



**Universidade Federal da Bahia - UFBA
Escola Politécnica
Mestrado Engenharia Ambiental Urbana**

JORGE RUBEN CERCHIARO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS COM
POLIÉSTER E TECIDOS DE SISAL POR MOLDAGEM MANUAL**

Dissertação de Mestrado

**Salvador
2010**

JORGE RUBEN CERCHIARO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS COM
POLIÉSTER E TECIDOS DE SISAL POR MOLDAGEM MANUAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental Urbana, Stricto-sensu, nível mestrado, da Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, como requisito para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho
Co-orientador: Prof. Dr. João Augusto de Lima Rocha

Salvador
2010

C412 Cerchiaro, Jorge Ruben

Comportamento mecânico de compósitos com poliéster e tecidos de sisal por moldagem manual / Jorge Ruben Cerchiaro – Salvador, 2010.

70 f : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho

Co-orientador: Prof. Dr. João Augusto de Lima Rocha

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2010.

1.Fibras de sisal. 2.Compósitos. 3. Moldagem manual. I. Carvalho, Ricardo Fernandez. II.Rocha,João Augusto de Lima III.Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD:693

TERMO DE APROVAÇÃO

JORGE RUBEN CERCHIARO


COMPORTAMENTO MECÂNICO DE COMPÓSITOS POLIÉSTER E TECIDOS DE SISAL POR MOLDAGEM MANUAL

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

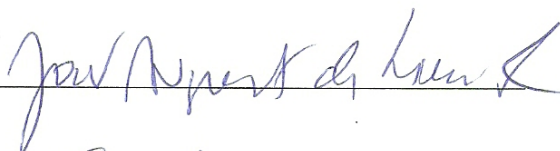
Salvador, 06 de dezembro de 2010

Banca Examinadora:

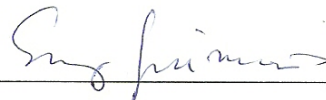
Prof. Dr. Ricardo Fernandes Carvalho
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Prof. Dr. João Augusto Lima Rocha
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Profa. MsC. Suely da Silva Guimarães
Universidade Estadual da Bahia – UNEB



Prof. Dr. Carlito Calil Júnior
Universidade de São Paulo - USP



AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Ricardo Fernandes Carvalho, pela orientação, apoio e paciência , imprescindíveis.

Ao CNPq pela bolsa de pesquisa concedida.

À Elekeiroz S.A. pela doação dos polímeros.

Ao CAPES pelo apoio financeiro através do PROCAD.

À APAEB pela doação das fibras de sisal.

À Jaciele Santos Santana Freitas, colaboradora dedicada.

À Natalice, companheira e mentora de brilhantes idéias para esta dissertação.

Aquí podemos, hermano Sancho, meter las
manos hasta los codos en eso que llaman de
aventuras...

Don Quijote de la Mancha

PUBLICAÇÕES

AGRELA Sara P.; CERCHIARO Jorge Ruben; CARVALHO Ricardo Fernandes;;
JOSÉ N.M. **Caracterización de Residuos del Cepillado de Piassava (*Attalea funífera*
Mart) y Avaluación del Potencial para Asociación con Polietileno de Alta Densidad.**
AEMAC ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE MATERIALES COMPUESTOS, 2009, San
Sebastián, VIII Congreso de Materiales Compuestos, p. 1049-1052

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar a viabilidade da substituição de fibras de vidro por fibras de sisal, em compósitos com resinas poliéster termofixas, na produção por moldagem manual. Se propôs, também, determinar o comportamento mecânico, aspectos tecnológicos de produção e os custos diretos dos compósitos de poliéster e fibra de sisal em comparação com os compósitos com fibras de vidro. A pesquisa, ao usar fibras vegetais, neste caso o sisal, objetivando agregar valor à produção das fibras, contribui não só para que as comunidades rurais do semi-árido nordestino do Brasil pudessem absorver tal tecnologia e aproveitar a mão de obra local, mas, também, para a busca do desenvolvimento sustentável. A matriz utilizada foi a resina poliéster ortoftálica. Como reforços foram utilizadas fibras de sisal sem nenhum prévio tratamento térmico ou químico. Com elas foi desenvolvido um tecido adaptado à produção por moldagem manual. O método de laminação por moldagem manual é adequado às condições sociais e humanas disponíveis nas regiões produtoras de sisal por utilizar maquinário relativamente barato e simples, e envolver uma mão de obra de baixa qualificação profissional. Nos ensaios realizados, apresenta valores necessários para projetar, pelas equações da teoria da elasticidade, peças ou objetos com o compósito aqui desenvolvido. Os principais resultados da pesquisa foram: a) um tecido unidirecional onde as fibras permaneceram retas em todo o comprimento da trama obtendo assim melhor aproveitamento das propriedades mecânicas; b) a igualdade de volume, um compósito com fibra de sisal 55% mais barato que o elaborado com fibra de vidro possibilitando a fabricação de peças onde o custo das mesmas é mais importante que a resistência mecânica; b) em estruturas submetidas preferencialmente a solicitações de flexão resultantes de cargas distribuídas, o compósito com fibras de sisal apresentou maior economia do ponto de vista da rigidez.

Palavras chave: Compósito; Resina Termorrígida; Fibra de Sisal; Tecidos; Fibra de vidro

ABSTRACT

The main objective of this present work was to analyze the feasibility of replacing fiberglass with sisal fibers in composites with thermosetting polyester resins produced by hand-lay up. The mechanical behavior, technological aspects of production and the direct costs of the polyester and sisal fiber composites in comparison with glass fibers were also determined. This research aimed at adding value to fiber production by using vegetable fibers, in this case sisal, which in turn could allow for the rural communities from Brazil's northeastern semi-arid regions to benefit from the technology assimilation using the local workforce. It also contributes in the pursuit for sustainable development. Orthophthalic polyester resin was used as the matrix and sisal fibers with no prior chemical or heat treatment were used as reinforcements. These fibers were used to develop a fabric adapted for hand-lay up production. This hand-lay up lamination method is appropriate for the social and human conditions available in the sisal producing areas as it uses relatively inexpensive and simple machinery involving a low professionally qualified workforce. The tests performed provided the values required in order to design components or objects with the composite developed in this work, by using the elasticity theory equations. The main results from this research were obtained from: a) a unidirectional fabric, where fibers remained straight throughout the length of the frame, thereby maximizing the mechanical properties; b) equal volume fabric, resulting in sisal fiber composites 55% cheaper than the prepared fiberglass composites, therefore enabling the manufacture of parts where cost is more important than mechanical strength; c) in structures subjected predominantly to flexural stresses arising from distributed bending loads, presenting the largest economy in terms of stiffness.

Keywords: Composites, Thermosetting resin, Sisal Fiber, Fabrics, Fiberglass

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Semi-árido.	19
Figura 2	Aspecto dos compósitos com fibras orientadas	28
Figura 3	Microfotografia de microscopia eletrônica de varredura (MEV)do sisal	37
Figura 4	Tecido tramado	39
Figura 5	Esquema arranjo tecidos	39
Figura 6	Imagem microscópica de um compósito laminado	41
Figura 7	Fibras de sisal doadas pela APAEB	46
Figura 8	Tear de pregos	47
Figura 9	Tear de pente liso	48
Figura 10	Tecidos	48
Figura 11	Tecido sendo elaborado no tear de pente liso	50
Figura 12	Suporte usado para ensaiar as fibras	53
Figura 13	Corpo de prova antes do ensaio de tração	53
Figura 14	Formato para corpo de prova de tecidos	54
Figura 15	Imagem do Corpo de Prova	55
Figura 16	Ensaio de tração em fibras de sisal	58
Figura 17	Ensaio de tração em tecidos de sisal	60
Figura 18	Corpo de prova de ensaio de tecido de sisal	61
Figura 19	Corpos de prova em poliéster	61
Figura 20	Ensaio de tração em compósito [0,0]	62
Figura 21	Corpos de prova de compósitos com fibra de sisal após ensaios tração	63
Figura 22	Ensaio de tração em compósito [90,90]	64
Figura 23	Corpos de prova dos ensaios de tração em compósito [90,90]	65
Figura 24	Ensaio de tração em compósito [0,90]	66
Figura 25	Corpos de prova com tecidos dispostos [0,90]	67
Figura 26	Ensaio de tração fibra de vidro	67
Figura 27	Corpos de prova em fibra de vidro ensaiados à tração	69
Figura 28	Corpo de prova de ensaio de arrancamento (<i>pull out</i>)	70
Figura 29	Ensaio de arrancamento (<i>pull-out</i>) em fibras de sisal e resina poliéster	70
Figura 30	Ensaio de flexão em compósito [0,0]	74

Figura 31	Ensaio de flexão em compósito [0,90]	76
Figura 32	Curvas do ensaio de flexão com fibra de vidro [0,0]	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Efeito da orientação das fibras nas propriedades de compósitos	29
Tabela 2	Influencia do comprimento das fibras no ensaio à tração	30
Tabela 3	Propriedades mecânicas do poliéster	34
Tabela 4	Composição química do sisal	36
Tabela 5	Propriedades mecânicas do sisal	37
Tabela 6	Resumo propriedades do sisal em pesquisas anteriores	38
Tabela 7	Características da resina UCEFLEX UC 2090	45
Tabela 8	Resultados do ensaio de tração com fibras de sisal	59
Tabela 9	Resultados do ensaio de tração com tecido de sisal	60
Tabela 10	Ensaio de tração com poliéster	62
Tabela 11	Resultados do ensaio de tração com tecidos dispostos [0,0]	63
Tabela 12	Resultados do ensaio de tração com tecidos dispostos [90,90]	64
Tabela 13	Resultados do ensaio de tração com tecidos dispostos [0,90]	66
Tabela 14	Resultados do ensaio de tração do compósito em fibra de vidro.	68
Tabela 15	Comparação do desempenho dos compósitos	68
Tabela 16	Resultados do ensaio <i>pull-out</i> em fibras de sisal e resina poliéster	71
Tabela 17	Resultados do ensaio de flexão com tecidos dispostos [0,0]	75
Tabela 18	Resultados do ensaio de flexão com tecidos dispostos [90,90]	75
Tabela 19	Resultados do ensaio de flexão com tecidos dispostos [0,90]	76
Tabela 20	Resultados do ensaio de tração do compósito em fibra de vidro [0,0]	78
Tabela 21	Comparação do desempenho dos compósitos à flexão	78

ABREVIATURA E SIGLAS

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento

CEPED - Centro de Pesquisas e Desenvolvimento

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ECOLMEIA Ecologia Meio Ambiente e Reciclagem

RTM - *Resin Transfer Molding*

SRIM - *Structural Reaction Injection Moldin*

PEEK - poli-éter-éter-cetona.

MEKP - peróxido de metil etil cetona

APAEB - Associação de Desenvolvimento Sustentável e Solidário da Região Sisaleira

UFBA - Universidade Federal da Bahia

USP - Universidade de São Paulo

UNEB - Universidade do Estado da Bahia

SÍMBOLOS

E : fração volumétrica

Φ : fração volumétrica

η_1 : coeficiente da orientação das fibras

η_2 : coeficiente dos comprimentos das fibras

T : massa específica teórica

R : peso da resina [%]

D : massa específica da resina

r : peso do reforço no compósito [%]

d : massa específica do reforço

V : conteúdo de vazios [%]

T_d : massa específica teórica do compósito

M_d : massa específica medida do compósito

m_A : pignómetro vazio

m_B : pignómetro + compósito

m_C : pignómetro + compósito + 1/3 da água total do picnómetro

m_D : pignómetro + água

V_a : o volume de 1/3 da água total do picnómetro

V_b : volume do compósito

V_c : e finalmente a massa específica do compósito

ρ_c : por medio das equações

F_t : sessão média da fibra

m_f : massa da fibra

ρ_r : a massa específica do sisal

L : comprimento da fibra

C_{Mi} = custo de cada material do compósito

% em peso : composição do material por massa dentro do laminado

P_i : Preço de cada material tendo como base seu valor atual em Salvador-BA

ρ : massa específica do compósito [Kg/m^3]

t : espessura do laminado (unitária)

A : área do laminado (unitária)

μ_i : eficiência do compósito

E_f : modulo de elasticidade à flexão

Custo : custo do compósito por unidade de volume

v : fator de conveniência

μ_f : eficiência do compósito com fibra de vidro

μ_s : eficiência do compósito com fibra de sisal

Índices

c : fase compósito

m : fase matriz

f : fase fibra

SUMARIO

1.	INTRODUÇÃO	18
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Gerais	22
1.1.2	Específicos	22
1.2	FINALIDADE DA PESQUISA	22
1.3	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	COMPÓSITOS	24
2.2	POLÍMEROS	32
2.3	FIBRAS VEGETAIS	35
2.3.1	Fibra de sisal	36
2.3.2	Tecidos	38
2.4	LAMINAÇÃO MANUAL	40
2.4.1	Vazios	40
2.5	CUSTOS DO COMPOSITO EM ESTUDO	42
2.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	44
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	MATERIAIS	45
3.1.1	Poliéster	45
3.1.2	Fibras de sisal	45
3.2	MÉTODOS	46
3.2.1	Desenvolvimento dos tecidos	46
3.2.2	Laminado do compósito	50
3.2.3	Microscopia óptica	51
3.2.4	Massa específica por picnometria em água	52
3.2.5	Tração com fibras de sisal	52
3.2.6	Tração em compósito	54
3.2.7	Flexão em compósito	55
3.3	CUSTO DOS COMPÓSITOS	55

4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	TRAÇÃO EM FIBRAS	58
4.2	TRAÇÃO EM TECIDOS	59
4.3	TRAÇÃO EM POLIÉSTER	61
4.4	TRAÇÃO EM COMPÓSITOS	62
4.4.1	Tração em compósito com tecidos dispostos [0,0]	62
4.4.2	Tração em compósito com tecidos dispostos [90,90]	64
4.4.3	Tração em compósito com tecidos dispostos [0,90]	65
4.4.4	Tração em fibra de vidro [00]	67
4.5	ENSAIOS DE ARRANCAMENTO (<i>PULL-OUT</i>)	69
4.6	DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VAZIOS DO COMPÓSITO	71
4.7	ENSAIOS DE FLEXÃO EM COMPÓSITOS	72
4.7.1	Flexão em compósitos com tecidos dispostos [0,0]	73
4.7.2	Flexão em compósitos com tecidos dispostos [90,90]	75
4.7.3	Flexão em compósitos com tecidos dispostos [0,90]	76
4.7.4	Flexão em compósitos de fibra de vidro	77
4.8	CUSTOS DOS COMPÓSITOS	78
5.	CONCLUSÕES	81
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	82
6.	BIBLIOGRAFIA	83

1. INTRODUÇÃO

A presente pesquisa tem por finalidade desenvolver um material composto com uma matriz poliéster e fibras de sisal (*agave sisalana*) em substituição a fibras de vidro em micro e pequenas empresas de fibra de vidro (*fiberglass*).

Na fabricação da fibra de vidro as principais matérias primas utilizadas são a resina poliéster e as fibras de vidro.

As fibras de vidro vêm sendo utilizadas desde a década dos anos sessenta. São fibras inorgânicas, de boa resistência mecânica (três vezes menor que o aço) e já longamente testadas.

Pequenas empresas de Fibra de Vidro (*fiberglass*) têm um baixo investimento inicial e utilizam mão de obra de baixa qualificação profissional. Os produtos que elas fabricam são caixas d'água, canaletas e rufos e pias de cozinha. Já indústrias medianas fabricam piscinas e barcos.

A tecnologia de produção adotada pela maioria destas fábricas é a de moldagem manual (*hand-lay up*). Este método utiliza moldes abertos fabricados com o mesmo compósito utilizado para fabricar os objetos, o que reduz significativamente o investimento inicial se comparado com moldes metálicos necessários utilizados em outras tecnologias. A mão de obra envolvida na fabricação pode ser de baixa qualificação profissional, ocupando tipicamente operários com educação fundamental.

As fibras de origem vegetal (fitogêneas) são produzidas em praticamente todos os países e usualmente são designadas por materiais lignocelulósicos. No Brasil, existe uma grande variedade de fibras vegetais com diferentes propriedades químicas, físicas e mecânicas. Além disso, o Brasil é um dos países que possuem a maior biomassa do mundo e também a maior extensão territorial cultivável, potenciais estes que devem ser melhor explorados. O estado da Bahia é o maior produtor de sisal do Brasil. É produzido na região conhecida como semi-árido (Figura 1).

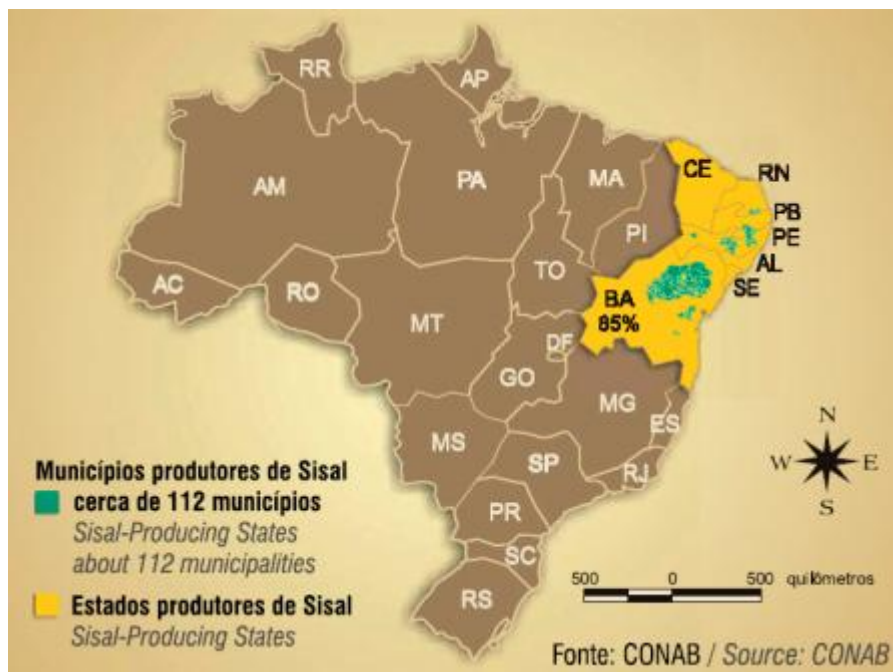


Figura 1: Região do Semi-árido. Fonte: SINDIFIBRAS/CONAB

O sisal, em décadas passadas, era quase que exclusivamente utilizado na fabricação de cordas. No entanto, a competição de mercado com as fibras plásticas sintéticas (polipropileno, polietileno e nylon) induziu a diversificação das aplicações dessa fibra.

