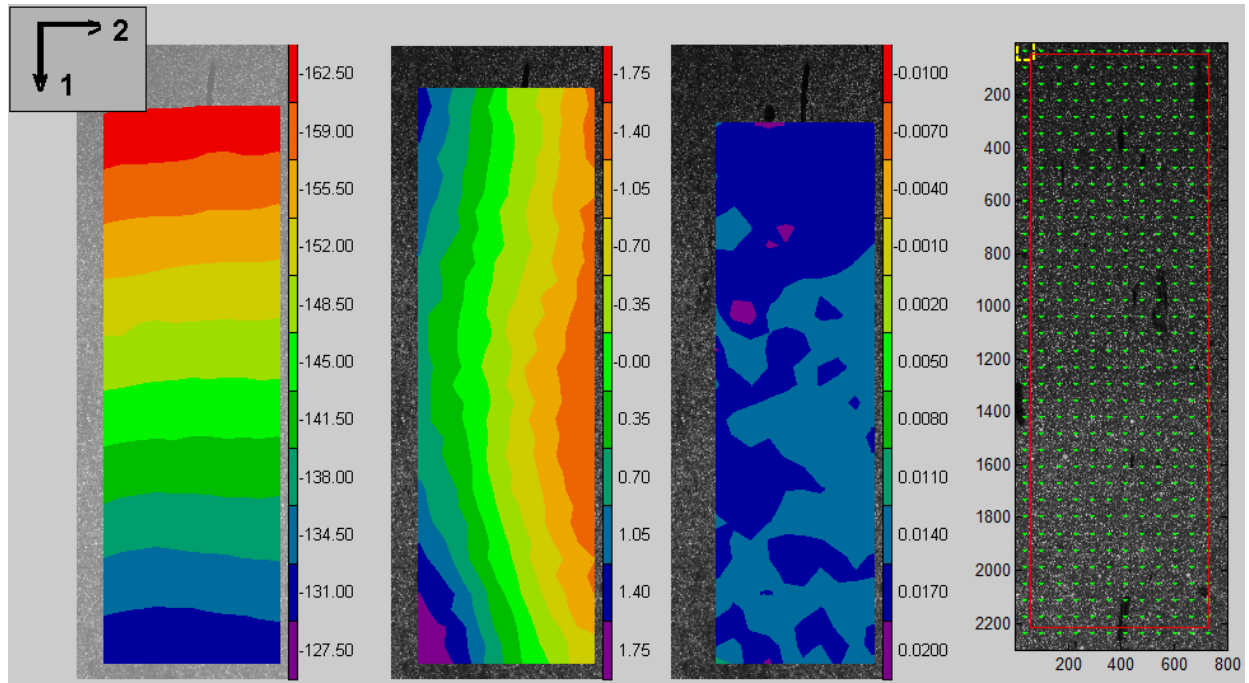
Os resultados para esses com 20% em volume de fibra de sisal já foram apresentados no tópico 5.5.3. As Figuras 51 e 52 mostram a análise das imagens obtidas no ensaio de tração com os compósitos de 10% e 30% de sisal. A escala de conversão foi de 1 pixel correspondente a 0,016 mm, para ambos.

Figura 51: Correlação digital de imagens para o compósito orientado com 10% de fibra de sisal: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.



Fonte: autoria própria, 2017.

Figura 52: Correlação digital de imagens para o compósito orientado com 30% de fibra de sisal: (a) deslocamento na direção 1; (b) deslocamento na direção 2; (c) deformação na direção 1; (d) gauge utilizado.