Em termos econômicos as fibras vegetais são bem mais baratas do que as fibras sintéticas e podem substituí-las em muitas aplicações onde o custo é o fator mais importante. Em relação à fibra de vidro, o preço do kg de sisal é dez vezes mais barato, considerando que a média do preço do quilograma de manta de fibras de vidro comprada nos fornecedores em Salvador-BA é de R\$11,50/kg e o sisal R\$1,04 (CONAB, 2009).

A partir de uma perspectiva social, há interesse em que a produção das fibras vegetais se valorize com a agregação de valor com aplicações de crescente teor tecnológico destinados a mercados como o da construção civil, atividade econômica em forte expansão. Uma das vantagens de se orientar o consumo dessas fibras para a indústria da construção é o grande volume de consumo desse setor econômico.

Na construção civil é crescente o uso de materiais compostos, matrizes poliméricas reforçadas com fibras. Portanto a pesquisa de compósitos com fibras naturais orientadas as aplicações compatíveis com os componentes da construção torna-se prioritária. Por outro lado, a inserção de comunidades de baixo poder aquisitivo e

com dificuldades de acesso a créditos orienta o desenvolvimento de tecnologias, com maquinário relativamente barato e simples, para que as comunidades rurais do semi-árido possam absorver tal tecnologia e aproveitar a mão de obra local.

A tecnologia proposta na presente pesquisa pode ser aproveitada por futuras Fabricas e Cooperativas no semi-árido baiano, atualmente produtoras de matéria prima com escasso valor agregado, e promover inclusão social em populações com baixo índice de desenvolvimento humano. Alguns produtos viáveis de serem fabricados com este compósito podem ser divididos em quatro grupos:

- para a indústria, tubulações, tanques, reservatórios, guaritas de vigilância, placas de sinalização e revestimentos em geral.

- para o lazer, embarcações, piscinas, escorregadeiras e moveis de jardim.

- para obras de saneamento básico, componentes de digestores anaeróbicos, vertedores, exclusas, comportas e “*stop-logs*”.

- e para a construção civil, telhas, coberturas, domos, rufos e calhas para escoamento de águas pluviais, caixas d’água e pias de cozinha.

O CEPED (Centro de Pesquisas e Desenvolvimento) iniciou em 1980 o estudo dos compósitos com fibras vegetais por meio do grupo de pesquisadores do THABA (Programa de Tecnologias de Habitação). Após avaliação das fibras disponíveis, concentrou seus trabalhos nas fibras de sisal e coco. Importantes estudos sobre a influência do teor e comprimento das fibras e dos processos de moldagem em matrizes cimentícias foram realizados.

A EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) possui vários projetos de desenvolvimento do cultivo de plantas fibrosas. O CNPA-EMBRAPA (Centro Nacional de Pesquisa de Algodão) tem em andamento o projeto “Desenvolvimento da cultura do sisal nas regiões semi-áridas do nordeste brasileiro”, onde várias condições de cultivo, assim como espécies tais como a *Agave Sisalana* e uma espécie africana (híbrido 11648), estão sendo investigadas. Pretende-se avaliar a influência das condições de cultivo e tratamento pos-cultivo (químico e/ou físico) nas propriedades das fibras, visando obtê-las de fibras que resultem em compósitos de melhor desempenho. Complementarmente a Embrapa-Instrumentação Agropecuária visa à produção de compósitos (plásticos reforçados com fibras) de um polímero termoplástico comercial

(polipropileno) com fibras de sisal, utilizando técnicas convencionais de processamento de polímeros.

Considerando-se as tendências ambientalistas globais, a utilização de fibras naturais como reforço em polímeros termoplásticos tem sido estimulada também devido ao elevado custo ambiental da produção de fibras sintéticas, que possuem maior conteúdo energético devido ao processo de fabricação, tais como vidro, carbono e Kevlar, além de considerar aspectos relacionados à biodegradação (Finkler *et al.*, 2005).

A substituição de fibras sintéticas por fibras vegetais é uma possibilidade bastante importante, pelo fato desta fibra ser de uma fonte renovável, biodegradável e de baixo custo e por provocar menor impacto ambiental.

Compósitos de polímeros com fibras naturais vêm sendo também apontados como alternativas potenciais economicamente rentáveis para a fixação de carbono na natureza, reduzindo também a emissão de CO₂ na atmosfera durante o seu ciclo de produção, processamento e utilização, ganhando assim um incremento de seu potencial econômico devido à possibilidade de comércio de créditos carbonos para a cadeia produtiva. Cada tonelada de carbono estava cotada em agosto/2006 entre \$15 e \$18 Euros (um ano antes eram \$5 Euros), valor que deve ir a \$30 ou \$40 Euros entre 2008 e 2012, quando a economia de 5,2% das emissões de carbono combinado na atmosfera (CO₂ equivalente em relação às emissões de 1990) tornar-se obrigatória, conforme estabelecido no Protocolo de Kyoto. Estima-se que compósitos de polipropileno contendo 65% de fibras de cânhamo, por exemplo, podem armazenar em média 325 kg de carbono/tonelada durante a sua vida útil. (ECOLMEIA, 2008)

O presente trabalho está orientado à contribuição para a ampliação do uso das fibras de sisal em substituição das fibras de vidro em compósitos de matriz poliéster e desenvolver a tecnologia necessária na fabricação de produtos a serem elaborados em áreas produtoras de sisal economicamente limitadas pelas condições climáticas. O método de produção a ser selecionado deve ser adequado a pequenas fábricas ou cooperativas, de baixo investimento e com tecnologias operacionais simplificadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a viabilidade da substituição de fibras de vidro por fibras de sisal em compósitos com resinas poliéster termofixas, na produção por moldagem manual.

Para este objetivo, o presente trabalho propõe avaliar o comportamento mecânico, aspectos tecnológicos de produção e os custos diretos dos compósitos de poliéster e fibra de sisal em comparação com os compósitos com fibras de vidro.

1.1.2 Específicos

- Desenvolver um tecido com fibras de sisal para reforço de um compósito com matriz poliéster termofixa.
- Selecionar método de laminação com tecidos, considerando as condições sociais e humanas disponíveis nas regiões produtoras de sisal.
- Avaliar o desempenho e o comportamento mecânico do compósito de poliéster e das fibras de sisal.
- Avaliar a adesividade entre a matriz e o reforço do compósito.
- Comparar os custos dos compósitos reforçados com fibras de sisal e fibras de vidro, considerando os desempenhos mecânicos obtidos.

1.2 Finalidade da pesquisa

O tecido com fibras de sisal a ser desenvolvido nesta pesquisa tem as seguintes premissas: uma completa aderência à matriz, um máximo aproveitamento da resistência mecânica das fibras e alto grau de flexibilidade para facilitar a fabricação dos compósitos.

As fibras de sisal utilizadas para fabricar o tecido não serão tratadas química ou termicamente. São fibras cruas, *in natura*, apenas lavadas com água após a colheita e anteriores aos tratamentos introduzidos nas etapas de produção industrial.

O método de fabricação escolhido e o de laminação manual (*hand-lay up*), porque esta tecnologia é a mais adequada para pequenas fábricas e cooperativas próximas ao centro de produção da fibra vegetal. O compósito desenvolvido é elaborado por este método substituindo apenas a fibra de vidro por fibra de sisal.

1.3 Contribuição científica

Apesar dos vários esforços de investigação do uso de fibras vegetais em compósitos poliméricos, o aproveitamento econômico na forma de produção industrial de bens tem sido limitado e não realizado pelas populações produtoras de sisal. Entre as lacunas de conhecimento que dificultam o uso das fibras vegetais existentes pode ser citada a variabilidade do material e do desempenho mecânico, poucas alternativas de arranjo das fibras que favoreça o processamento dos compósitos e a dificuldade de compatibilizar as fibras hidrofílicas com as matrizes poliméricas hidrofóbicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A literatura registra um significativo número de pesquisas sobre compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais. Assim, merecem destaque alguns importantes trabalhos sobre compósitos com materiais e métodos idênticos, ou similares aos estudados nesta pesquisa.

2.1 Compósitos

Materiais compósitos ou compósitos são materiais resultantes da combinação de dois ou mais componentes, que diferem nas propriedades físicas e químicas de cada um. A finalidade da combinação é prover características específicas para o material resultante, de acordo com cada tipo de aplicação desejada (Carvalho, 2005). No que se refere aos compósitos de fibra de vidro, os principais componentes, normalmente, são as fibras de vidro e uma resina poliéster termofixa.

Os reforços de fibra de vidro são combinados à resina num molde ou no processo de fabricação, para dar forma ao produto acabado (Owenscorning, 2009). Os principais processos de fabricação industriais de compósitos para este tipo de reforço são:

1) Pultrusão. Neste processo, após a impregnação do reforço com resina, o material é puxado através de um molde de metal aquecido que dá a forma à seção transversal. Este é um processo contínuo de fabricação de perfis lineares de seção transversal constante.

2) Moldagem por Injeção. Consiste na moldagem de um composto de termoplástico ou termofixo feito com fibra de vidro e resina é alimentado por uma rosca ou êmbolo, para dentro da cavidade do molde.

3) Moldagem por Compressão. O compósito é formado sob pressão entre moldes tipo "macho-e-fêmea".

4) Compostos Preformados (*Prepregs e Preforms*). São processos por injeção e compressão, onde vidro e a resina usualmente são combinados num composto de fibra de vidro e resina pré-misturado, pronto para ser moldado por compressão para produzir o produto final.

5) RTM (*Resin Transfer Molding*). O reforço é colocado na parte interior do molde "macho-e-fêmea". Depois que o molde é fechado, injeta-se resina sob pressão dentro da cavidade do molde.

6) SRIM (*Structural Reaction Injection Molding*). Este processo usa um sistema de resina de dois componentes, os quais são combinados e misturados juntos. Em seguida são injetados na cavidade do molde que contém o reforço. Na cavidade do molde, a resina reage rapidamente e cura-se formando a parte de compósito.

7) Laminação Contínua. O reforço é combinado com resina entre dois filmes plásticos. As lâminas tomam sua forma passando através de rolos. Este processo é usado para se fazer compósitos na forma de lâminas, como painéis corrugados ou lisos, translúcidos, opacos, para construção.

8) Enrolamento (*Filament Winding*). A fibra é impregnada por um banho de resina e puxada pela força de um mandril rotatório, o que dá parte de sua forma. Este processo é usado para a construção de produtos de forma oca, geralmente cilíndrica e de alta resistência.

9) Manual (*Hand Lay-Up*). Este processo é mais adequado para a produção de baixos e médios volumes, de peças grandes e de alta resistência. Uma combinação de reforços em rolo é colocada em um molde aberto e impregnada com resina. Quando a resina cura, a superfície do molde é reproduzida para o lado do compósito que está em contato com o molde.

10) Moldagem à Pistola (*Spray-up*). No processo à pistola, a fibra de vidro em forma de fios contínuos (*roving*) alimenta uma pistola com um picotador, que a corta em fibras de um determinado tamanho. As fibras são lançadas sobre um jato de resina e a combinação de materiais é direcionada para a cavidade do molde, onde o compósito toma sua forma. Este processo é similar ao manual (*hand lay-up*).

Nos métodos de injeção, compressão, pré-formados, RTM e SRIM a limitação está dada pela resistência do molde à pressão a que é submetido e pelo alto custo do molde se comparado ao valor das peças fabricadas. São utilizados para fabricar pequenas peças e para um alto volume de produção.

No método de laminação contínua, para compactar as lâminas são necessários rolos metálicos que devem ter a largura dos painéis, além de um trem de fabricação

equacionado ao tamanho dos painéis e ao tempo de permanência até a cura da resina. Exige um alto investimento inicial.

O método de Enrolamento (*Filament Winding*) também exige um alto investimento inicial nos mandris de diâmetros diferentes para cada tubo a ser fabricado e no mecanismo de rotação do mandril.

No método de fabricação conhecido por laminação manual (*Hand Lay-up*), é utilizado um molde aberto. O compósito é fabricado colocando sucessivamente camadas de matriz e reforço sobre um molde até conseguir a espessura desejada. Quando a matriz poliéster cura, solidificando-se, o laminado acompanha a superfície do molde que reproduz com fidelidade os detalhes de contorno da peça a ser moldada. Uma das vantagens deste método está em que podem ser fabricadas peças de grande tamanho como tanques e barcos. O molde pode ser fabricado com o material do mesmo compósito e custa três vezes o preço da peça. Se comparado com os moldes utilizados nos outros métodos descritos anteriormente, o investimento em moldes pode ser amortizado para uma pequena produção de peças. Outra vantagem é o baixo custo das ferramentas a ser utilizadas. A matriz poliéster se aplica com trinchas ou rolos de lã e roletes para compactar as camadas. As fabricas de transformação de fibra de vidro utilizam este último método de fabricação.

Paramasivan e Adbulkalam (1985) investigaram a viabilidade do desenvolvimento de compósitos poliméricos de baixo custo reforçados por fibras de sisal, pois estas fibras se prestam a vários processos de formação de compósitos como por exemplo enrolamento ou laminação. Noorunnisa Khanan *et al.* (2007) e Sabeel Ahmeda K.*et al.* (2008) estudaram compósitos poliéster e sisal usando *hand-lay up* como método de processamento.

As propriedades mecânicas dos compósitos dependem das propriedades das fibras, da matriz e também das interfaces entre fibra e matriz, sendo fatores que influenciam esse comportamento a proporção entre os materiais, a geometria e comportamento das fibras e comprimento e arranjo das fibras. As fibras podem ter uma direção preferencial ou uma distribuição aleatória dependendo se são usados tecidos ou mantas respectivamente. A resistência e a rigidez do compósito dependem, primeiramente, da quantidade, da disposição e do tipo de reforço na resina poliéster. Quanto maior a quantidade de reforço e melhor a aderência com a matriz, maior será a resistência.

Diferente das fibras sintéticas, as fibras vegetais apresentam diâmetros variáveis tanto na dimensão quanto na forma. As avaliações de comportamento das fibras vegetais que dependem da seção transversal aplicam o conceito de diâmetro equivalente, o diâmetro que corresponde à circunferência de igual área da fibra de seção irregular. O diâmetro equivalente é utilizado também para classificar o comprimento das fibras entre longas e curtas. Sendo estas últimas as que têm um comprimento inferior a cem vezes o diâmetro equivalente.

As fibras selecionadas como reforços em polímeros apresentam propriedades mecânicas superiores às matrizes. Portanto, para se obter compósitos com desempenhos mecânicos elevados procura-se inserir o máximo de fibras possível para um processo de fabricação determinado. No caso das fibras vegetais, o custo das fibras usualmente é inferior à matriz, portanto, o máximo de fibras minimiza o custo do compósito. O teor de fibras se expressa em termos de fração volumétrica.

A interface entre fibras e matriz é a região na qual estes materiais transferem as tensões e deformações uns para os outros possibilitando a contribuição de ambos para a resistência dos compósitos. portanto, as investigações de novos materiais compósitos requerem estudos e verificações de aderência entre fibra e matriz (Carvalho, 2005).

Duas expressões matemáticas foram formuladas para estimar o módulo de elasticidade a partir da fração volumétrica das fases constituintes e dos comportamentos individuais. O intervalo da estimativa do módulo de elasticidade é definido pelo limite superior representado por a equação (1) e um limite inferior, que é representado pela equação (2). Essas equações são conhecidas como Regra de Misturas.

$$E_{c(11)} = E_m \Phi_m + E_f \Phi_f \quad (1)$$

$$E_{c(22)} = (E_m E_f) / (\Phi_m E_f + \Phi_f E_m) \quad (2)$$

Nas equações (1) e (2) E e Φ representam o módulo de elasticidade e a fração volumétrica enquanto os índices c, m e f representam as fases compósito, matriz e fibra (Hull, 1995). O limite superior se aplica quando as fibras de reforço estão alinhadas com a direção das solicitações, e o inferior quando as fibras estão na direção transversal às solicitações.

A equação (3) introduz correções nos resultados observados em função da orientação das fibras e do comprimento.

$$E_c = \eta_1 \eta_2 E_f \Phi_f + E_m \Phi_m \quad (3)$$

O coeficiente η_1 depende e evidencia a influência da orientação das fibras, que varia entre 1 para as fibras orientadas e 1/6 para uma distribuição aleatória. (Agarwal e Broutman, 1990).

A influência do comprimento das fibras no desempenho mecânico (representada por η_2) pode ser observada no trabalho de Kuruvilla *et al.* (2009) que realizou estudos em compósitos com distintos comprimentos de fibras curtas fracionadas entre 5 a 75mm e observou que quanto maior é o comprimento das fibras a transferência de tensões torna-se mais eficiente, obtendo-se compósitos de elevada resistência mecânica. Os autores também investigam a ruptura dos compósitos submetidos a esforços axiais, começando pela matriz, pelo seu comportamento frágil, junto com uma parte das fibras ligadas à matriz. Seguidamente, as tensões são transferidas às fibras desprendidas da matriz (*pull-out*) produzindo grandes deslocamentos.

A definição da orientação das fibras no laminado é uma necessidade intrínseca do trabalho com compósitos.

O compósito pode ser reforçado por fibras longas que podem apresentar distribuições aleatórias, alinhadas unidirecionalmente, em duas direções ou multidirecionalmente como ilustra a Figura 3

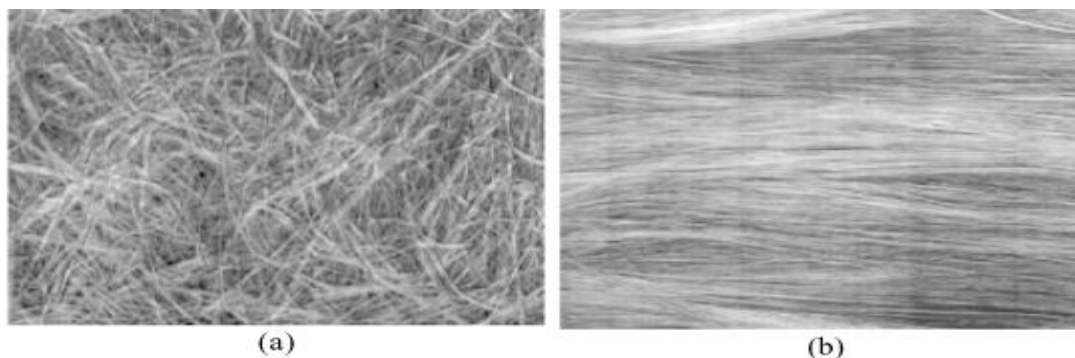


Figura 2: Aspecto dos compósitos com fibras orientadas: (a) aleatoriamente ou (b) unidirecionalmente.
Fonte: Kuruvilla; Eliton; Medeiros; Carvalho (1999)

Idicula *et al.* (2005) investigaram a resistência à tração demonstrando a influência da fração volumétrica das fibras nos compósitos. A comparação entre as

propriedades de compósitos reforçados por fibras dispostas ao acaso com a de compósitos unidirecionais reforçados por fibras longas, mantendo os teores em massa de fibras, por exemplo, em 30%, indicam que a resistência à tração dos compósitos testados longitudinalmente ao reforço, é três vezes maior do que compósitos com fibras dispostas ao acaso. Os resultados estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Efeito da orientação das fibras nas propriedades de compósitos poliéster sisal.
Fonte: Kuruvilla et al., 1999.