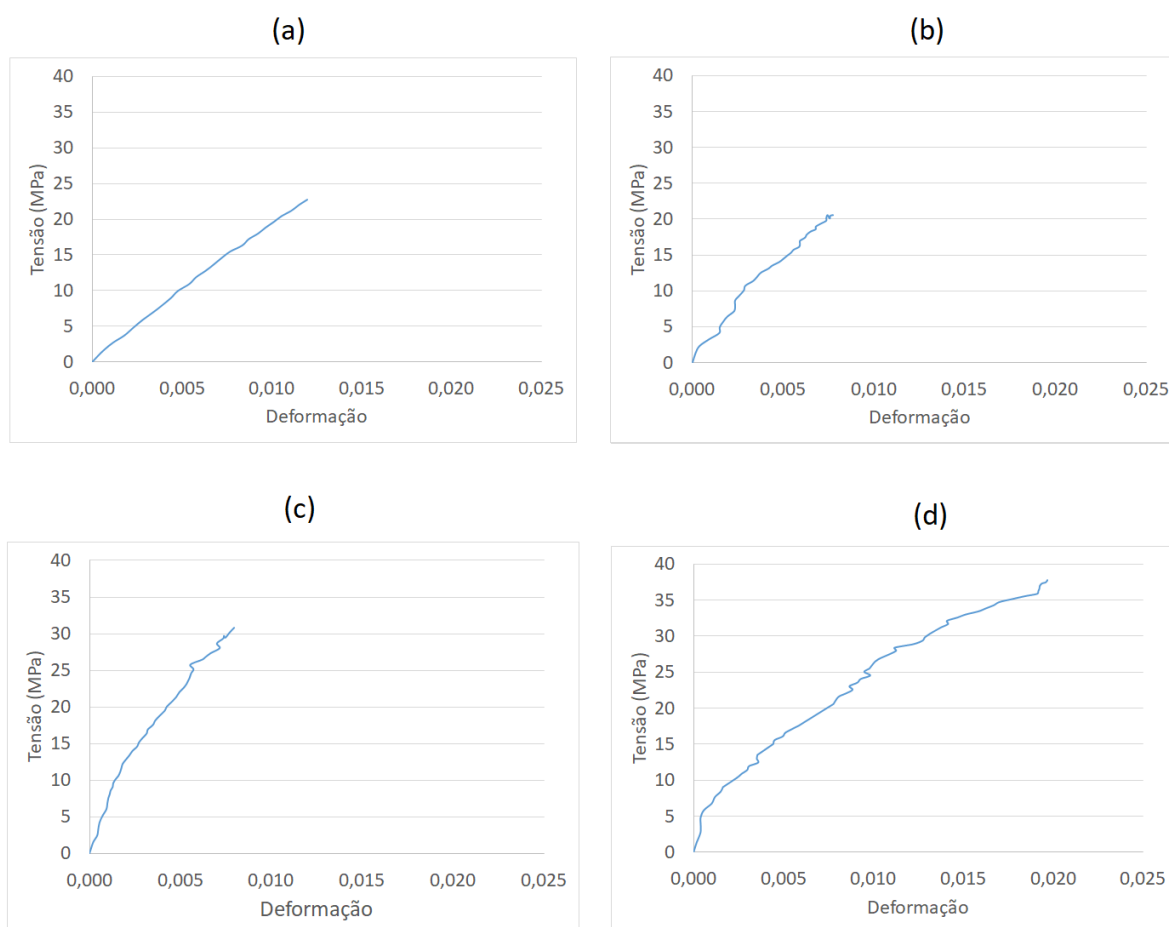


Fonte: autoria própria, 2017.

Observa-se que o comportamento foi semelhante entre os compósitos mesmo variando as frações volumétricas do reforço, o que já foi discutido nos tópicos anteriores.

Na Figura 53 estão ilustradas as curvas típicas de tensão versus deformação de cada ensaio. As curvas são mostradas para cada fração de volume de fibras de sisal (0%, 10%, 20% e 30%). O aspecto comum é que todas as curvas dos compósitos apresentaram comportamento elástico até a ruptura. A queda abrupta no final desta região linear indica que os compósitos orientados de fibras de sisal nas concentrações analisadas são materiais frágeis.

Figura 53: Curvas de tração-deformação para os compósitos [90 0 0 90] com: (a) 0%; (b) 10%; (c) 20%; (d) 30% de volume de fibras.



Fonte: autoria própria, 2017.

A partir das curvas acima, obteve-se a tensão máxima, a deformação e o módulo de elasticidade desses compósitos. A Tabela 21 apresenta os valores médios para essas propriedades para diferentes volumes de fibras de sisal.

Tabela 21 - Propriedades mecânicas de tração dos compósitos com diferentes volumes de fibras de sisal.