Orientação das fibras	Resist. Tração na Ruptura [Mpa]	Módulo elástico [Gpa]	Alongamento na Ruptura [%]
Dispostas ao acaso	43,36	2,13	6,12
Alinhamento longitudinal	115,82	3,07	6,28
Alinhamento transversal	11,59	0,91	1,02

Obs.: Fibras dispostas ao acaso com comprimentos de 35mm.

Portanto, a orientação exerce papel fundamental na resistência de materiais compósitos. Compósitos longitudinalmente orientados são anisotrópicos e o máximo desempenho é obtido quando o material é solicitado na direção do alinhamento das fibras. Na direção transversal ao alinhamento das fibras o reforço é virtualmente inexistente e, portanto o material falha a tensões muito baixas (Kuruvilla *et al.*, 1999).

Kuruvilla *et al.* (1999) realizaram ensaios mecânicos em compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras de sisal para diferentes comprimentos de fibras e distintos teores de fibras na matriz. Os resultados e conclusões, apesar de tratarem-se de fibras curtas e matrizes termoplásticas servem como referencia para avaliar o comportamento das fibras com variados comprimentos.

A Tabela 2 apresenta o efeito do comprimento das fibras nas propriedades de tração de compósitos poliéster/fibras curtas de sisal, distribuídas aleatoriamente, com um teor de fibras de 30% em peso, processados por extrusão por rosca simples e dupla.

Tabela 2 – Influencia do comprimento das fibras no comportamento à tração em compósitos. Fonte: Kuruvilla; et al. (1999).

Fibras [mm]	Resist. tração na ruptura [MPa]	Modulo Elástico [GPa]	Alongamento na ruptura [%]
5	26,68	2,13	4,770
15	37,25	2,20	5,074
25	40,84	2,19	5,841
35	43,36	2,13	6,119
45	44,16	2,19	6,166
55	44,49	2,09	6,152
65	40,96	2,01	5,199
75	37,81	1,94	5,429

Nos compósitos a resistência aumenta com o comprimento de fibras de 5mm a 45mm, tendendo a manter-se neste mesmo patamar e, finalmente, decrescer para comprimentos maiores. Este nivelamento e posterior decréscimo da resistência dos compósitos reforçados por fibras mais longas do que 45mm é atribuído ao emaranhamento das fibras que ocorre a comprimentos maiores.

O módulo e alongamento na ruptura dos compósitos, por sua vez, não foram alterados significativamente pelo comprimento das fibras de reforço. A resistência e módulo de compósitos reforçados por fibras curtas dependem principalmente da eficiência de transferência de tensões entre a matriz e as fibras. A eficiência desta transferência de tensões, por sua vez, depende das interações na interface fibra-matriz.

O efeito do teor de fibras nos módulos de elasticidade dos compósitos seguiu a mesma tendência apresentada para a resistência, ou seja, aumento seguido de decréscimo a teores mais elevados. Um máximo nesta propriedade foi obtido a um carregamento de 30% de fibras onde a rigidez do compósito é cerca de 70% maior do que a da matriz. O alongamento na ruptura aumenta com o teor de fibras, o que é tido como indicativo de uma redução na rigidez da matriz com a adição das fibras de sisal, ou seja, na medida em que o alongamento e a resistência dos compósitos aumentam com o teor de fibras, pode-se esperar um aumento nas propriedades de impacto do compósito com o teor de fibras (Kuruvilla *et al.*, 1999).

A incorporação de fibras de comprimento adequado à matriz, material frágil, muda o comportamento desta, dando-lhe ductibilidade com a distribuição de fissuras.

Amico *et al.* (2001) caracterizam o sisal em relação ao seu desempenho mecânico para um maior aproveitamento do seu potencial de reforço em compósitos poliméricos. Nesse trabalho é realizada a caracterização do sisal quanto ao teor médio de umidade e à densidade das fibras, além da resistência à tração das fibras e do fio. O diâmetro das fibras de sisal varia consideravelmente, o que exerce influência significativa nos valores encontrados para as propriedades mecânicas em tração. A utilização do valor real do diâmetro das fibras em vez de um valor médio nos cálculos de resistência à tração (309,9 MPa) e deformação específica (3,5%) reduz drasticamente o desvio padrão das medidas.

A resistência dos compostos aos esforços de tração cresce linearmente com o volume de fibras usado, até atingir um valor limite. Este valor limite é determinado pela quantidade de fibras que pode ser adicionada de modo a ficar com dispersão uniforme e envolvida pela matriz. O volume varia com o comprimento, o diâmetro, tipo de fibra e método de fabricação usado (Guimarães, 1982).

As fibras são tratadas para melhorar as condições de adesão entre reforço e matriz. Em geral trata-se de aumentar a rugosidade, a remoção de lignina externa ou a cristalinidade dos polímeros naturais das fibra. Consegue-se aumentar a resistência e adesão entre o contorno das fibras e a matriz. O tratamento mais recomendado é a imersão das fibras em hidróxido de sódio (NaOH) em concentrações de 10% Mochnacz *et al.* (2002), Amico *et al.* (2001).

Kim Jung-Tae *et al.*(2010), tratando também as fibras de sisal com Hidróxido de Sódio, conseguiu nos ensaios um modulo de elasticidade de 2,79 GPa .

As pesquisas de Stewart *et al.* (1997) contribuíram para um melhor conhecimento da estrutura física e química da fibra de sisal, antes e depois de tratamentos químicos com Na_2CO_3 , para extrair-lhe componentes não celulósicos.

Michaud (2003) estuda os aspectos reológicos de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais e identifica na sua revisão bibliográfica, em relação a compósitos com o sisal, apenas o estudo de Li *et al.* (2000). Estes últimos apresentam uma revisão sobre compósitos com sisal e sobre tratamento das fibras afirmando que o tratamento aumenta a adesão entre fibra matriz.

Também, Albuquerque *et al.* (2000), trabalhando com poliéster e fibra de juta, estudaram processos químicos de tratamento da fibra e do poliéster visando melhoria das propriedades mecânicas dos compósitos.

Joseph, P.V. *et al.* (2002) realizaram tratamentos químicos na fibra de sisal para usá-la como reforço em compósitos com polipropileno, tendo chegado a um comprimento de fibra ótimo de 2 mm. Ao relatarem suas experiências, citam trabalhos anteriores com polietileno de baixa densidade e fibras de abacaxi, e com a fibra de juta em compósitos poliméricos.

Um dos tratamentos utilizados para tratamento de fibras de sisal é o Silane (SiH_4) que misturado com uma mistura de etanol/água foi testado no trabalho de Sreekuma P.A., Kuruvilla J. *et al.* (2009). No tratamento, além do Silane, foram testados outros métodos sendo que o primeiro deu às fibras os maiores valores mecânicos. O método de fabricação do compósito foi o RTM (Resin Transfer Moulding) numa matriz de resina poliéster isoftálica.

2.2 Polímeros

Os polímeros se dividem em dois grupos: termofixos e termoplásticos. Uma resina termoplástica tem estrutura linear, que amolece repetidamente quando aquecida e endurece quando resfriada. Como exemplos de resinas termoplásticas investigadas em compósitos de fibras vegetais podem ser relacionados polipropileno, polietileno, poliestireno, ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno), "nylon", policarbonato, poliéster termoplástico, óxido de polifenileno, polisulfona e PEEK (poli-éter-éter-cetona).

Os termofixos, ou resinas termofixas, curam num estado irreversível, porque sua estrutura molecular é interligada. A resina termofixa uma vez catalisada, essencialmente, permanece no mesmo estado. Esta é a característica dos termofixos, ou seja, uma vez processado não se permite fundir e moldar, mesmo se houver a ação da temperatura (Mano, 1990).

Como exemplo de resinas termofixas para compósitos, temos as resinas poliéster insaturadas, éster-vinílicas, epóxis, uretânicas e fenólicas (OWENSCORNING, 2009).

De acordo a origem química, a resina poliéster pode ser classificada em cinco tipos (Callister, 2000):

a) resina poliéster isoftálica, proveniente do ácido isoftálico, indicada quando se requer bom desempenho mecânico, resistência a umidade e agentes químicos e que seja inerte biologicamente;

b) resina poliéster isoftálica com neo-pentil glicol, que oferece alta resistência química;

c) resina vinil-éster, com base na resina epóxi e componentes vinílicos; oferece resistência química e térmica

d) resina bisfenólica (epóxi), modificada pelo bisfenol, apresenta resistência química, estabilidade hidrolítica e à temperatura;

e) resina poliéster ortoftálica, proveniente do anidrido ftálico, grande potencial de se adequar às variadas situações onde não é necessária uma grande resistência a umidade, nem a ataque por agentes químicos. De grande difusão devido ao baixo custo em relação às resinas enumeradas anteriormente.

Na resina diversos produtos podem ser adicionados. Os aditivos utilizados nas resinas poliéster e suas propriedades são os seguintes:

a) Acelerador. Promove a cura do polímero à temperatura ambiente em conjunto com o catalisador. São usados o naftenato ou octanato de cobalto;

b) Inibidor. Aumenta o tempo de armazenagem do polímero, impedindo sua gelatinação prematura. O mais usado é a hidroquinona ($C_6H_4(OH)_2$);

c) Absorvedor de U.V. Tem a função de absorver a energia das radiações ultravioleta, impedindo a ação destrutiva sobre o polímero;

d) Agente tixotrópico. Usado para reduzir o escorrimento do polímero aplicado em superfícies inclinadas. Este agente é Dióxido de Sílico Coloidal conhecido com o nome industrial de Aerosil.

e) Catalisador. Usado para iniciar a cura dos polímeros. O peróxido de metil etil cetona (MEKP) é universalmente usado nos processos de laminação manual ou a pistola.

As resinas poliéster são produzidas em estado líquido. O processo de cura, ou seja, transformação para plástico rígido ocorre com aumento da temperatura ou com adição de um catalizador à temperatura ambiente. O poliéster utilizado na produção de peças

por moldagem manual em moldes abertos utiliza os catalizadores à temperatura ambiente.

O poliéster inicialmente se encontra em estado líquido e para facilitar sua utilização é apresentado diluído em um monômero (estireno). O monômero será adicionado ao poliéster, quando na comercialização do mesmo, e tem a função de solvente para reduzir a viscosidade da resina, facilitando seu manuseio e também de inibidor de uma catalisação prematura.

Após a adição de catalisadores, passa do estado líquido para o sólido, caracterizando uma estrutura termofixa irreversível. Essa passagem ocorre imediatamente após adição do catalisador, porém transcorre um tempo em que a resina permanece líquida, passando para um estado gelatinoso e em seguida assumindo o aspecto sólido rígido. O tempo que transcorre desde o instante em que se adiciona o catalisador à resina até que esta passe para um estado gelatinoso permite a modelagem do compósito no molde da peça a ser fabricada.

A cura do poliéster começa a acontecer na presença de radicais livres. Catalisadores do tipo peróxido de metil etil cetona (MEKP) adicionados no polímero fazem com que os mesmos consumam o inibidor, iniciando o processamento da reação de cura. Os inibidores são substâncias que foram adicionadas ao poliéster comercializado para reagir com os radicais livres e impedir a gelificação prematura da resina, ou seja, a cura (Mano, 1990).

Na Tabela 3 encontram-se os valores típicos de propriedades mecânicas a temperatura ambiente do poliéster.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do poliéster

Densidade Relativa	Modulo de Elasticidade [GPa]	Resist. à Tração [MPa]	Limite de Escoamento [MPa]	Alongam. na Ruptura [%]
1,09-1,5	2,8-4,1	48,3-72,4	59,3	30-300

Fonte: CALLISTER, 2000, pag. 329

2.3 Fibras vegetais

O estudo sistemático de fibras com finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra em 1940. Uma das principais forças motrizes do desenvolvimento de compósitos de resina e fibras como material estrutural foi a necessidade durante a II Guerra Mundial para radomes que protegem às antenas de radar da intempérie (Gordon, 1976). Inicialmente foram utilizados laminados sanduíches compostos de resina Bakelite reforçadas com peles de fibra de algodão (Cady, 2004).

Guimarães (1987, 1990) desenvolveu pesquisas orientadas às aplicações na construção civil, com 19 fibras relacionadas e potencialmente úteis para reforço de matrizes cimentícias. A partir de propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo de elasticidade e alongamento na ruptura), características físicas, relação entre comprimento e diâmetro, possibilidade de cultivo no Brasil, custo e durabilidade, selecionou algumas fibras como as mais adequadas, entre essas fibras o sisal.

As principais vantagens das fibras naturais vegetais segundo Marinelli (2007) são que:

- as fibras de vegetais são materiais renováveis e sua disponibilidade pode ser considerada ilimitada;
- as fibras naturais são menos abrasivas que as fibras artificiais usualmente utilizadas como reforço, como, por exemplo, fibra de vidro, e assim geram um menor desgaste dos equipamentos envolvidos no seu processamento;
- são materiais biodegradáveis, característica crucial para componentes que após esgotar a sua vida útil devem ser descartados;
- as fibras naturais representam uma nova fonte de renda para a população rural, podendo evitar o enorme fluxo do campo para a cidade, verificado principalmente nas regiões norte e nordeste do país;
- possuem baixa densidade e alta deformabilidade quando comparadas com materiais similares neste campo de aplicação; e
- apresentam baixo custo, em relação aos reforços atualmente empregados

O sisal é uma fibra que continua a ser investigada como reforço por ser leve, atóxica, apresentando alto módulo, alta resistência específica e um custo dez vezes menor que a fibra de vidro.

2.3.1 Fibra de sisal

A fibra de sisal é matéria prima utilizada na produção de fios, cordas e tapetes. As fibras são extraídas e beneficiadas a partir das folhas da planta, gerando um aproveitamento, para fins comerciais, de apenas 4% da folha de sisal, sendo os 96% restantes descartados ou utilizados como adubo (Medeiros, 2006).

Estudos feitos com fibra de piassava (*Attalea funifera Mart*) demonstram que o resíduo das fibras vegetais, chamados de bucha, tem propriedades físicas similares. Isto permite utilizar os resíduos como reforços de materiais compostos (Agrela, 2009).

O sisal, que é uma fibra extraída de folha pode apresentar diâmetro variável e dependendo do tipo de extração (mecânica ou química) apresentar diferentes características. Como um produto natural, as características das fibras apresentam grande variabilidade, com coeficientes de variação maiores que 40% (Lima, 2004).

Na composição química do sisal, a holocelulose é a celulose total, ou seja, a soma da hemicelulose, fração insolúvel e da celulose, fração solúvel em soluções alcalinas. Os principais constituintes das cinzas são Ca, K, Mg, sulfatos, fosfatos, silicatos, carbonatos e pequenas quantidades de outros elementos (Mochnacz *et al.*, 2002). A Tabela 4 descreve a composição química do sisal.

Tabela 4 - Composição química do sisal.

Substância	Teor [%]
Cinzas	3,1
Hemicelulose A	10,1
Extrativos	6,2
α -celulose	74,0
Lignina	7,6

Fonte: Mochnacz S., Amico S.C., Sydenstricker T.H.D. (2002).

A Tabela 5 descreve as propriedades mecânicas e na Figura 2 pode-se ver uma microfotografia de uma fibra de sisal.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do sisal.

Densidade [g/cm ³]	1,26	
Resistência a tração [MPa]	329,5	Desvio Padrão 180,9
Teor de umidade [%]	11,66	

Fonte: Mochnacz S., Amico S.C., Sydenstricker T.H.D. (2002)

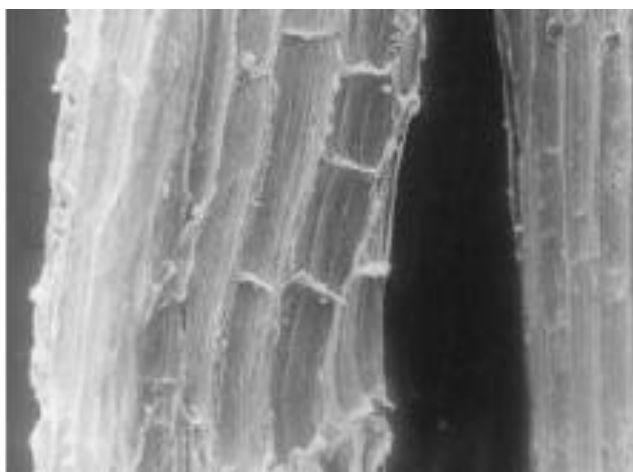


Figura 3: Microfotografia de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do sisal

Fonte: Mochnacz S., Amico S.C., Sydenstricker T.H.D. (2002).

Carvalho (2005) calcula a massa real por picnometria de gás hélio de fibras de sisal cultivadas na região do semi-árido baiano. O gás hélio penetra na microestrutura oca do sisal e a massa medida contempla apenas os sólidos. O resultado obtido é 1,591g/cm³. Li (2000) avaliou a variação da resistência das fibras de sisal em função da massa específica das fibras em um resumo de trabalhos anteriores. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Resumo das propriedades do sisal em pesquisas anteriores. (Li, 2000).

Densidade [kg/m ³]	Tensão máxima [MPa]	MOE [GPa]	Deslocamento max. [%]
1450	604	9.4–15.8	–
1450	530–640	9.4–22	3–7
1030	500–600	16–21	3.6–5.1
1410	400–700	9–20	5–14
1400	450–700	7–13	4–9
1450	450–700	7–13	4–9

O teste de arrancamento (*pull-out*) é muito útil para a avaliação prévia do comportamento mecânico de compósitos, pois quantifica o potencial de reforço das fibras sem levar em conta os problemas advindos da fabricação, ou seja, dispersão das fibras na matriz, eventual ocorrência de reações de degradação devido ao aquecimento, etc.

Mochnacz *et al.* (2002) também fizeram a caracterização e modificação superficial de fibras de sisal para utilização em compósitos poliméricos. No seu trabalho descrevem a morfologia biológica da fibra e mediante ensaios obtém a composição química, as propriedades mecânicas e testes de aderência ou arrancamento (*pull-out*). O valor da tensão média de arrancamento da fibra não tratada e a matriz poliéster foi 2,6MPa com um desvio padrão de $\pm 0,6$.