Volume de fibras de sisal (%)	Tensão máxima (MPa)	Deformação	Módulo de Elasticidade (MPa)	MET
0	25,37 ± 1,41	0,013 ± 0,001	1882,24 ± 87,55	-
10	20,35 ± 2,64	0,007 ± 0,002	2224,59 ± 98,68	2054,24
20	29,07 ± 5,87	0,009 ± 0,003	3173,79 ± 397,15	2233,26
30	40,74 ± 3,69	0,016 ± 0,002	3151,44 ± 220,06	2420,45

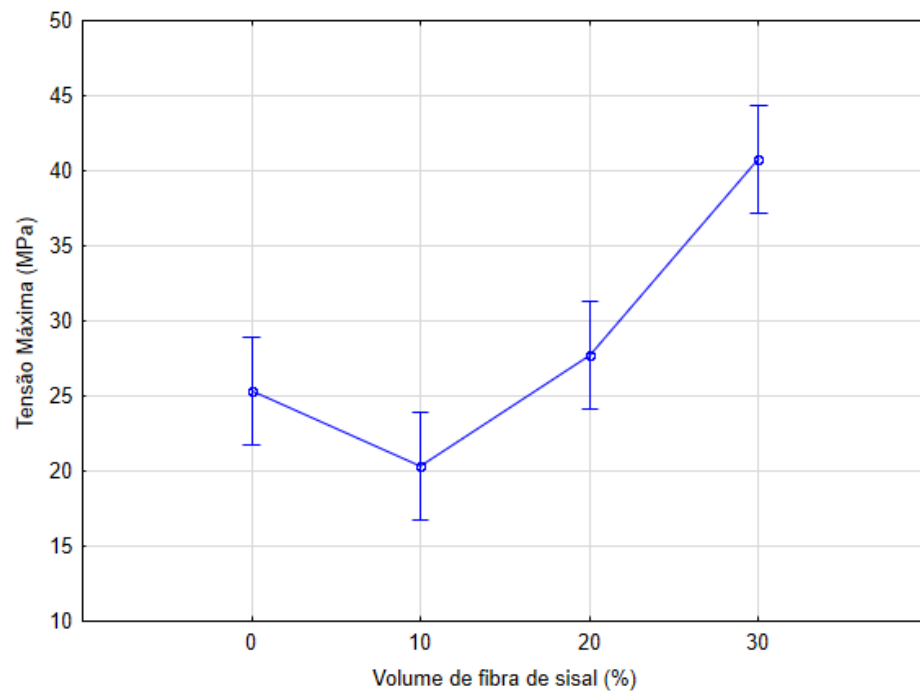
MET – Módulo de Elasticidade Teórico

Fonte: autoria própria, 2017.

Os módulos de elasticidade teóricos para os compósitos orientados foram obtidos através das equações do tópico 3.3.2. Observa-se que as equações conseguiram descrever na mesma grandeza os valores dos módulos de elasticidade teórico com os obtidos nos ensaios.

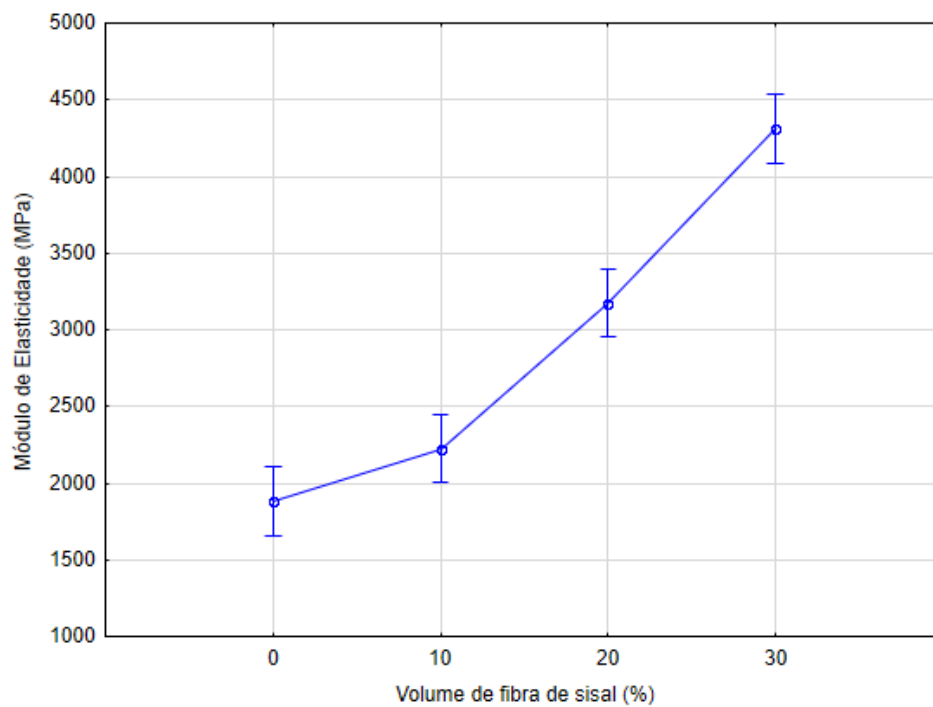
O comportamento desses resultados foi analisado estatisticamente, como mostram as Figuras 54 e 55, as quais apresentam os gráficos de tensão máxima e módulo de elasticidade em função da fração volumétrica da fibra.