A fibra de sisal brasileira foi também estudada por Martin A.L. *et al.* (2009). Na sua pesquisa, eles concluem que a variedade *Agave sisalana* apresenta propriedades mecânicas dentro da faixa relatada na literatura e que se mostra adequada para ser utilizada em materiais compósitos poliméricos. Em relação às propriedades ao longo do comprimento da fibra os autores observam que a sua parte mais resistente está localizada cerca de 30 a 60 cm da sua base e a de menor desempenho na região apical (90-120 cm).

2.3.2 Tecidos

Os tecidos urdidos ou tramados são formados intercalando cordões em duas direções: o urdume, que são os fios longitudinais, e a trama composta de fios transversais (Figura 4).

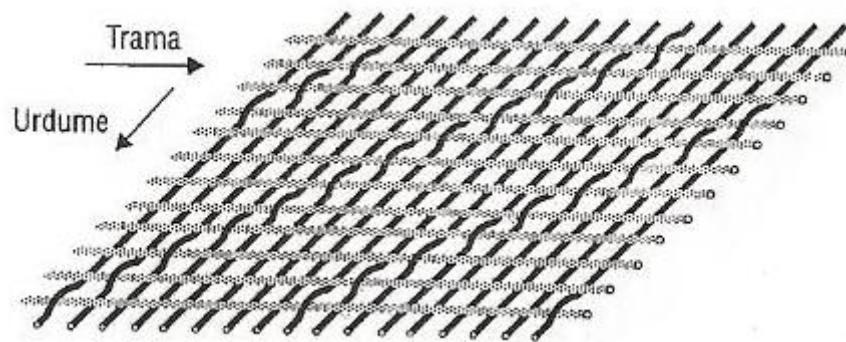


Figura 4: Tecido tramado. Fonte Pardine *et al.* (2006)

Existem vários tipos de tecidos, como os de formas simples e a sarjas. O tipo simples é obtido pelo entrecruzamento alternado de fios perpendiculares e a sarja por cruzamento de três ou mais fios (Carvalho, 2005). Os cordões do urdume são deformados para contornar a trama, adotando um arranjo senoidal como apresenta a figura 5:

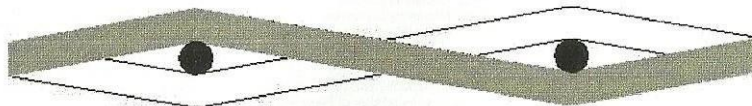


Figura 5: Esquema do arranjo dos tecidos de sisal Fonte Carvalho (2005)

Os tecidos industriais de sisal disponíveis no mercado são fabricados a partir de cordas de pequeno diâmetro. As cordas são fibras alinhadas unidas por torção, e para fabricá-las essas fibras são tratadas com óleos inorgânicos para diminuir o atrito quando passam pelas máquinas que as torcem na fabricação das cordas.

Os compósitos de tecidos são formados pela saturação do tecido por um polímero que quando curado comporta-se como matriz do compósito. O tecido melhora as propriedades mecânicas do compósito porque a distribuição das fibras está alinhada com os esforços principais.

Carvalho (2005) recomenda o uso de tecidos industrializados ou capazes de serem industrializados pela necessidade de homogeneidade do tecido.

2.4 Laminação manual

Chama-se assim o método de fabricação muito utilizado para compósitos fiberglass. As fibras do compósito são colocadas acima de um molde previamente pintado com uma película de polímero, também chamado de *gel-coat*, e molhadas com a matriz por médio de uma trincha ou rolo de lã.

Uma vez que estas fibras estão completamente envolvidas pela matriz (polímero), se espalha mais outra camada de fibras que novamente serão molhadas com mais polímero. Este procedimento se repete até conseguir a espessura desejada do produto. Este processo é chamado de laminação. E o resultado é um laminado homogêneo porque foi elaborado usando lâminas sucessivas com propriedades semelhantes de fibras e polímero.

Em cada lâmina ou camada, as fibras podem estar distribuídas ao acaso ou orientadas. Quando orientadas cada camada é simbolizada por um número que representa sua orientação, em graus, entre a direção de suas fibras e o eixo principal. As camadas são relacionadas na seqüência de empilhamento a partir de uma face à outra, sendo que a primeira camada refere-se ao início da laminação e os colchetes indicam o início e o fim de sua formulação, por exemplo [90,0,90] (Adams, 2003).

Finalmente se passa acima do compósito um rolete para eliminar as bolhas de ar que por acaso tenham ficado inclusas no laminado.

2.4.1 Vazios

Chama-se assim à ausência de material no compósito. Os vazios estão presentes nas duas fases do compósito e na interface.

Na matriz, a formação de vazios, deve-se, em geral, à bolhas de ar aprisionadas no sistema de resina em sua formulação.

As fibras de sisal têm uma região chamada nódulo que carece de células, e portanto é vazia.

Na interface aparecem bolhas de ar durante o processo de laminação. Estas bolhas produzem concentração de tensões que fragilizam o material (Madsen B. *et al.*, 2002). Na figura 6 pode-se ver porosidade em um compósito.

Os vazios causam as perdas da resistência e da rigidez do laminado. O interesse no controle e minimização da quantidade de vazios em compósitos reflete-se na necessidade de se obter propriedades mecânicas elevadas. Por isso, é muito importante o controle da presença de vazios.

Madsen B. *et al.* (2002) recomendam a necessidade de estudar a porosidade por ter um efeito direto sobre a composição física e as propriedades mecânicas dos compósitos. Também modificam a regra de misturas incluindo nela a porosidade para melhorar a predição das propriedades de tração no compósito.

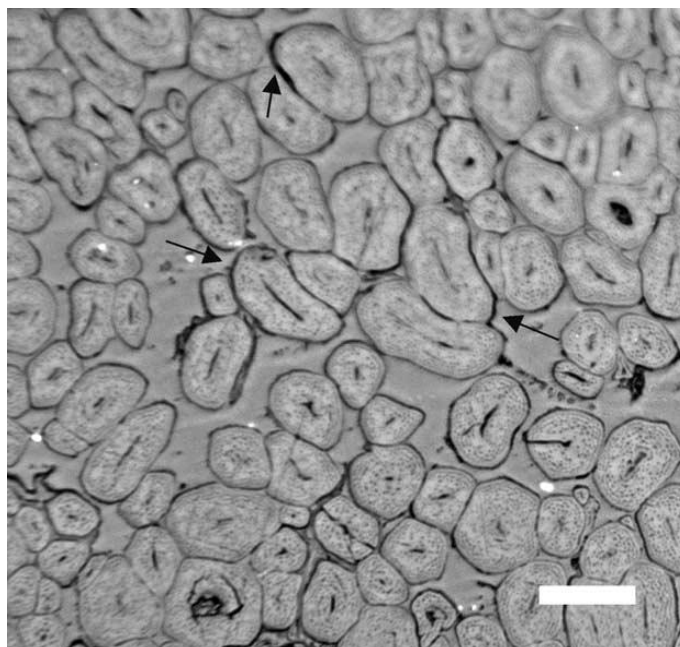


Figura 6: Imagem microscópica de um composto laminado. As setas mostram exemplos de porosidade na interface fibra-matriz.
Fonte: Madsen B. *et al.*, 2002.

Vazquez-Rodriguez (2006) utilizou imagens fotoelásticas das franjas isocromáticas em ensaios de arrancamento (*pull-out*), usados para medir a distribuição de tensões interfaciais de cisalhamento de uma interface de termofixos. Os corpos de prova foram elaborados com resina bisfenólica epóxy e reforços termoplásticos. Determinou a localização da força máxima de cisalhamento ao longo da superfície da fibra e confirma que é necessário desenvolver uma interface forte entre os materiais, fibra termoplástica e matriz termofixa, para chegar a materiais novos com propriedades diferentes dos já conhecidos hoje.

No processo de laminação manual as bolhas de ar são retiradas passando um rolete acima do compósito depois de aplicada a última camada. Não existem normas que determinem o diâmetro mínimo das bolhas que por acaso tenham ficado inclusas no laminado, mas é muito importante eliminá-las do compósito.

Quando o laminado não é industrial, e sim confeccionado em laboratório, pode-se detectar e caracterizar essas discontinuidades. Utilizam-se técnicas de inspeção não-destrutivas. Dentre essas, o ensaio ultra-sônico, em técnicas de pulso-eco, é o mais utilizado. Por meio desse ensaio pode-se caracterizar a qualidade da cura, áreas ricas ou pobres em resina, desalinhamento das fibras e porosidade.

A norma ASTM D2734 apresenta um método não destrutivo para calcular vazios. A massa específica da resina e o reforço do compósito são medidos separadamente. Depois é medida a densidade do compósito. A diferença de densidades indica o conteúdo vazio. A norma determina que um bom composto pode ter até 1% de vazios ou menos. As equações propostas pela norma são:

- a massa específica teórica do compósito é calculada pela equação (4)

$$T = 100 / [(R / D) + (r / d)] \quad (4)$$

, sendo T a massa específica teórica, R o peso da resina [%], D a massa específica da resina, r o peso do reforço no compósito [%] e d a massa específica do reforço.

- o cálculo dos vazios é calculado pela equação (5)

$$V = 100 (T_d - M_d) / M_d \quad (5)$$

, onde V é o conteúdo de vazios [%], T_d a massa específica teórica do compósito, M_d a massa específica medida do compósito.

2.5 Custos do compósito em estudo

O objetivo deste capítulo é calcular os custos dos compósitos com fibra de sisal e fibra de vidro, para estabelecer comparações entre eles.

O custo pode ser entendido como sendo o valor dos bens e serviços consumidos ou encargos incorridos na empresa para produzir o produto (Thuesen e Fabrycky, 1989).

Os custos podem ser classificados em função da sua variação em relação à quantidade de produtos manufaturados (Pahl, 1996). Eles se agrupam em Custos Variáveis e Custos Fixos. O custo variável é constante por unidade produzida, mas varia em seu total. Exemplos: custo de material, custo de fabricação e outros. O custo fixo permanece constante e indiferente aos diferentes volumes de unidades produzidas. Ex. salário de gerentes, custo de molde de laminação.

Outra classificação dos custos considera se um determinado custo pertence ou não ao produto. Neste caso são classificados considerando se um determinado custo pertence ou não ao produto. Pode-se dividir em Custo Direto e Custo Indireto.

Custo Direto é aquele que é facilmente atribuível a um determinado produto. Por exemplo: custo da matéria-prima, mão-de-obra, entre outros.

Custo Indireto: é aquele que não é atribuído diretamente a um determinado produto. Por ex.: supervisão, armazenagem ou iluminação, entre outros (Ferreira C.V. 2002).

Fazendo um análise de custos é possível saber, do ponto de vista econômico, se a substituição do fiberglass por um compósito com fibras vegetais é vantajosa (Di Bella, 2010).

Nesta pesquisa a intenção é comparar o valor de um produto fabricado com um compósito de fibras vegetais e com outro fabricado com fibra de vidro usando a mesma tecnologia, ferramental e moldes. Portanto, so é necessário calcular o valor da matéria-prima direta dos compósitos. Os componentes restantes do custo direto, indireto e total do produto, como mão de obra, supervisão, embalagem, custos administrativos e financeiros são iguais tanto para os compósitos fabricados com fibra de vidro quanto para os fabricados com fibra de sisal.

O preço do sisal no mercado internacional é de 0.36 US\$/kg e o da fibra de vidro 3,25 US/kg (Li, 2000). No mercado brasileiro atual, os preços mantêm valores análogos aos internacionais. O kilograma de sisal foi fixado pela CONAB (2009) em R\$1,04 e a manta de fibra de vidro é comercializada em Salvador-BA por valores entre R\$10,50 e R\$11,50 por kilograma.

Como preço base, serão utilizados para os cálculos os preços comerciais das matérias primas em Salvador-BA.

Podem-se estabelecer comparações de custos entre a fibra de sisal e a fibra de vidro desde dois pontos de vista: custo do compósito por unidade de volume do material e custo do compósito relacionado à eficiência estrutural.

O primeiro é importante quando o compósito está destinado à fabricação de peças onde o custo é em função do volume. O segundo avalia a eficiência estrutural relacionando o desempenho mecânico ao custo do compósito. Esta comparação pode ser usada para avaliar, do ponto de vista do custo e do desempenho mecânico, a conveniência de substituir uma fibra por outra.

2.6 Considerações sobre a revisão bibliográfica

Ha quase meio século que a fibra de vidro, conhecida também na indústria como fiberglass, tem se afirmado como o material mais apropriado e muito utilizado em áreas como a construção naval esportiva. Caberia a este novo compósito aproveitar esse espaço e às comunidades produtoras do sisal utilizá-lo. Isto só seria possível com um método de fabricação simples desde o ponto de vista tecnológico e barato no seu investimento. Todas essas premissas estão contempladas nesta pesquisa.

A eficiência do material composto depende significativamente do arranjo das fibras. A industrialização dos tecidos de sisal é orientada ao mercado da decoração não atendendo a critérios da resistência mecânica. Portanto, é necessário o desenvolvimento de um tecido com a finalidade específica de reforçar compósitos de uso estrutural (Carvalho, 2005).

A solução proposta nesta pesquisa é um tecido que se adéqua tanto às necessidades do reforço do compósito quanto à tecnologia de laminação manual.

Diante de um número já significativo de pesquisas sobre compósitos com matrizes poliméricas, reforçados com fibras naturais e artificiais, chama à atenção as poucas pesquisas nas quais os compósitos de matriz poliéster são reforçados com tecidos de fibra de sisal. Por fim, a pesquisa bibliográfica realizada neste trabalho não identificou nenhum estudo em compósitos utilizando este tipo de reforço, adotando com ele o método de fabricação conhecido por laminado manual (*hand lay-up*) para fabricação de peças e objetos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais utilizados para fabricar os compósitos, as propriedades e os métodos de ensaio utilizados na avaliação do comportamento destes materiais.

3.1 Materiais

3.1.1 Poliéster

Para matriz do compósito foi utilizada uma resina poliéster de nome comercial UCEFLEX UC 2090, fornecido pela_ELEKEIROZ Ltda.(São Paulo). UCEFLEX UC 2090 é uma resina de poliéster insaturada, tixotrópica, pré-acelerada e de baixa viscosidade. A densidade à 25°C é de 1,09 g/cm³. Na tabela 7 estão as características fornecidas pelo fabricante.

Tabela 7 – Características da resina UCEFLEX UC 2090. Fonte Elekeiroz Ltda.

Determinação	Unidade	Resultados
Viscosidade (25°C)	cP	330
Índice de Tixotropia	--	1,65
Gel Time (25°C)	minutos	23'57''
Pico exotérmico	°C	167
Teor de Estireno	% peso	44

3.1.2 Fibras Sisal.

As fibras cruas de sisal foram fornecidas pela APAEB e produzidas na região sisaleira da Bahia Município de Valente sem tratamentos prévios, apresentando um comprimento irregular que varia de 0,6 a 1 metro e são utilizadas, após tratamentos, na fabricação de cordoarias ou mantas com espessuras superiores a 10 mm (Figura 7).



Figura 7: Fibras de sisal doadas pela APAEB

3.2 Métodos

O trabalho inicia com o desenvolvimento de tecidos adequados à laminação manual utilizada e os ensaios mecânicos.

Foram ensaiados por separado as fibras do reforço, tecidos elaborados com fibras, a matriz poliéster e os compósitos. Os ensaios escolhidos foram tração e flexão. Estes ensaios proporcionam valores imprescindíveis para os projetistas, tais como Resistência à Tração, MOE, MOR e Deformação Específica.

Também foram realizados ensaios de arrancamento (*pull-out*) para avaliar as ligações entre matriz e reforço. Os ensaios foram realizados no Laboratório Timoshenko da Escola Politécnica da UFBA utilizando uma máquina universal de ensaios modelo 2000 da EMIC.

3.2.1 Desenvolvimento dos tecidos

Em trabalhos preliminares, as fibras foram picotadas e dispostas aleatoriamente dentro do compósito. Devido à molhabilidade e rigidez inadequadas, as fibras assim dispostas não se acomodam dentro do laminado por serem de diferentes diâmetros e rígidas mesmo quando impregnadas pela resina. A superfície externa da amostra apresentava um acabamento irregular e com inúmeros vazios de tamanhos até 2mm.

Estes vazios superficiais prejudicam o acabamento do produto final fabricado, além de provocar concentração de tensões.

Outra possibilidade disponível no mercado, proposta no trabalho de Carvalho (2005) é partir de tecidos fabricados pela indústria. Mas estes tecidos são confeccionados com cordões tratados com óleos e corantes e a titulação, mesmo a menor dos fabricados não permitem laminados inferiores a 4mm de espessura. A trama é deformada pelo urdume adotando uma forma senoidal o que aumenta o consumo de polímeros. A forma senoidal também altera as propriedades mecânicas finais das fibras, já que as mesmas perdem o alinhamento em relação às tensões principais a que sofrem no compósito, o que resulta em sessões transversais não alinhadas aos esforços na direção destes cordões. A torção dos cordões também impede que a matriz os molhe internamente, resultando em uma adesão incompleta entre matriz e reforço. O presente trabalho propõe desenvolver um arranjo tecido de fibras com o objetivo de obter as seguintes vantagens:

- aumentar a proporção volumétrica do reforço no compósito pela disposição regular das fibras.
- a trama do tecido acomoda as fibras impedindo que elas saiam da superfície do compósito laminado.
- obter uma superfície externa isenta de vazios,
- espessura uniforme nos laminados.

Para a confecção dos tecidos foram utilizados um tear de pregos e um tear de pente liso. O tear de pregos utilizado pode ser visto na Figura 8.

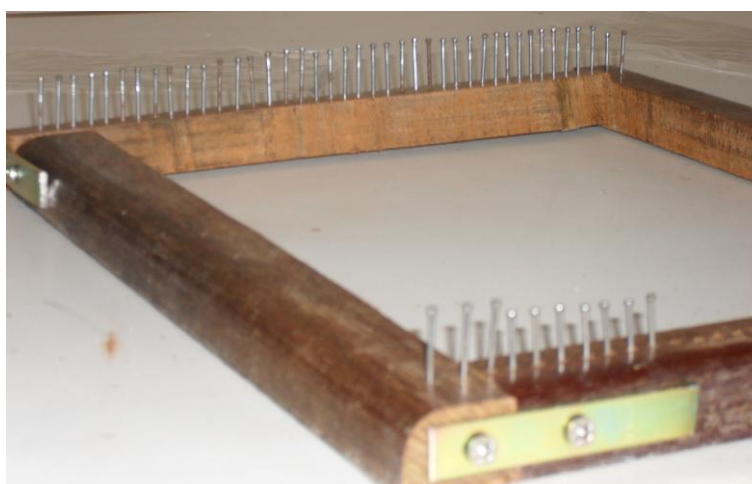


Figura 8: Tear de pregos

A segunda alternativa foi um tear de pente liso de 40cm de acordo com a Fig. 9



Figura 9: Tear de pente liso.

As Figuras 10 (a) e (b) apresentam os aspectos dos tecidos obtidos com o tear de pregos e de pente liso respectivamente.



(a)



(b)

Figura 10: Tecidos a) tecido com tear de pregos; b) tecido com tear de pente liso

Usando os tecidos confeccionados com o tear de pregos foram satisfeitas as hipóteses anteriores, mas foram constatadas as seguintes desvantagens:

- o espaçamento dos fios da trama é irregular e o tecido não tem uma densidade uniforme porque este tipo de tear não possui pente. O pente é utilizado para bater regularmente nos fios da trama, conseguindo espaçamento e densidade uniformes no tecido.
- no tear de pregos não é possível regular a tensão da urdidura durante a tecelagem.

- o tamanho do tecido não pode exceder as dimensões do tear.

Os mesmos inconvenientes do uso do tear de pregos para confeccionar tecidos de sisal foram encontrados por Silva (2009). Portanto, os compósitos foram confeccionados com o tecido obtido com o tear de pente liso.

Analisando os tecidos em fibra de vidro, pode-se observar que estão confeccionados com fibras de vidro tanto no urdume quanto na trama. A trama tem como limite o comprimento do tear. O urdume depende do comprimento das fibras. Como as fibras de vidro se fabricam em grandes comprimentos, é possível fabricar tecidos de até 20m com fibras de vidro no urdume. Por outro lado, as fibras de sisal têm um comprimento limitado. A largura do tecido de sisal desenvolvido para esta pesquisa tem como limite o comprimento da fibra de sisal usada na trama (1m como máximo). O comprimento do tecido, se depender das fibras de sisal, não poderia sobrepassar o comprimento destas. O urdume, por causa do comprimento limitado das fibras de sisal, foi substituído por linha de algodão. Comparando a resistência à tração do algodão com a da fibra de sisal, o algodão pode ser até 45% inferior que a do sisal (Carvalho, 2005), mas os fios de algodão são fabricados em grandes comprimentos, permitindo aumentar o comprimento dos tecidos. A linha de algodão, sendo menos rígida que a fibra de sisal, não deforma as fibras da trama, mantendo estas uma direção reta e portanto uma melhor resistência a esforços axiais. O espaçamento do urdume é de 1cm e só tem por finalidade manter as mechas de sisal unidas na direção principal.

As fibras de sisal da trama foram agrupadas em mechas ou grupos de 15 fibras com peso de 0,3800g e um desvio de 0,0024g cada mecha. Deste modo foi possível uniformizar a massa das fibras em cada mecha da trama. O resultado obtido é um tecido com espessura média de 1mm e quantidade de fibra uniforme disposta em uma única direção, a da trama. A massa do tecido observada é de 250g/m^2 com desvio padrão de $3,98\text{g/m}^2$. Na Figura 11 se pode observar o tecido durante a elaboração.



Figura 11: Tecido sendo elaborado no tear de pente liso.

Os reforços em fibra de vidro foram elaborados em mechas (fio *roving*) com massa de 2,40g cada e resultando uma massa de 858g/m² com desvio de 0,97g/m².

3.2.2 Laminado do compósito

Os compósitos foram laminados em molde aberto pelo método de laminação manual (*hand-lay up*). O compósito foi laminado acima da superfície plana de um vidro de 4mm de espessura para obter uma placa de espessura uniforme. No molde plano foi aplicado inicialmente desmoldante líquido para facilitar a separação do compósito do molde. A resina poliéster utilizada foi catalizada com peróxido de metil etil cetona (MEKP) em proporção de 1% em peso da resina. O tempo total de moldagem foi limitado pelo tempo de gelificação do poliéster, portanto, inferior a 28min e a cura total foi de 120 minutos a temperatura ambiente de 30 graus. Todos os compósitos foram laminados com duas camadas. Cada camada composta de resina e um tecido de fibra aplicados alternadamente. Finalizou-se o laminado passando um rolete de 10mm de diâmetro sobre a peça até eliminar as bolhas de ar do compósito. A temperatura ambiente, no momento da fabricação, variou entre os 20 e 30 graus centígrados. O tempo de cura dos laminados foi de 24 horas, suficiente para obter a cura total.

Durante todo o processo de laminado é preciso observar e garantir que a matriz molhe completamente as fibras de reforço. A resina foi aplicada com uma trincha de 2'' e se aplicavam com ela enérgicas batidas sobre o tecido formando um ângulo de 90⁰ entre a trincha e o laminado. Com este procedimento se introduz a resina dentro das

fibras internas do tecido à vez que se furavam as bolhas de ar ocasionalmente aprisionadas dentro do laminado. Outra vantagem deste procedimento é reduzir o consumo de resina para molhar o reforço.

O preço da matriz poliéster é quase oito vezes maior que o do reforço. No laminado deve-se incorporar a maior quantidade de fibras com um mínimo de resina. O resultado será um compósito com maior resistência proporcionada pelas fibras e com menor custo. O compósito laminado foi caracterizado como segue:

- o volume das fibras do compósito a partir da densidade das fibras e a massa de fibras. O valor da densidade adotado para sisal foi o valor descrito por Carvalho (2005), obtido por picnometria de gás Hélio;
- o volume da matriz do compósito foi calculado adotando o valor da massa específica da resina (1090 kg/m^3) e a massa da resina. Esta última se obteve pela diferença entre a massa das fibras e a massa total do compósito laminado.
- com os volumes da fibra e da matriz foram calculadas as frações volumétricas.
- o módulo de elasticidade teórico dos compósitos foi calculado pela equação da regra de misturas (Hull, 1996).
- as medidas de massa específica dos compósitos por picnometria em água.

3.2.3 Microscopia óptica

Foram realizadas microscopias ópticas para avaliar a adesão e separação das interfaces do compósito desenvolvido. A microscopia foi utilizada para avaliar antes do ensaio de pull-out, a ausência de bolhas de ar nos corpos de prova e após o ensaio, para verificar a completa separação entre a fibra e a matriz. Pode-se acontecer que a totalidade da fibra não se separe da matriz e invalide o ensaio.

Nos ensaios de tração, as fraturas dos corpos de provas também foram avaliadas com ajuda da microscopia óptica.

O microscópio utilizado é fabricado pela Spectru Instrumental Científico Ltda. Modelo OPTON e a resolução utilizada 200X.

3.2.4 Massa específica por picnometria em água.

A massa específica experimental do compósito foi utilizada para calcular o índice de vazios conforme a Norma ASTM D2734. O meio líquido escolhido, em que foi submergido o compósito, foi água destilada a uma temperatura de 22°C e com uma densidade (ρ_{H_2O}) de 0,997 gr/cm³. Foram realizadas as seguintes pesagens:

$$m_A = \text{pignômetro vazio}$$

$$m_B = \text{pignômetro} + \text{compósito}$$

$$m_C = \text{pignômetro} + \text{compósito} + 1/3 \text{ da água total do picnômetro}$$

$$m_D = \text{pignômetro} + \text{água}$$

Com estes valores foi calculada o volume da água do picnômetro (V_a), o volume de 1/3 da água total do picnômetro (V_b), o volume do compósito (V_c) e finalmente a massa específica do compósito (ρ_c) por meio das equações (6), (7), (8) e (9).

$$V_a = (m_D - m_A) / \rho_{H_2O} \quad (6)$$

$$V_b = (m_C - m_B) / \rho_{H_2O} \quad (7)$$

$$V_c = V_a - V_b \quad (8)$$

$$\rho_c = (m_B - m_A) / V_c \quad (9)$$

3.2.5 Tração com fibras de sisal

Estes ensaios determinam valores da resistência á tração da fibra utilizada e com esses valores podem-se estabelecer relações com os valores do referencial teórico.

As fibras de sisal foram ensaiadas à tração fixando-as num molde de papel vazado. O papel é de gramatura 40 e as dimensões conforme a Figura 12.

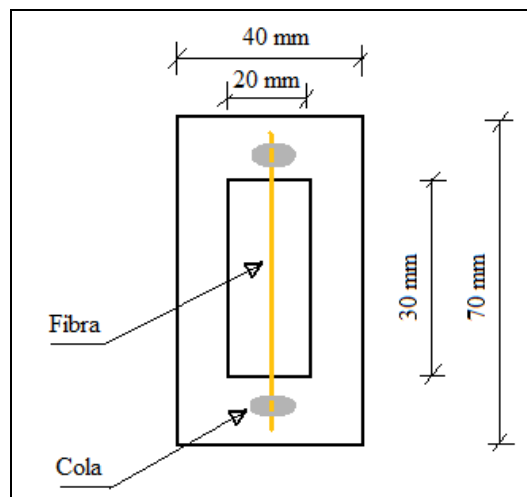


Figura 12: Suporte usado para ensaiar as fibras.

A figura 13 mostra um corpo de prova antes do ensaio de tração.

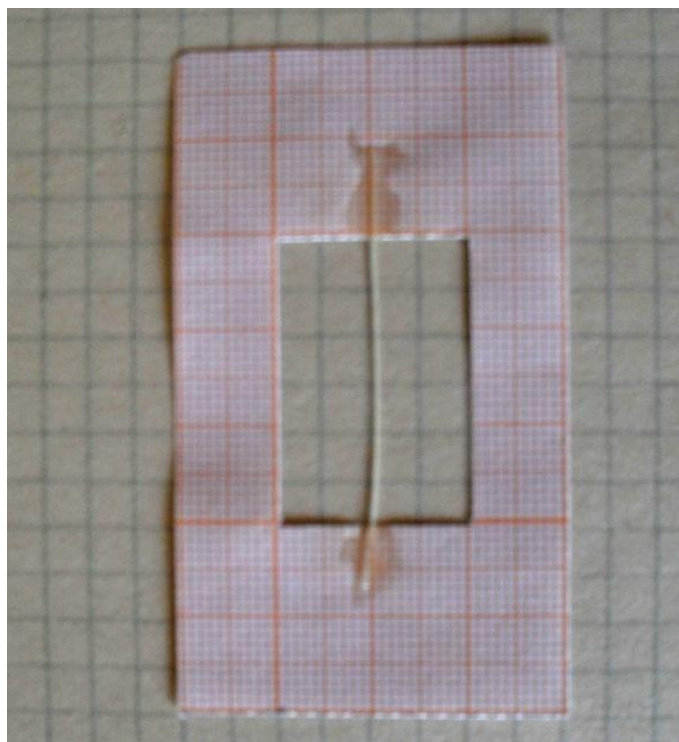


Figura 13: Corpo de prova antes do ensaio de tração

A secção média foi calculada a partir da massa da fibra ensaiada e da massa específica das fibras de sisal mediante a equação (10)

$$A_m = m_r / \rho_r \cdot \ell \quad (10)$$

sendo A_m ; m_r ; ρ_r e ℓ a secção média da fibra, a massa da fibra, a massa específica do sisal e o comprimento, respectivamente.

Para o ensaio de tração dos tecidos elaborados no tear de pente liso, foram coladas amostras em papel de gramatura 40 conforme figura 14.

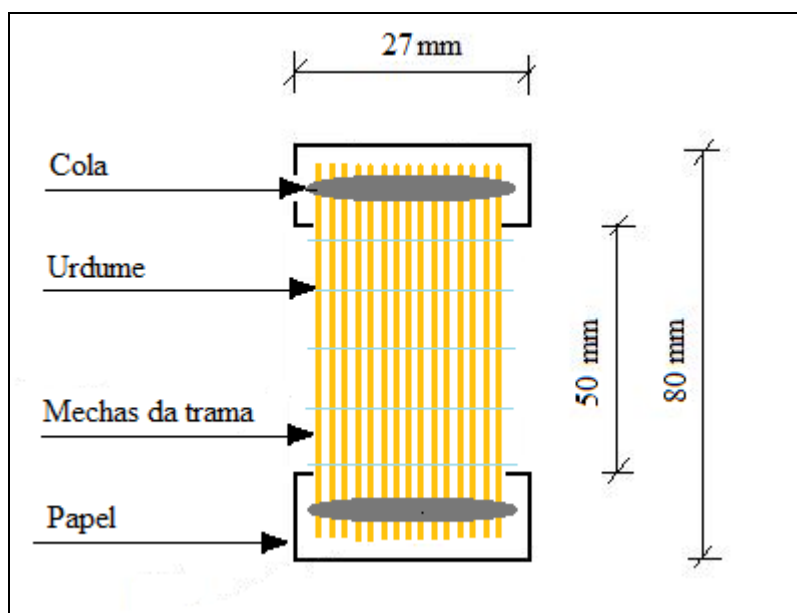


Figura 14: Formato do suporte usado para fixar o tecido na prensa de ensaio.

A cola usada para fixar ao papel tanto as fibras quanto o tecido foi o SuperBonder da Loocite. A secção média do tecido foi calculada a partir da massa do tecido ensaiada e da massa específica das fibras de sisal mediante a equação (11)

$$A_t = m_t / \rho_r \cdot \ell \quad (11)$$

Sendo A_t ; m_t ; ρ_r e ℓ a secção media da fibra, a massa da fibra, a massa específica do sisal e o comprimento respectivamente.

Para ensaiar a resina da matriz, adaptou-se a Norma ASTM D638. Os corpos de prova foram elaborados só com resina poliéster, a mesma utilizada para o compósito.

3.2.6 Tração em compósito

Adotou-se a Norma ASTM D3039 para o ensaio do compósito formado por tecido de fibra de sisal e resina poliéster. Cada corpo de prova foi elaborado com dois tecidos. Os tecidos tiveram as fibras orientadas de três formas diferentes. Na primeira os

dois tecidos tiveram as fibras orientadas conforme o sentido do ensaio [0,0]. Na segunda os dois tecidos tiveram as fibras perpendicularmente orientadas [0,90]. No último com os dois tecidos tiveram as fibras transversais à direção do ensaio [90,90]. Os corpos de prova (Figura 15) foram recortados das placas laminadas dos compósitos. As medidas foram determinadas conforme estabelece a norma ASTM D3039, sendo o comprimento de 254mm, a largura de 25,4mm e a espessura mínima 3mm.



Figura 15: Imagem do Corpo de Prova.

3.2.7 Flexão dos compósitos

Os ensaios de flexão dos compósitos foram realizados conforme a norma ASTM D790. Trata-se de um ensaio de flexão estático de três pontos que proporciona valores de módulo de elasticidade, módulo de ruptura e flecha.

Da mesma forma que no ensaio de tração, os corpos de prova continham dois tecidos de reforço com as fibras assim orientadas: um no mesmo sentido longitudinal ao comprimento do corpo de prova [0,0]; outro com um tecido longitudinal e outro transversal [0,90] e o terceiro com os dois tecidos transversais [90,90].

As medidas adotadas para os corpos de prova foram: comprimento 63mm; largura 13mm e espessura 2,7mm. A distância entre apoios 5 mm.

3.3 Custo dos compósitos

O custo de materiais diretos será calculado a partir do custo das matérias primas utilizadas no laminado dos compósitos.

Para calcular o custo de cada material do compósito será considerada sua composição por em massa dentro do laminado multiplicado pela espessura, área e massa específica do compósito. A equação (12) permite calcular este custo.

$$C_{Mi} = (\% \text{ em peso}) \cdot (P_i) \cdot \rho \cdot e \cdot A \quad (12)$$

sendo C_{Mi} = custo de cada material do compósito [R\$/m².mm]
 % em peso = composição do material por massa dentro do laminado
 P_i = Preço de cada material tendo como base seu valor atual em Salvador-BA [R\$]
 ρ = massa específica do compósito [Kg/m³]
 e = espessura do laminado (unitária)
 A = área do laminado (unitária)

A área e a espessura terão valores unitários. Estes valores unitários têm sua justificativa em dois fatores. O primeiro fator é o projeto da peça a fabricar. O projeto deve determinar a espessura da peça em função da sua geometria e do desempenho do compósito. Geralmente esta espessura esta equacionada em milímetros. O segundo fator é método de fabricação por laminado manual. Na fabricação de uma peça a espessura é controlada pela quantidade de camadas necessárias para atingir a espessura. Todas as camadas devem ter igual espessura. Se o tecido de reforço for dimensionado adequadamente, cada camada pode ter um valor unitário. Para este estudo será 1mm. Deste modo, durante a fabricação, o operário controla a espessura da peça determinada no projeto pela quantidade de camadas que deve aplicar até conseguir a espessura projetada.

A massa específica do compósito laminado [kg/m³] é obtida pelos ensaios de picnometria em água:

O Custo Direto do compósito laminado de 1m² de área e 1mm de espessura será a somatória dos custos de cada material que intervém no compósito, conforme a equação(13)

$$\text{Custo Direto do compósito} = \Sigma C_{Mi} \cdot [\text{R}\$/\text{m}^2.\text{mm}] \quad (13)$$

A eficiência dos compósitos está expressada pela equação (14) e permite determinar a eficiência estrutural de cada compósito.

$$\mu_i = \text{MOE} / \text{Custo} \quad (14)$$

sendo μ_i ; MOE ; Custo, a eficiência do compósito, o módulo de elasticidade à flexão e o custo do compósito por unidade de volume respectivamente.

Para o cálculo da eficiência foi escolhido o módulo de elasticidade à flexão. Este módulo intervém nos cálculos de dimensionamento pelo critério da deformação ou rigidez. Este critério é o mais utilizado num sem-número de peças, tais como tanques e reservatórios com placas isotrópicas submetidas a carregamento lateral uniforme, ou embarcações com cargas uniformemente distribuídas e verificadas por instabilidade elástica. Nestes casos, a deformação deve ser tida em conta porque as expressões deixam de ser aplicáveis se a flecha máxima excede a espessura da placa. Considerando que a deformação específica do sisal tem valores diferentes aos da fibra de vidro, a eficiência estrutural varia de um para outro compósito.

Finalmente o pode-se calcular o fator conveniência em substituir um compósito por outro mediante a equação (15)

$$v = \mu_{FV} / \mu_{FS} \quad (15)$$

sendo v o fator de conveniência e μ_{FV} e μ_{FS} a eficiência do compósito com fibra de vidro e fibra de sisal respectivamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados os seguintes ensaios:

- tração em fibras de sisal e tecidos
- tração em resina usada na matriz do compósito
- tração em compósitos com os dois materiais anteriores
- tração em fibra de vidro (*fiberglass*).
- ensaios de arrancamento (*pull-out*)
- flexão em compósitos
- picnometria por água nos compósitos

4.1 Tração em fibras

Inicialmente foram ensaiadas à tração as fibras de sisal e o tecido confeccionado com as mesmas fibras. Os resultados ajudaram a compreender o comportamento dentro do compósito. A caracterização mecânica das fibras foi realizada em quinze amostras de fibras de sisal.