Figura 54: Gráfico da variação da tensão máxima dos compósitos [0 90 90 0] em função da variação concentração de volume da fibra de sisal



Fonte: autoria própria, 2017.

Figura 55: Gráfico da variação do módulo de elasticidade dos compósitos [0 90 90 0] em função da variação concentração de volume da fibra de sisal



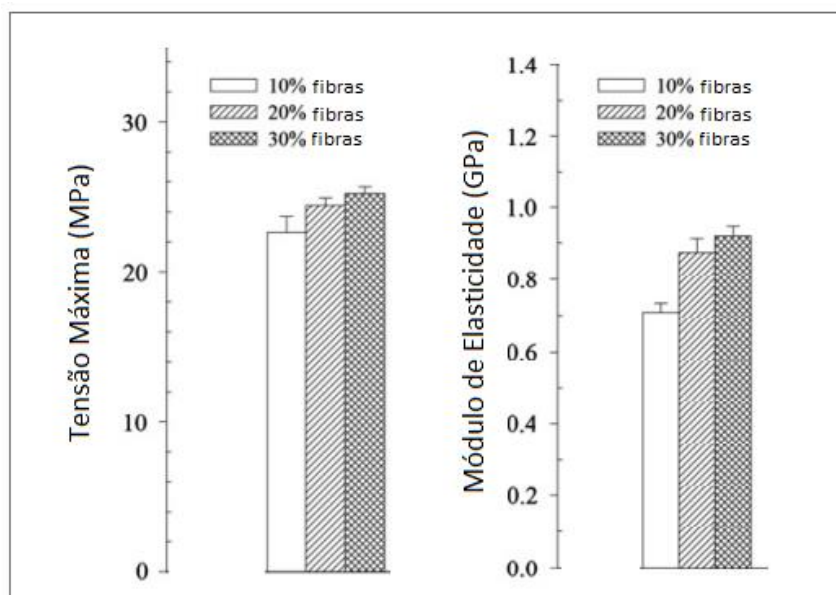
Fonte: autoria própria, 2017.

Nota-se, nas figuras, que, entre os compósitos, a resistência à tração e a rigidez aumentam com a incorporação de fibra de sisal. Em relação à matriz, os compósitos possuem resistência estatisticamente igual a carregamentos de até 20% em volume de fibras. Porém, um máximo das propriedades foi obtido a um carregamento de 30%.

Estes resultados indicam que a utilização de fibras de sisal nos compósitos aumenta suas propriedades mecânicas e que com 30% de volume em compósitos de resina poliéster proporciona um efetivo reforço na resistência à tração destes materiais em relação a resina pura. Sendo, portanto, esse compósito com as melhores propriedades para serem utilizados em aplicações.

Kaewkuky et al. (2013) obteve resultados análogos com os compósitos de polipropileno com fibras de sisal alinhadas ao esforço. Ele variou as concentrações em 10%, 20% e 30% de volume de sisal e as propriedades mecânicas de tensão e módulo de elasticidade aumentaram conforme as concentrações foram incrementadas nos compósitos, como mostra a Figura 56.

Figura 56: Resultados de tensão máxima e módulo de elasticidade em função da concentração de fibras de sisal.