O módulo de elasticidade à tração foi calculado com valores de tensão-deformação situados entre o 20% e 80% do trecho linear inicial, período elástico, das curvas de ensaio. Com os valores de tensão-deformação dentro dessa faixa, o MOE foi calculado pela fórmula da geometria analítica. Na figura 16 pode-se observar a variabilidade das curvas obtidas nos ensaios.

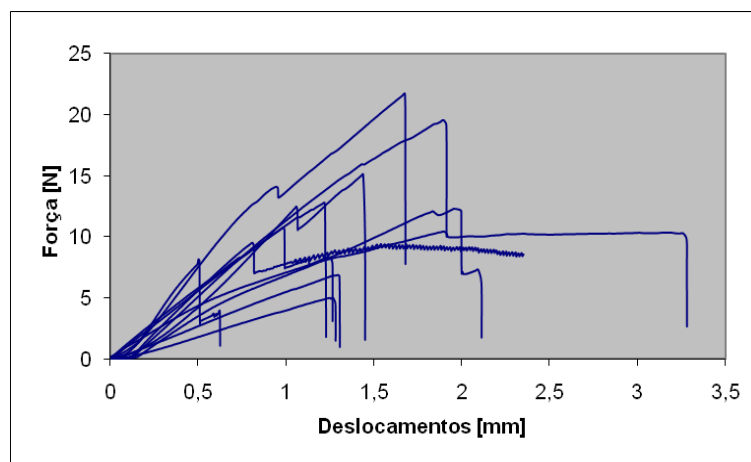


Figura 16: Ensaios de tração em fibras de sisal

A tabela 8 apresenta os resultados médios, desvios padrões e coeficiente de variação obtidos das áreas médias calculadas, das deformações de ruptura, das resistências e módulos de elasticidade à tração (MOE).

Tabela 8. Resultados do ensaio de tração com fibras de sisal

N=15	Área [mm ²]	Deformação específica na ruptura [%]	Resistência [MPa]	MOE [GPa]
Média	3,61x10 ⁻²	6,654	301,1	11,15
Desvio Padrão	±2,07x10 ⁻²	±4,895	±24,9	±8,11
Coeficiente de variação	57,34%	73,56%	8,26%	72,73%

As fibras tiveram um comportamento variado tanto nos parâmetros quanto na geometria das curvas tensão-deformação. Os mesmos desvios das propriedades na tensão axial podem ser observados no estudo de Carvalho (2005), onde se supõe a hipótese da heterogeneidade química e física das fibras naturais e as variações de sessão ao longo das fibras têxteis, sendo que a sessão maior encontra-se mais próxima ao tronco da planta, e por isso mais antiga e com paredes celulares mais robustas. Outro fator é que as regiões produtoras do sisal não são as mesmas sem esquecer que no desfibramento das fibras, estas podem sofrer pré-estiramentos diferentes que modificam seu desempenho. O que pode ser observado é que estes resultados estão próximos aos descritos na bibliografia. A resistência à tração média encontrada foi de 301,1 MPa, com um desvio padrão de 24,9MPa, considerado baixo por se tratar de fibras naturais se comparado com os valores de 329,5MPa obtidos por Mochnacz *et al.*(2002).

4.2 Tração em tecidos

Foram ensaiadas seis amostras de tecido elaborado com as fibras in natura tal como se descreve no capítulo 3. Os testes dos tecidos de sisal tiveram como objetivo comparar os valores com os das fibras que o compõem. Na Figura 17 apresenta-se o aspecto das curvas de força versus deslocamento obtido nos ensaios.

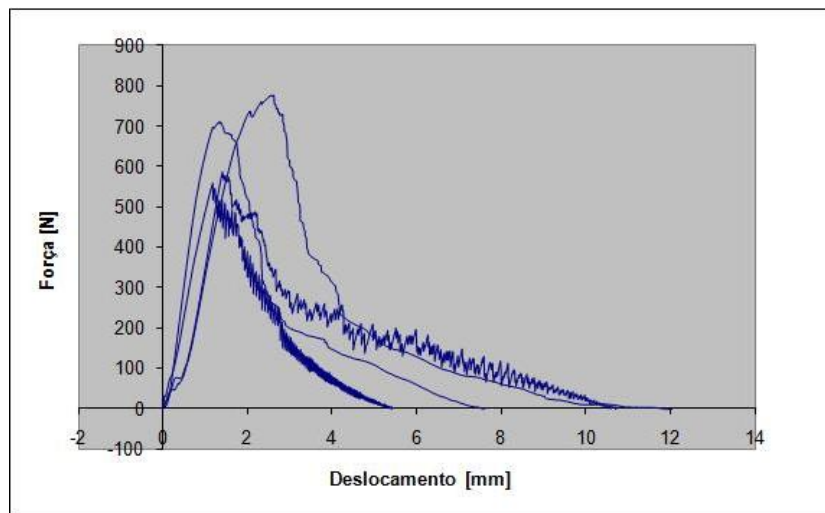


Figura 17: Ensaio de tração em tecidos de sisal

Pode ser observado na tabela 9 que foi obtido um desvio padrão relativamente alto para todas as medidas. Isto é uma consequência direta da heterogeneidade dos fios testados.

Tabela 9. Resultados do ensaio de tração obtidos para o tecido de sisal

N = 6	Força máxima [N]	Resistência à tração [MPa]	Deformação específica na ruptura [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
Média	744,12	145,05	3,936	6,24
Desvio Padrão	±102,6	±20,0	±1,25	±1,26
Coefficiente de variação	15%	16%	38%	21%

No caso de um tecido de sisal com média de 15 fibras em cada mecha a variação de diâmetros se torna um fator menos importante pela compensação estatística dos diâmetros das fibras em torno de um valor médio e, portanto, espera-se que este valor esteja bem próximo do valor real para este tecido.

A resistência à tração e módulo de elasticidade dos tecidos apresenta valores significativamente inferiores às fibras testadas individualmente. Pode ser observado que em cada mecha, que conta com cerca de quinze fibras, as rupturas ocorrem em algumas fibras individuais após ser atingida a sua resistência máxima. Esse comportamento se deve a pequenas variações de diâmetro, constituição e microestrutura das fibras individuais, resultando na variação das forças máximas que podem ser suportadas pelo tecido. A heterogeneidade das fibras também influencia na redução da rigidez dos

tecidos em relação a fibras individuais. Na figura 18 um corpo de prova de ensaio de tecido de sisal.

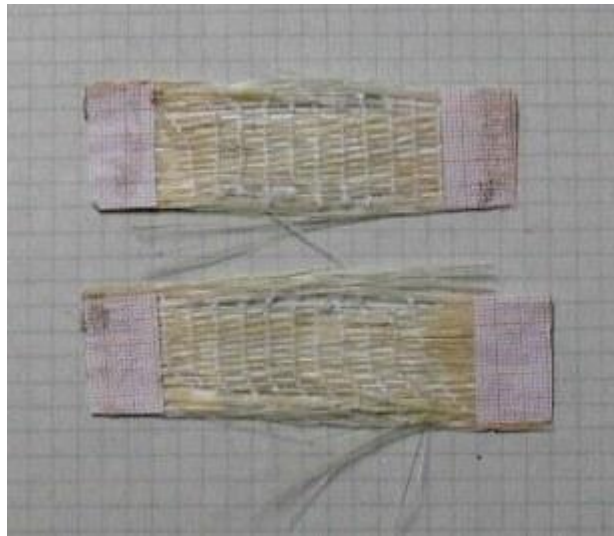


Figura 18: Corpo de prova de ensaio de tecido de sisal.

4.3 Tração no poliéster

Os ensaios de tração destes polímeros usados como matriz têm como objetivo caracterizar o material que posteriormente vai fazer parte do compósito. Os valores assim obtidos intervêm nos cálculos do módulo de elasticidade teórico (MOE) e sua validação com os resultantes dos ensaios.

Foram confeccionados corpos de prova com a resina UCEFLEX UC 2090 catalisada com MEK ao 1% em peso da resina a temperatura ambiente (22-27⁰C). Durante a fabricação dos corpos de prova com o poliéster foi observado que teores de catalisadores superiores ao 1% provocavam, durante a cura, desprendimentos de gás acumulados na forma de bolhas, presos na resina, aumentando o índice de vazios e diminuindo sua resistência mecânica. Na figura 19 podem ser vistos os corpos de prova.



Figura 19: Corpos de prova em poliéster

Na Tabela 10 pode-se observar os valores obtidos em seis corpos de prova.

Tabela 10: Ensaio de tração com poliéster

N=6	Deformação específica na ruptura [%]	Resistência [MPa]	MOE [PA]
Média	6,71	24,83	0,48
Desvio Padrão	±2,53	±9,36	±0,13
Coefficiente de variação	37,8%	37,7%	28,4%

4.4 Tração em compósitos

Os compósitos foram elaborados usando resina e dos tecidos como reforço, e em cada um deles foi determinada a porcentagem volumétrica dos componentes. Os dois tecidos de cada compósito foram dispostos orientando a direção das fibras nas três maneiras possíveis, ou seja, [0,0] ; [0,90] e [90,90]. Os ensaios foram conduzidos com a utilização de um transdutor de deslocamento para determinação do módulo de elasticidade do compósito.

4.4.1 Tração em compósito com tecidos dispostos [0,0]

Este compósito foi produzido usando duas lâminas de tecidos cujas fibras de sisal estavam alinhadas com o carregamento axial do ensaio [0,0]. A fração volumétrica foi de 79,49% para a matriz e 21,61% para o reforço.

Na figura 20 podem-se observar as curvas dos ensaios.

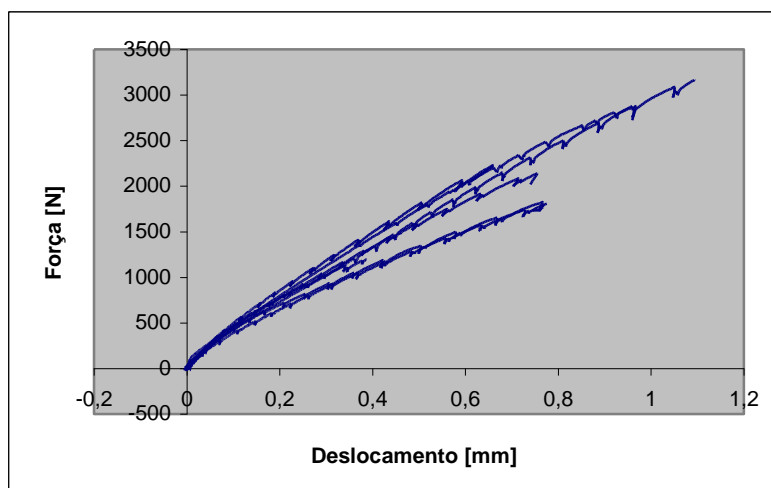


Figura 20: Ensaio de tração em compósito [0,0]

Os aspectos descontínuos das curvas de força-deslocamento estão relacionados às rupturas localizadas de uma ou mais fibras dos tecidos e a redistribuição dos esforços nas fibras ainda sem romper. Os estalos emitidos pelos corpos de prova durante o ensaio explicam-se por esses motivos.

Na Tabela 11 estão registrados os valores obtidos no ensaio.

Tabela 11. Resultados do ensaio de tração do compósito com tecidos dispostos [0,0]

N = 7	Força máxima [N]	Resistência à tração [MPa]	Deformação específica na ruptura [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
Média	2469,10	25,05	1,51	2,71
Desvio Padrão	±62,2	±7,22	±0,19	±0,54
Coefficiente de variação	2,52%	28,8%	12,58%	19,9%

No colapso se identifica a ruptura da matriz e de apenas algumas fibras do tecido. A maioria das fibras sofre escorregamento significativos como se observa na Figura 21



Figura 21: Corpos de prova de compósitos com fibra de sisal após ensaios de tração

O valor calculado para o módulo de elasticidade teórico conforme a equação (1) do capítulo 2.1 foi de 2,76 GPa, considerando uma fração volumétrica de 0,79 e 0,21 para a matriz e o reforço respectivamente. Este valor é 0,5% superior ao experimental (2,71GPa). A presença de vazios reduz a aderência das fibras à resina, a composição heterogênea das fibras naturais e a variabilidade de seção ao longo das fibras, X contribuem para entender essa diferença.

4.4.2 Tração em compósito com tecidos dispostos [90,90]

Este compósito teve os dois tecidos com as fibras de sisal perpendiculares ao carregamento axial do ensaio [90,90]. A fração volumétrica foi de 75,17% para a matriz e 24,83% para o reforço. Na Figura 22 podem-se observar as curvas força-deslocamento dos ensaios.

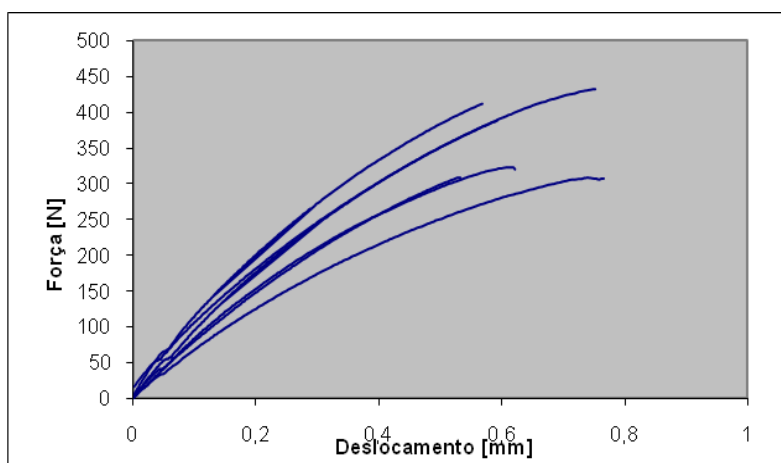


Figura 22: Ensaio de tração em compósito [90,90]

O aspecto das curvas dos ensaios apresenta comportamento com maior uniformidade, se comparado com as curvas observadas nos ensaios realizados com tecidos orientados conforme a direção axial do ensaio. Isso se deve ao fato da fratura ter acontecido na matriz antes de alcançar a tensão necessária para romper as fibras do reforço. Na Tabela 12 estão registrados os valores do ensaio.

Tabela 12: Resultados do ensaio de tração do compósito com tecidos dispostos [90,90]

N = 6	Força máxima [N]	Resistência à tração [MPa]	Deformação específica na ruptura [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
Média	361,41	4,19	1,31	0,388
Desvio Padrão	±56,11	±1,94	±0,60	±0,182
Coefficiente de variação	15,52%	46,36%	46,16%	46,80%

Todos os valores são inferiores aos dos ensaios do polímero sem reforço. O reforço assim disposto se comporta como defeito e fragiliza a matriz, reduzindo a resistência mecânica do compósito.

A baixa tensão, a matriz não é ancorada suficientemente pelas fibras e nela ocorrem deformações locais elevadas o que faz com que a aderência fibra-matriz se rompa e a resistência da matriz seja prejudicada pelas fibras.

O módulo de elasticidade teórico calculado pela equação (2) descrita na revisão bibliográfica (2.1) foi de 0,64 MPa, considerando uma fração volumétrica de 0,75 e 0,25 para a matriz e o reforço respectivamente. A diferença com a aqui obtida está explicada porque a equação teórica foi formulada para fibras sintéticas que possuem uma adesão à matriz maior do que as fibras vegetais. Tanto pela polaridade quanto na superfície externa.

O modo de ruptura deste compósito, assim como os anteriormente ensaiados, todos eles de fibras de sisal e matrizes em resina poliuretana, apresenta tipo de ruptura frágil. Na figura 23 estão os corpos de prova dos ensaios.

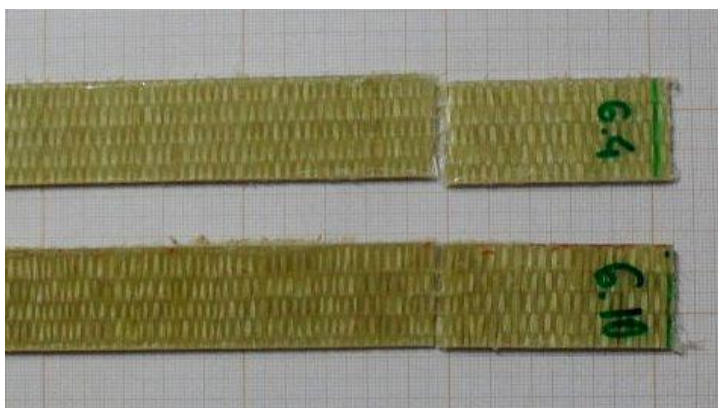


Figura 23: Corpos de prova dos ensaios de tração em compósito [90,90]

4.4.3 Tração em compósito com tecidos dispostos [0,90]

Este compósito teve um tecido cujas fibras de sisal estavam alinhadas com o carregamento axial do ensaio e outro tecido com as fibras dispostas perpendicularmente ao anterior [0,90]. A fração volumétrica foi de 90,61% para a matriz e 9,38% para o reforço. Pode-se notar um aumento da fração volumétrica da matriz em relação ao compósito [0,0]. Isto se deve a um menor acomodamento de um tecido em relação ao outro, criando espaços preenchidos pela resina da matriz. Na figura 24 podem-se observar as curvas dos ensaios.

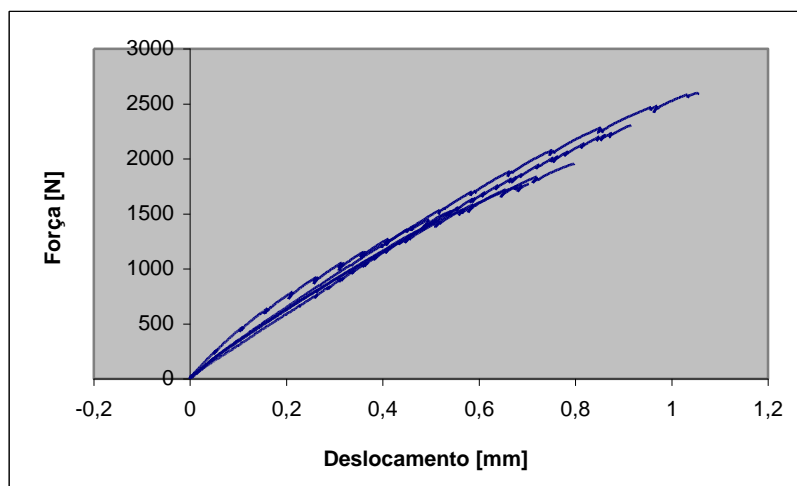


Figura 24: Ensaios de tração em compósito [0,90]

As curvas força-deslocamento apresentam forma intermediária entre os compósitos [0,0] e [90,90]. Na Tabela 13 estão os valores obtidos para os seis corpos de prova ensaiados.

Tabela 13. Resultados do ensaio de tração do compósito com tecidos dispostos [0,90]

N = 6	Força máxima [N]	Resistência à tração [MPa]	Deformação específica na ruptura [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
Média	2229,41	22,49	1,60	2,06
Desvio Padrão	±424,9	±12,42	±0,89	±1,26
Coefficiente de variação	20,93%	55,23%	55,5%	61,15%

Os valores obtidos neste compósito são menores que os obtidos no compósito onde os dois tecidos estavam alinhados com a direção do ensaio de tração. As fibras do tecido que estão perpendiculares à direção axial pouco contribuem na resistência à tração. A importância deste compósito se radica na ortotropia, isotropia biaxial, produto da disposição dos tecidos. Isto tem relação direta com os produtos e objetos que poderiam ser fabricados com este compósito, os quais devem como mínimo resistir biaxialmente. Este compósito, assim fabricado, teve uma espessura média de 3,2mm. A norma ASTM D3039 admite como espessura mínima 3mm para os corpos de prova.

O modo de ruptura foi frágil, sendo que a superfície da fratura aconteceu nas proximidades dos fios transversais. Carvalho (2005) explica que nesses lugares, só a

matriz e um dos tecidos resiste aos esforços axiais. Após a fratura, os fios do tecido alinhado com o esforço se separavam da matriz provocando grandes deslocamentos (Figura 25).



Figura 25: Corpos de prova com tecidos dispostos [0,90]

4.4.4 Tração em fibra de vidro [00]

O compósito foi elaborado com um tecido de fibra de vidro [0,0] e resina poliéster. Tanto na confecção do tecido como na elaboração do compósito, utiliza-se a mesma metodologia que a utilizada para a fibra de sisal. A finalidade deste tecido é fabricar com ele um compósito de características similares aos de sisal, para estabelecer comparações entre ambos e avaliar as diferenças de comportamento no ensaio de tração. A fração volumétrica foi de 68,58% para a matriz e 31,42% para o reforço. Foram ensaiados seis corpos de prova e na figura 26 pode-se observar as curvas dos ensaios.

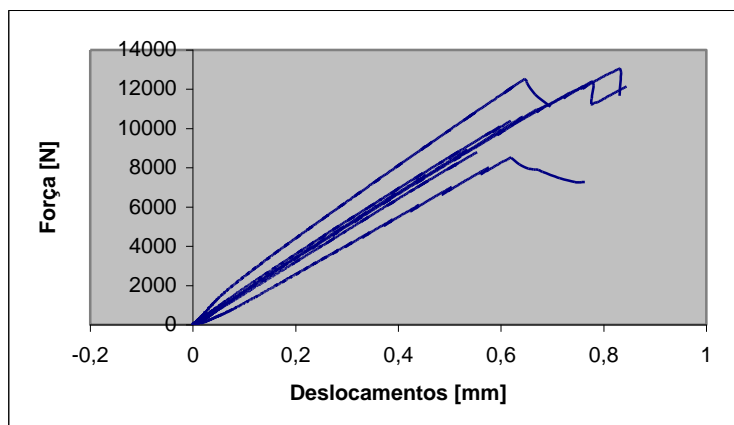


Figura 26: Ensaio de tração fibra de vidro

O aspecto das curvas dos ensaios apresenta comportamento uniforme com trechos lineares. Primeiramente acontece a fratura das fibras firmemente aderidas à matriz, as quais resistem à totalidade da carga aplicada. Depois a ruptura se propaga em zonas com presença de vazios na proximidade de algumas fibras e finalmente se produz o arrancamento das fibras que não conseguiram uma completa aderência da resina.

Na Tabela 14 estão registrados os valores do ensaio.

Tabela 14. Resultados do ensaio de tração do compósito em fibra de vidro.

N = 6	Resistência à tração [MPa]	Deformação específica na Ruptura [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
Média	197,4	1,57	16,32
Desvio Padrão	±38,73	±0,27	±3,93
Coefficiente de variação	23,34%	18,8%	24,11%

O módulo de elasticidade deste compósito em fiberglass é seis vezes maior que o do composto análogo com fibras de sisal elaborado nesta pesquisa. A deformação específica é de 1,57%. Já no compósito com fibras de sisal 1,51%. Esta comparação é de relevante valor nesta pesquisa devido aos objetivos propostos. Na Tabela 15 pode-se avaliar o desempenho mecânico entre compósitos.

Tabela 15. Comparação do desempenho dos compósitos

	Resistência à tração [MPa]	Deformação específica na Ruptura [%]	Módulo de elasticidade [GPa]
Poliéster-fibra de vidro	197,4	1,57	16,32
Poliéster-fibra de sisal	25,0	1,51	2,71

Nas Figuras 27 a) e b) pode-se observar que na fratura a fibra de vidro teve um comportamento similar ao sisal no que se refere a adesão entre matriz e reforço.



Figura 27 a) e b): Corpos de prova em fibra de vidro ensaiados à tração com fibras alinhadas na direção axial [0,0]

Após a ruptura alguns dos corpos de prova apresentaram escorregamentos significativos similares aos acontecidos com fibras de sisal in natura sem tratamentos.

Na intenção de avaliar a adesão das fibras de sisal à resina poliéster, foram efetuados ensaios de arrancamento (*pull-out*).

4.5 Ensaios de arrancamento (*Pull-out*)

Este ensaio é muito útil para avaliar a aderência entre as fibras e a resina. Pode-se verificar que em todos os compósitos já ensaiados à tração nesta pesquisa, não são poucas as fibras que rompem junto com a matriz na ruptura. A maior parte das fibras de reforço perde a aderência e se separam da matriz sem se romper. Para os ensaios foram preparados corpos de prova com uma base de resina poliéster e o extremo de apenas uma fibra de sisal submergida no meio. As medidas da base de resina do corpo de prova foram escolhidas em função das garras da máquina de ensaio, cuidando que as garras não comprimam a base de resina e junto com ela, a fibra submersa. As fibras escolhidas foram as de maior diâmetro médio encontradas no lote utilizado para confeccionar os tecidos ($0,064989\text{mm}^2 \pm 0,005$).

O comprimento extremo da fibra que ficou dentro da resina foi determinado experimentalmente, começando por 10mm. Com este comprimento submerso a fibra rompia fora da resina sem arrancar em 85% dos ensaios. Isto se explica porque a fibra não possui um diâmetro uniforme em todo seu comprimento, podendo romper no trecho mais fraco.

Nos testes seguintes, o comprimento foi reduzido em intervalos de 1mm. Foi verificado que entre 4 e 6mm em 80% dos ensaios a fibra se separava da matriz. Analisando por microscopia óptica os corpos de prova ensaiados, foram descartados aqueles em que a fibra não tinha sido completamente arrancada, restando parte dela na matriz. Na figura 28 pode-se observar a fotografia de um corpo de prova após o arrancamento total da fibra e na Figura 29 pode-se observar as curvas dos ensaios.



Figura 28: Corpo de prova de ensaio de arrancamento. Fotografia de microscopia óptica

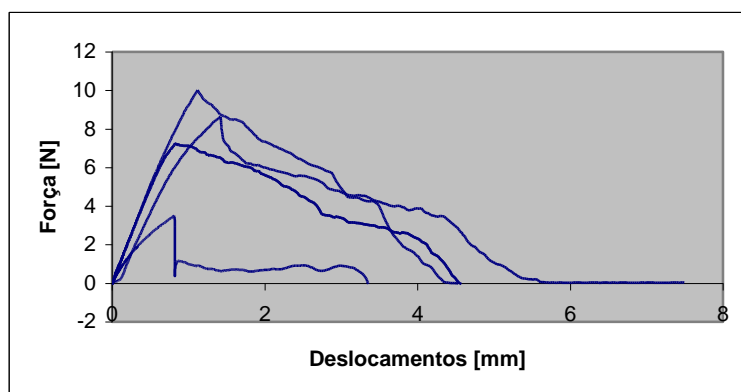


Figura 29: Ensaios de arrancamento (*pull-out*) em fibras de sisal e resina poliéster

O trecho linear inicial corresponde à resistência da aderência da fibra na resina. Alcançado o ponto de máxima resistência, começa-se o arrancamento que culmina no desprendimento total. Na tabela 16 são apresentados estão os valores do ensaio.

Tabela 16. Resultados do ensaio de arrancamento (*pull-out*) em fibras de sisal e resina poliéster

N=12	Área [mm ²]	Força máxima [N]	Tensão de aderência τ [MPa]
Média	2,52	7,19	2,87
Desvio Padrão	±0,47	±2,73	±1,22
Coefficiente de variação	18,71	37,98	45,52

A área considerada na tabela é a da superfície lateral do extremo da fibra submergida na resina. A tensão de aderência ou adesão mede a resistência no ponto em que começa o arrancamento. A média da tensão obtida nos ensaios ficou 10% acima dos valores da revisão bibliográfica **2.3.1** (Mochnacz *et al.*2002).

4.6 Determinação do índice de vazios do compósito

A eficiência do método por laminação manual utilizado para fabricar os compósitos desta pesquisa pode-ser avaliada pela ausência de bolhas de ar aprisionadas dentro do compósito, chamada também de índice de vazios. O cálculo de vazios foi determinado a partir da medida de densidade por picnometria do compósito em relação à medida teórica. A diferença de densidades indica o conteúdo dos vazios.

Os valores da densidade medida em amostras de todos os compostos elaborados com fibra de sisal e resina poliéster elaborado para este trabalho resultaram de um valor médio de 1,1385 g/cm³. O valor teórico médio calculado nas mesmas amostras resultou de 1,1466 g/cm³. Com estes valores foi calculado o índice de vazios conforme a Norma ASTM D2734. O índice de vazios médio resultante foi de 0,71%. A norma avalia como de boa qualidade os compósitos cujo índice de vazio é igual a 1% ou menor.

Do ponto de vista do desempenho mecânico, a tensão máxima do compósito aumentou e a deformação na tensão máxima diminuiu quando a porosidade foi reduzida como confirmam os estudos de MADSEN B.(2003).

Nos compósitos elaborados com resina poliéster e fibra de vidro, os valores da densidade medida tiveram um valor médio da densidade de $1,4706 \text{ g/cm}^3$. O valor teórico médio calculado nas mesmas amostras resultou em $1,4813 \text{ g/cm}^3$. O índice de vazios médio resultante foi de 0,72%.

4.7 Ensaios de flexão em compósitos

Os ensaios de flexão foram realizados para verificar o desempenho dos compósitos resina poliéster-sisal, avaliar o módulo de ruptura à flexão (MOR) e o módulo de elasticidade à flexão (MOE). Os compósitos foram elaborados com resina e dois tecidos como reforço. Em cada um deles foi determinada a porcentagem volumétrica dos componentes. Os dois tecidos de cada compósito foram dispostos orientando a direção das fibras nas três maneiras possíveis, ou seja, [0,0] ; [0,90] e [90,90].

O comprimento dos corpos de prova foi de 63mm, a largura de 12,5mm e a espessura de 2,5mm. A distância entre apoios foi de 53mm.

O módulo de ruptura à flexão (MOR) foi calculado 5% menor que a tensão máxima registrada no ensaio, conforme a equação 16:

$$\text{MOR} = 3 P \ell / 2 b e^2 \quad (16)$$

sendo MOR = módulo de ruptura à flexão

P = Força [N]

ℓ = distancia entre apoios

b = largura do corpo de prova

e = espessura .

O módulo de elasticidade à flexão (MOE) foi determinado pela equação 17:

$$\text{MOE} = \ell^3 m / 4 b e^3 \quad (17)$$

sendo MOE = módulo de elasticidade à flexão

ℓ = distancia entre apoios

b = largura do corpo de prova

e = espessura

m = coeficiente angular da reta inicial

O coeficiente angular da reta inicial (m) foi calculado ao longo da curva de ensaio de flexão, com valores de tensão-deformação situados entre o 20% e 80% do limite de proporcionalidade do período linear inicial, período elástico, das curvas de ensaio.

Foi utilizada a equação 18 da geometria analítica para calcular o valor do coeficiente angular ou tangente(m).

$$m = (P_2 - P_1) / (\delta_2 - \delta_1) \quad (18)$$

sendo P_2 = valor da força correspondente ao deslocamento δ_2

P_1 = valor da força correspondente ao deslocamento δ_1

δ_2 = deslocamento 80% do limite de proporcionalidade

δ_1 = deslocamento 20% do limite de proporcionalidade

4.7.1 Flexão em compósitos com tecidos [0,0]

Este compósito teve os dois tecidos com as fibras de sisal alinhadas com o comprimento do corpo de prova [0,0]. A fração volumétrica foi de 87,99% para a matriz e 12,01% para o reforço.

Na figura 30 podem-se observar as curvas dos ensaios.

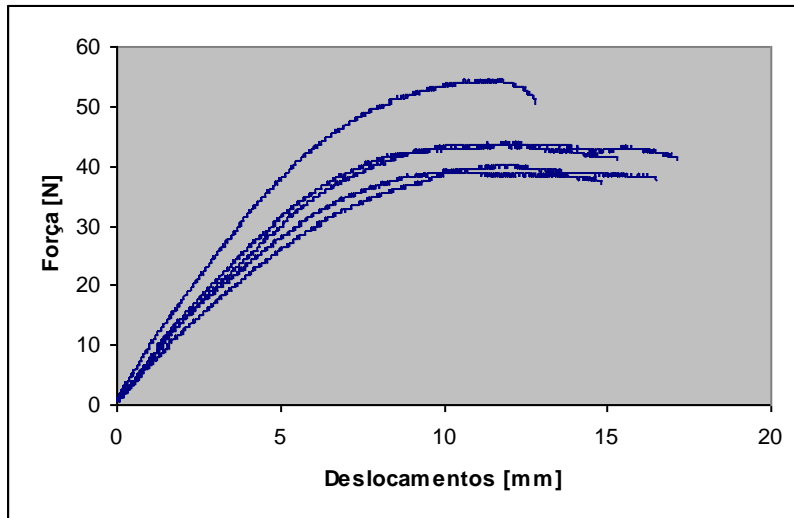


Figura 30: Ensaio de flexão em compósito [0,0]

É possível observar três trechos:

- 1- A tensão aumenta linearmente
- 2-. A tensão continua aumentando, mas a tendência não é linear devido a alguns parâmetros estruturais, notadamente a orientação dos componentes mais fortes da parede das células maiores da fibra. A parte não linear pode ser interpretada como uma deformação elasto-visco-plástica da fibra, especialmente da parede celular mais espessa. Este tipo de resposta à deformação é provavelmente o resultado do rearranjo das partes amorfas da parede (composta principalmente de pectina e hemicelulose), se provocado pelo alinhamento das microfibras de celulose com o eixo de tração (Charlet K. 2009).
- 3- A tensão chega a um platô, mas a fratura não acontece. A tensão desce provavelmente por microfissuras entre as camadas do laminado. Trata-se de uma delaminação que acontece em laminados de materiais compósitos.

Na Tabela 17 estão os valores obtidos para os seis corpos de prova ensaiados.

Tabela 17. Resultados do ensaio de flexão do compósito com tecidos dispostos [0,0]

N=6	Carga máxima de ruptura [N]	MOR [MPa]	MOE [GPa]
Média	44,58	38,81	1,16
Desvio Padrão	±13,44	±13,44	±16,45
Coefficiente de variação	39,54	34,42	1,01

4.7.2 Flexão em compósitos com tecidos [90,90]

Este compósito teve dois tecidos cujas fibras de sisal estão perpendiculares com o carregamento axial do ensaio. A fração volumétrica foi de 87,99% para a matriz e 12,01% para o reforço.

Na Tabela 18 estão os valores obtidos para os seis corpos de prova ensaiados.

Tabela 18. Resultados do ensaio de flexão do compósito com tecidos dispostos [90,90]

N=6	Carga máxima de ruptura [N]	MOR [MPa]	MOE [GPa]
Média	13,75	11,97	0,32
Desvio Padrão	±20,90	±20,90	±34,15
Coefficiente de variação	9,54	8,31	0,232

Assim como nos ensaios de tração, o compósito com as fibras dos tecidos perpendiculares ao comprimento do corpo de prova, os valores obtidos são bem menores que quando as fibras estão alinhadas com o comprimento do corpo de prova.

Observando a ruptura constatou-se que esta se produz entre meio das mechas das fibras, onde no compósito predomina a matriz.

4.7.3 Flexão em compósitos com tecidos [0,90]

Este compósito teve um tecido cujas fibras de sisal estavam alinhadas com o comprimento do corpo de prova e o outro tecido com as fibras dispostas perpendicularmente ao anterior [0,90].

A fração volumétrica foi de 87,99% para a matriz e 12,01% para o reforço.

Na figura 31 podem-se observar as curvas dos ensaios.

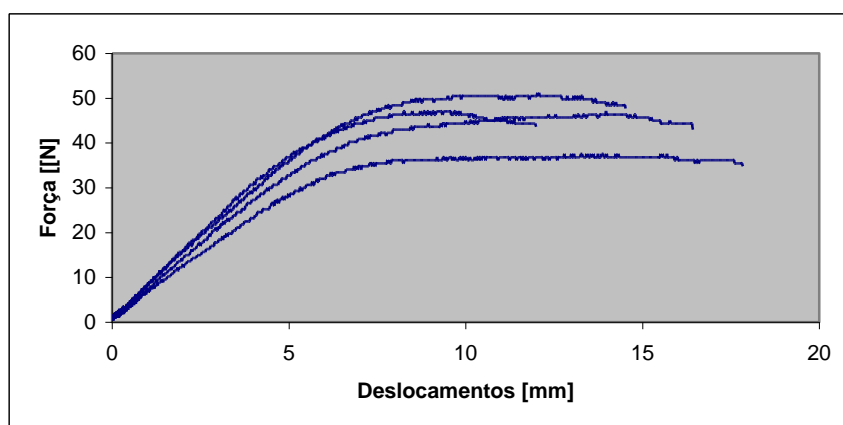


Figura 31: Ensaio de flexão em compósito [0,90]

As curvas chegam a um valor máximo e se estabilizam nesse valor, apenas aumentando a deformação.

Na Tabela 19 estão os valores obtidos para os seis corpos de prova ensaiados.