Fonte: adaptado de Kaewkuky et al. (2013)

6. CONCLUSÕES

- O molde utilizado para fabricação dos compósitos e o método de laminação manual são adequados e eficientes às condições sociais e humanas disponíveis nas regiões produtoras de sisal;
- A resina poliéster insaturado utilizada como matriz apresenta propriedades mecânicas compatíveis com os dados encontrados na literatura;
- O tratamento alcalino influencia as propriedades de tração das fibras de sisal e dos compósitos;
- O aumento da concentração de NaOH no tratamento alcalino aumenta a perda de massa e a densidade, e diminui o diâmetro médio das fibras de sisal;
- O tratamento alcalino aumenta a resistência à tração e o módulo de elasticidade das fibras de sisal, sendo o tratamento mais eficiente de 5% de NaOH;
- A incorporação da fibra de sisal na matriz poliéster insaturado eleva a sua resistência, sendo um reforço eficiente;
- Os ensaios de tração nos compósitos com fibras tratadas e sem tratamento, mostram que o tratamento alcalino com 5% de NaOH influencia no aumento da resistência e rigidez do compósito;
- As propriedades dos compósitos são fortemente influenciadas pela orientação do reforço;
- Os compósitos reforçados com fibras unidirecionais e testados longitudinalmente apresentam propriedades de tração e flexão excelentes, enquanto que os compósitos testados transversalmente apresentam propriedades inferiores;
- Para os compósitos simétricos orientados, as propriedades de tração não modificam com as configurações testadas, [0 90 90 0] e [90 0 0 90]. Porém as propriedades de flexão são melhores para os compósitos [0 90 90 0];
- As propriedades dos compósitos orientados são influenciadas pela concentração de fibra de sisal;
- A resistência à tração e a rigidez aumentam com a incorporação de fibra de sisal na matriz, sendo o máximo das propriedades obtidos com o compósito confeccionado com 30% de volume de sisal;

- A micromecânica e a macromecânica dos compósitos unidirecionais pode ser aplicada com limitações aos resultados obtidos, pois colabora na compreensão destes, mas não estima os valores de forma precisa;
- A técnica da correlação digital de imagens se apresentou de forma eficiente na obtenção dos resultados para os ensaios de tração, permitindo a obtenção dos campos de deslocamento e deformação em todo o corpo de prova, além de não entrar em contato com o mesmo, evitando interferência nos resultados;

Conclui-se que, após o estudo teórico e experimental, que a fabricação dos compósitos é viável, correspondendo aos fins propostos, e aquele que possui o melhor conjunto de propriedades para ser utilizado em aplicações que exigem resistência biaxial é o compósito orientado $[0\ 90\ 90\ 0]$ com 30% de volume de fibra de sisal.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilizar e estudar o compósito confeccionado em aplicação comercial, como caixas d'águas, em forma de substituir a fibra de vidro utilizada, através de simulação computacional;
- Realizar análise microscópica das fibras e dos compósitos, a fim de estudar de forma mais detalhada a influência do tratamento químico e a forma como a fibra interage com a matriz;
- Realizar análise da fratura dos compósitos;
- Avaliar as propriedades térmicas dos compósitos, através de ensaios de DMA;
- Avaliar as propriedades dos compósitos com os ensaios de compressão e cisalhamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMICO, S.C., MOCHNACZ S., SYDENSTRICKER T.H.D – “Tratamento melhora propriedades de fibras de sisal para uso em compósitos”. Revista plástico industrial, São Paulo, p. 72-80, 2004.

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

ASTM D3379/75, **Standard Test Method for Tensile Strength and Young’s Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 1975.

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

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 D-792/13, **Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement**, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

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

BLEDZKI, A.K.; GASSAN, J. (1999) Composites reinforced with cellulose-based fibres. Prog. Polym. Sci, v. 24, p. 221-274.

BOGOEVA, G. G.; AVELLA, M.; MALINCONICO, M., BUZAROVSKA, A.; GROZDANOV, A.; GENTILE, G. Natural fiber eco-composites. **Polymer Composites**, v. 28, 98–107, 2007.

CALDAS, B. G. S. **Estrutura sanduíche de matriz poliéster reforçado com tecido de sisal conformado por infusão a vácuo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

CALLISTER JR., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CERCHIARO, J. R. **Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual**. 2010. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2010.

DANIEL, I. M., ISHAI, O. **Engineering Mechanics of Composite Material**. New York: Oxford University Press, 1994.

DEMAR. Departamento de Engenharia de Materiais. EEL – Escola de Engenharia de Lorena. USP – Universidade de São Paulo. 2009. Disponível em: www.demar.eel.usp.br/Notas-aula/compositos. Acesso em: 04 jul. 2017.

DOTAN, A. L. *et al.* Efeito do tratamento químico de fibras de juta na interface fibra-matriz em conjugados juta-poliéster, analisando-se a extração das fibras da matriz (pull-out). In: **Congresso de engenharia mecânica**, 8., Recife, 1989.

FENGEL, D.; WEGENER, G. **Wood: chemistry, ultrastructure, reactions**. Walter de Gruyter, USA, p. 66-100, 1989.

FERNANDES, M. E.; MANO, J. F.; REIS, R.L. Hybrid cork–polymer composites containing sisal fibre: Morphology, effect of the fibre treatment on the mechanical properties and tensile failure prediction. **Composite Structures**, v.105, p. 153-162, 2013.

FERREIRA, G. F. O. **Estruturas de material compósito sob carregamento de tração e impacto: avaliação de um modelo de material**. 2014. 125f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Carlos, São Carlos, 2014.

FERREIRA, S. R.; SILVA, F. A.; LIMA, P. R. L.; FILHO, R. D. T. Effect of fiber treatments on the sisal fiber properties and fiber–matrix bond in cement based systems. **Construction and Building Materials**, v. 101, p. 730-740, 2015.

FILHO, N. M. Uma introdução a placas laminadas constituídas de materiais compostos em fibras longas. **Semina: Ci. Exatas/Tecnol**, v. 21, n. 4, p. 95-108, 2000.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GONÇALVES, S. M. L. **Utilização de resíduos agronômicos da mandioca para fabricação de papéis especiais como recurso alternativo para a comunicação visual**. 2007. 130f. Tese (Doutorado em agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Unesp, Botucatu, São Paulo, 2007.

GOWDA, T. M.; NAIDU, A. C. B.; CHHAYA, R. Some Mechanical properties of Untreated Jute Fabric-Reinforced Polyester Composites, **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, v. 30, p. 277-248, 1999.

HARISH, S.; MICHAEL, D. P.; BENSELY, A.; LAL, D. M.; RAJADURAI, A. Mechanical property evaluation of natural fiber coir composite. **Materials Characterization**, v. 60, n. 1, p. 44–49, 2009.

HIBBELER, Russell Charles. **Resistência dos materiais**. 7ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 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: <www.priv.lmt.ens-cachan.fr/PDFs/HILD.2008.7.pdf> Acesso em: 06 jul. 2017.

HOLANDA, E. B. N. **Morfologia e propriedades mecânicas da fibra de sisal unidirecional e em sobreposição de compósito com resina epóxi**. 2013. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

ISHIZAKI, M. H.; VISCONTE, L. L. Y.; FURTADO, C. R. G.; LEITE, M. C. A. M.; LEBLANC, J. L. Caracterização mecânica e morfológica de compósitos de polipropileno e fibras de coco verde: influência do teor de fibra e das condições de mistura. **Polímeros**, v. 16, n. 3, p. 182–186, 2006.

ISMAIL, H.; SHUHELMY, S.; EDYHAM, M. R. The effects of a silane coupling agent on curing characteristics and mechanical properties of bamboo fibre filled natural rubber composites. **European Polymer Journal**, v. 38, n. 1, p. 39-47, 2002.

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.

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.; MEDEIROS, S. E.; CARVALHO, L. H.; Compósitos de matriz poliéster reforçados por fibras curtas de sisal. **Polímeros**, v. 9, n. 4, p. 136-141, 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.

JUNIOR, E. B. **Utilização de método de correlação digital de imagens na caracterização de materiais metálicos e poliméricos**. 2008. 108 f. Dissertação de Mestrado. Programas de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2008.

JUNIOR, H. L. O. **Caracterização mecânica e dinamo-mecânica de compósitos híbridos vidro/sisal moldados por RTM**. 2009. 66 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

KABIR, M. M., WANG, H., LAU, K.T. et al., Chemical Treatments on Plant-Based Natural Fibre Reinforced Polymers Composites: An Overview. **Composites: Part B**, v.43, p. 2883 – 2892, 2012.

KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. 2ª ed. New York: Taylor & Francis Group, 2006.

KAWEKUK, S.; SUTAPUN, W.; JARUKUMJORN, K. Effects of interfacial modification and fiber content on physical properties of sisal fiber/polypropylene composites. **Composites: Part B**, v. 45, p. 544-549, 2013.

MALLICK, P. K. **Fiber Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design**. 3ª ed. New York: Taylor & Francis Group, 2007.

MARINUCCI, G. **Materiais compósitos poliméricos**. 1ª ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2011.

MATTOSO, L. H. C.; FERREIRA, F. C.; CURVELO, A. A. S. Sisal fiber: morphology and applications in Polymer composites. In: International Symposium on lignocellulosic -plastics composite, São Paulo. p. 241-266, 1996.

MAURYA, H. O; GUPTA, M. K.; SRIVASTAVA, R. K.; SINGH, H. Study on the Mechanical Properties of Epoxy Composite using Short Sisal Fibre. **Materials Today: Proceedings**. v. 2, p. 1347-1355, 2015.

MEDEIROS, M. A. R. **Propriedades mecânicas de compósitos de PVC reciclado reforçados com fibras de sisal e de nylon 6**. 2006. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2006.

MEGIATTO, J. D.; SILVA, C. G.; RAMIRES, E. C.; FROLLINI, E. Thermoset matrix reinforced with sisal fibers: Effect of the cure cycle on the properties of the biobased composite. **Polymer Testing**, v. 28, n. 8, p. 793–800, 2009.

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.

NETO, J. A. M. **Obtenção, caracterização e utilização de um compósito com matriz de resina poliéster e carga de fibras de sisal**. 2016. 100f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2016.

NÓBREGA, M. M. S. **Compósitos de matriz poliéster com fibras de caroá neoglaziovia variegata: caracterização mecânica e sorção de água**. 2007. 123f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.

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.

PRAVEEN, K. M.; THOMAS, S.; GROHENS, Y.; et al. Investigations of Plasma Induced Effects on the Surface Properties of Lignocellulosic Natural Coir Fibres. **Applied Surface Science**, v. 368, p. 146–156, 2016.

RAY, D.; SARKAR, B. K.; BOSE, N. R. Impact fatigue behaviour of vinylster resin matrix composites reinforced with alcali treated jute fibres. **Composites**, Amsterdam, pt. A, v.33, n.2, p.233-241, 2002.

REDDY, J. N. **Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis**. 2ª ed. CRC Press LLC, 2004.

REIS, E. G. **Compósitos de fibras de taquara e matriz de poliéster e epóxi**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Centro de Ciências Tecnológicas. Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Santa Catarina, 2013.

RODRIGUES, L. P. S. **Efeito do envelhecimento ambiental acelerado em compósitos poliméricos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2007.

RONG, M. Z.; ZHANG, M. Q.; LIU, Y.; YANG, G. C.; ZENG, H. M. The effect of fibre treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. **Composites Science and technology**, v. 61, p.1437-1447, 2001.

SAHEB, D. N.; JOB, J. P. Natural Fiber Polymer Composites: A Review. *Advances in Polymer Technology*. John Wiley & Sons, v.18, n.4, p. 351-363, 1999.

SANCHEZ, E. M. S.; CAVANI, C. S.; LEAL, C. V.; SANCHEZ, C. G. Compósito de Resina de poliéster insaturado com bagaço de cana-de-açúcar: influência do tratamento das fibras nas propriedades. **Polímeros**, v. 20. 2010.

SANTOS, A. M. **Estudo de compósitos híbridos polipropileno/fibras de vidro e coco para aplicação em engenharia**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade do Rio Grande do Norte. Natal-RN, 2006.

SATYANARAYANA, I. G.; SUKUMARAN, A. G.; KULKARNI, S.G.K.; ROHATG, P.I. E. Fabrication and properties of natural fibre-reinforced polyester composites. **Composites**, v. 17, 1986.

SEGATELLI, M. G.; SILVA, C. A.; YOSHIDA, I. V. P.; GONÇALVES, M. C. Compósitos de polipropileno e fibras curtas de sílica. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 33, n. 1, p. 95-102, 2012.

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

SILVA, O. R. R. F.; BELTRAO, N. E. M. **O agrônomo do sisal no Brasil**. Brasília: EMBRAPA-SPI; Campina Grande, 1999.

SILVA, R. V. **Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 139f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

SREEKUMAR, P. A.; THOMAS, S. P.; THOMAS, B.; SAITER, J. M.; JOSEPH, K.; UNNIKRISHNAN, G.; Thomas, S. Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester composites fabricated by resin transfer molding. **Composites: Part Applied Science and Manufacturing**, v. 40, p. 1777–1784, 2011.

THOMAS, N. I. R. **Influência de tratamentos superficiais em fibras de licuri na aderência interfacial do compósito com matriz poliéster**. 2011. 234f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

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.