Tabela 19 . Resultados do ensaio de flexão do compósito com tecidos dispostos [0,90]

N=6	Carga máxima de ruptura [N]	MOR [MPa]	MOE [GPa]
Média	45,67	39,76	1,13
Desvio Padrão	±12,66	±12,66	±8,95
Coefficiente de variação	37,49	32,64	1,06

4.7.4 Flexão em compósitos de fibra de vidro

O compósito foi elaborado com um tecido de fibra de vidro [0,0] e resina poliéster. Tanto na confecção do tecido como na elaboração do compósito, foram observados métodos idênticos que os utilizados para a fibra de sisal.

A finalidade deste tecido é fabricar com ele um compósito de características similares aos de sisal para estabelecer comparações entre ambos e avaliar as diferenças de comportamento no ensaio de flexão.

A fração volumétrica foi de 72,25% para a matriz e 27,75% para o reforço.

Foram ensaiados seis corpos de prova e na figura 32 podem-se observar as curvas dos ensaios.

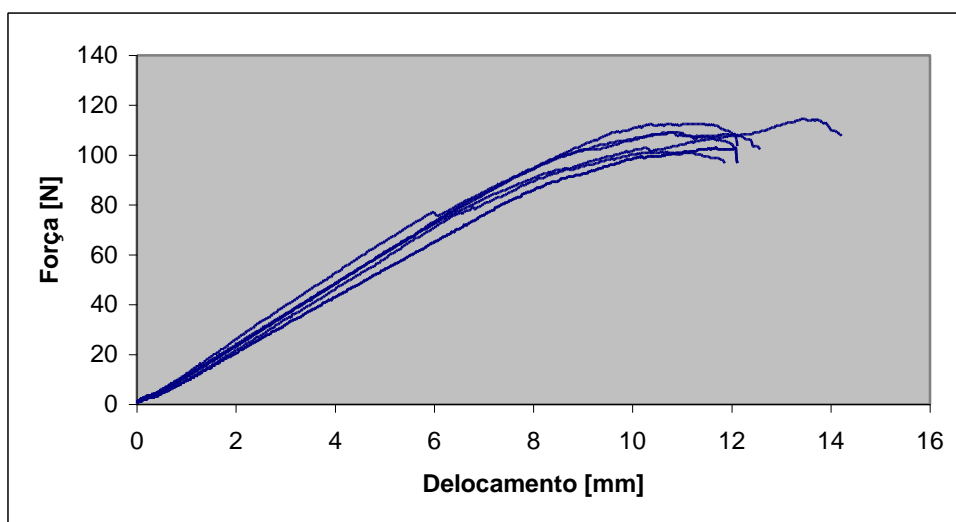


Figura 32: Curvas do ensaio de flexão com fibra de vidro [0,0]

As curvas dos ensaios mostram uma tendência similar às de sisal, mas depois de um plateau a fratura sempre acontece. Finalmente as camadas se separam pelo fenômeno da delaminação ou separação entre as lâminas que culmina com o colapso do material.

Na Tabela 20 estão os valores obtidos para os nove corpos de prova ensaiados.

Tabela 20 . Resultados do ensaio de flexão do compósito com fibra de vidro [0,0]

N=9	Carga máxima de ruptura [N]	MOR [MPa]	MOE [GPa]
Média	110,7	96,33	2,016
Desvio Padrão	±7,23	±6,29	±0,027
Coefficiente de variação	6,53	6,52	1,35

O módulo de elasticidade deste compósito em fibra de sisal é 57% menor que o composto análogo com fibras de vidro elaborado nesta pesquisa. Esta comparação pode ser avaliada na tabela 21 sendo de relevante valor nesta pesquisa devido aos objetivos propostos.

Tabela 21: Comparação do desempenho dos compósitos à flexão

	Carga máxima de ruptura [N]	MOR [MPa]	MOE [GPa]
Poliéster-fibra de vidro	110,7	96,33	2,016
Poliéster-fibra de sisal	44,58	38,81	1,160

4.8 Custos dos compósitos

O custo dos materiais do compósito com fibra de sisal foi calculado com os seguintes parâmetros inseridos na equação (12):

- composições por peso dentro do laminado, sendo 0,8432 para a resina poliéster e 0,1568 para a fibra de sisal
- densidade do compósito : 1,1385 g/cm³

- preço da resina: R\$ 8,00 por Kg
- preço da fibra de sisal: R\$ 1,04 por Kg

Os valores obtidos são:

Custo da resina utilizada no compósito..... R\$ 7,68
 Custo da fibra de sisal utilizada no compósito R\$ 0,18

O custo direto do compósito com resina poliéster e fibras de sisal para um laminado de 1m^2 de área e 1mm de espessura resultou conforme a equação (13):

Custo direto total (com fibras de sisal).....R\$ 7,86

Já o custo dos materiais do compósito com fibra de vidro foi calculado com os seguintes parâmetros inseridos na equação (12):

- composições por peso dentro do laminado, sendo 0,5316 para a resina poliéster e 0,4684 para a fibra de vidro
- densidade do compósito: $1,4706\text{ g/cm}^3$
- preço da resina: R\$ 8,00 por Kg
- preço da fibra de vidro: R\$ 11,50 por Kg

Os valores obtidos são:

Custo da resina utilizada no compósito.... R\$ 6,25
 Custo da fibra de vidro utilizada no compósito R\$ 7,92

O custo direto do compósito com resina poliéster e fibra de vidro para um laminado de 1m^2 de área e 1mm de espessura resultou conforme a equação (13):

Custo direto total (com fibra de vidro).....R\$ 14,17

Pode-se observar que, para volumes semelhantes, o fiberglass custa 80% a mais que o compósito elaborado com fibras de sisal.

As eficiências dos compósitos com fibra de sisal (μ_{FS}) e com os de fibra de vidro (μ_{FV}) resultou de dividir o módulo de elasticidade à flexão pelo custo do compósito conforme a equação (14).

$$\mu_{FS} = \text{MOE}_{FS} / \text{Custo} = 1,160 / 7,86 = 0,1476$$

$$\mu_{FV} = \text{MOE}_{FV} / \text{Custo} = 2,016 / 14,17 = 0,1422$$

Finalmente, o fator de conveniência (v) foi calculado mediante a equação (15) como uma fração dos fatores de eficiência.

$$v = \mu_{FV} / \mu_{FS} = 0,1422 / 0,1476 = 0,96$$

O fator de conveniência menor que 1 mostra que é conveniente usar fibra de sisal em vez de fibra de vidro do ponto de vista da rigidez quando a estrutura é submetida a solicitações de flexão.

O módulo de elasticidade à tração do compósito aqui estudado tem um valor seis vezes menor que o da fibra de vidro. Pode-se concluir que quando as peças ou objetos a fabricar estão submetidos a grandes esforços, a espessura deve aumentar, comprometendo significativamente o custo.

Portanto, considera-se importante que os projetistas desenvolvam designs que aumentem o desempenho da estrutura, substituindo superfícies planas por curvas quando possível e reforçando com nervuras para conseguir a resistência e rigidez requerida pela estrutura.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou a viabilidade da substituição de fibras de vidro por fibras de sisal em compósitos com resinas poliéster termofixas, na produção por moldagem manual.

O tecido com fibras de sisal para reforço de um compósito com matriz poliéster termofixa desenvolvido neste trabalho facilitou a fabricação dos compósitos. No tecido unidirecional as fibras permaneceram retas em todo o comprimento da trama, obtendo assim melhor aproveitamento das propriedades mecânicas. Pelo fato de ser tecido com fina espessura ele permite o acomodamento das fibras dentro do compósito e um laminado compacto que pode moldar-se às necessidades geométricas dos moldes das peças a fabricar complexas.

O tear de pente fino necessário para fabricar o tecido pode aproveitar a mão de obra local e tem um custo acessível para pequenas fábricas ou cooperativas. Este compósito permite fabricar uma diversidade de peças e objetos onde o custo das mesmas é mais importante que a resistência mecânica. Também apresenta custos de materiais menores em peças submetidas a flexão. Isto confirma que os compósitos de fibras naturais têm potencial para substituir a fibra de vidro em muitas aplicações que não requerem capacidades de carga elevadas.

O método de laminação manual é adequado às condições sociais e humanas disponíveis nas regiões produtoras de sisal. Os produtos fabricados por moldagem manual em fibra de vidro têm uma espessura igual ou superior a 3mm. Só as telhas onduladas para iluminação são uma exceção a esta medida mínima. Portanto, a espessura do compósito com fibras de sisal é compatível com os de fibra de vidro e se necessário, fabricado em espessuras menores. Com a laminação manual podem ser obtidos compósitos com baixo teor de vazios aproveitando o máximo desempenho mecânico do compósito.

A resina poliéster apresenta comportamento mecânico e uma adesão ao reforço adequado à fabricação de peças e objetos, onde o custo é o fator preponderante.

As fibras in natura, sem tratamento, mostraram um desempenho no compósito satisfatório. Os tratamentos a que podem ser submetidas às fibras aumentam a

transferência de tensões no compósito, mas deve ser suficiente para compensar o aumento de custos e da complexidade de produção.

O reduzido custo da fibra de sisal comparado a outros reforços permite uma alta competitividade dentro do mercado consumidor. Também, apresenta custos de materiais menores em peças submetidas à flexão. Isto confirma que os compósitos de fibras naturais têm potencial para substituir o vidro em muitas aplicações que não requerem capacidades de carga muito altas.

A conclusão após os estudos teóricos e experimentais confirma que o compósito é viável. A tecnologia utilizada para desenvolvê-lo também correspondeu aos fins propostos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Cabe destacar que os tratamentos a que podem ser submetidas as fibras aumentam a transferência de tensões no compósito, e o ganho permitiria aumentar a sua resistência mecânica. Com uma maior resistência, as espessuras do laminado podem ser reduzidas utilizando menor quantidade de material. Portanto, considera-se importante que sejam desenvolvidos tratamentos simples e de baixo custo adaptados às possibilidades de pequenas fábricas ou cooperativas.

O emprego de recursos renováveis no preparo de novos materiais deve considerar aspectos econômicos e suas conseqüências financeiras. Portanto, considera-se importante que sejam desenvolvidos estudos específicos avaliando as propriedades físicas da bucha de sisal para utilizá-la como reforço em materiais compósitos.

6. BIBLIOGRAFIA

ADAMS D.F., CARLSSON L.A., PIPES R.B. **Experimental characterization of advanced composite materials**. CRC Press, 3rd. ed. 2003.

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

ALBUQUERQUE A. C.; JOSEPH, K.; CARVALHO, L. H.; D'ALMEIDA, J. R. M. **Effect of wettability and ageing conditions on the physical and mechanical properties of uniaxially oriented jute-roving-reinforced polyester composites**. Composites Science and Technology, n. 60, p. 833-844. 2000.

AMICO S.C., COSTA T. H. S., CARRERA L.C., SANTANA W., GALVÃO D.A. **Caracterização de Fibras de Sisal da Região Nordeste do Brasil**. XVI Congresso Brasileiro De Engenharia Mecânica, 2001.

BEZERRA, E. M. ; JOAQUIM, A. P. ; SAVASTANO JUNIOR, H. ; JOHN, V. M. ; AGOPYAN, V. . **The effect of different mineral additions and synthetic fibre contents on properties of cement based composites**. Cement & Concrete Composites, v. 28, n. 6, p. 555-563, 2006.

CADY, W.M. **Radar Scanners and Radomes**. MIT , 2004. disponível em <http://www.archive.org/details/radarscannersand033384mbp> Acesso em 15 de Janeiro 2009.

CARVALHO, R.F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira**. Tese de doutorado apresentada à área interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais da USP, Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos e Instituto de Química de São Carlos. São Carlos, 119 p., 2005.

CALLISTER, W.D. - **Ciência e Engenharia dos Materiais**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC S.A., 2002.

COMPANIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO-CONAB, disponível em <http://www.atarde.com.br/economia/noticia.jsf?id=1242664> Acesso em 16 de Março 2010.

CHARLET K., S. EVE S., JERNOT J.P., GOMINA M., BREARD J., **Tensile Deformation of a Flax Fiber**, Proc Eng **1**, pp. 233–236. (2009).

DE ANDRADE SILVA F, ZHU D., MOBASHE B., SORANAKOM C. e ROMILDO DIAS TOLEDO R. F. **High Speed Tensile Behavior of Sisal Fiber Cement Composites**. Materials Science and Engineering: A Volume 527, Issue 3, 15 January 2010, Pages 544-552.

DI BELLA, G; FIORE, V; VALENZA, A Effect of Areal Weight and Chemical Treatment on the Mechanical Properties of Bidirectional Flax Fabrics Reinforced Composites. MATERIALS & DESIGN Volume: 31 Issue: 9 Pages: 4098-4103, 2010.

ECOLMEIA. Disponível em www.ecolmeia.com/ecologia/carbono.htm Acesso em: Março 2009.

FERREIRA, C. **Metodologia Para as Fases de Projeto Informal e Conceitual de Componentes de Plástico Injetados Integrando os Processos de Projeto e Estimativa de Custos** . Tese de Doutorado. 2002.

FERREIRA, F. ; CURVELO, A.A.S. ; MATTOSO, L. H. C. . **Sisal Fiber: Morphology And Applications In Polymer Composites**. In: Elisabete Frollini; Alcides Lopes Leão; Francisco X. Carvalho; H. Tan. (Org.). Lignocellulosics - Plastics Composites. 1 ed. São Carlos: USP/UNESP, , v. 1, p. -.1997.

FINKLER M.; PATRÍCIA SCAPINI; ESTEVÃO FREIRE; ADEMIR J. ZATTERA; MARA ZENI, **Polímeros** vol.15 no.3 São Carlos July/Sept. 2005.

FUJII, T. - J. Jpn. Soc. Comp. Mater, 1, 35, 1975.

GAY, D. Matériaux Composites. Paris: Editions Hermès, 1991

GORDON, J.E., **The New Science of Strong Materials**: 2nd Edition, Pelican, 1976.

GUIMARÃES Suely.- **Utilização de Fibras Vegetais no Fibro-Cimento e no Concreto-Fibra.** Centro de Pesquisas e Desenvolvimento – CEPED, 1982.

HULL D., CLYNE T.W. **An Introduction to Composite Materials** Ed. Cambridge University Press. Second Edition 1996.

IDICULA, M.; MALHOTRA, S. K.; JOSEPH, K.; THOMAS S.. **Dynamic mechanical analysis of randomly oriented intimately mixed short banana/sisal hybrid fibre reinforced polyester composites.** Composites Science and Technology, n. 65, 2005, p. 1077-1087. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 23 março 2009.

JOSEPH P.V., MATHEW G., JOSEPH K., GROENINCKX G., THOMAS S. **Dynamic Mechanical Properties of Short Sisal Fibre Reinforced Polypropylene Composites** Applied Science and Manufacturing, Volume 34, Issue 3, 1 March 2003, Pages 275-290.

KIM JUNG-TAE e NETRAVALI A.N. - **Mercerization of Sisal Fibers: Effect of Tension on Mechanical Properties of Sisal Fiber and Fiber-Reinforced Composites.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing Volume 41, Issue 9, September 2010, Pages 1245-1252.

KURUVILLA J.; ELITON S. MEDEIROS E CARVALHO L.H. - **Compósitos de Matriz Poliéster Reforçados por Fibras Curtas de Sisal.** Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-281999000400023&script=sci_arttext&tlng=e> .Acesso em 30 janeiro 2009.

Li Y., YIU-WING MAI, LIN YE - **Sisal Fibre and its Composites: A Review of Recent Developments** Composites Science and Technology Volume 60, Issue 11, August 2000, Pages 2037-2055

LIMA, P. R. L. **Análise Teórica e Experimental de Compósitos Reforçados com Fibra de Sisal** [Tese - Professor UEFS] / 2004.

MADSEN, B.; LILHOLT H., **Physical and mechanical properties of inidirectional plant fibre composites-an evaluation of the influence of porosity.** Composites Science and Technology 63 (2003).

MANO, E. B. ; NUNES, R. C. R. . **Compósitos**. Rev. Quim. Industrial, Rio de Janeiro-RJ, v. 59, n. 68, p. 19-20, 1990.

MARINELLI A.L., MONTEIRO M.R., AMBRÓSIO J.D., BRANCIFORTI M.C., KOBAYASHI M., NOBRE A.D. **Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade: Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica**, 2007. Disponível em <www.scielo.br/pdf/po/v18n2/a05v18n2.pdf > Acesso em 20 fevereiro 2009.

MARTIN, AR; MARTINS, MA; MATTOSO, LHC, *et al.* **Chemical and Structural Characterization of Sisal Fibers from Agave sisalana Variety**. POLIMEROS-CIENCIA E TECNOLOGIA Volume:19 Issue:1 Pages: 40-46 Published: JAN-MAR 2009

MEDEIROS M.A.R., **Propriedades Mecânicas de Compósitos de PVC Reciclado Reforçados com Fibras de Sisal e de Nylon 6**. Salvador – BA. Dissertação (mestrado). MEAU Escola Politécnica UFBA. 2006.

MICHAUD, F. **Rhéologie de Panneaux Composites Bois/thermoplastiques sous Chargement Thermomécanique: Aptitude au Postformage**. Thèse pour l'obtention du grade de Docteur és Sciences en l'Université Bordeaux, France, 2003. Disponível em: <www.theses.ulaval.ca.> Acesso em: 23 março 2009.

MOCHNACZ S., AMICO S.C., SYDENSTRICKER T.H.D. **-Caraterização e modificação superficial de fibras de sisal para utilização em compósitos poliméricos**, 2002. Disponível em: <http://demec.ufpr.br/grupo_de_polimeros/sulmat2002.pdf> Acesso em 5 março 2009

NOORUNNISA KHANAM P.,RAMACHANDRA REDDY G., RAGHU K., VENKATA NAIDU S. **Composites Tensile, Flexural, and Compressive Properties of Coir/Silk Fiber-reinforced Hybrid**. JOURNAL OF REINFORCED PLASTICS AND COMPOSITES, vol. 26 no. 10 1065-1070. July 2007

OWENSCORNING Disponível em <www.owenscorning.com.br/intro.asp> Acesso em 12 janeiro 2009

PAHL, G and BEITZ, W. **Enginneering Desing. Berlim**. Springer Verlag. 1996.

PARAMASIVAN, V. AND A.P.J. ABDULKALAM, **Fibre. Science and Technology.**
Vol 7, Abril 1985

PARDINI, L. C- **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia** - São Paulo, SP:
Edgard Blücher, 2006.

PAVITHRAN, C.; MUKHERJEE, P. S.; BRAHMAKUMAR, M. AND
DAMODARAN, A. D. - **J. Material Science. Lett., Vol.7, 1882.**

SABEEL AHMEDA K., VIJAYARANGANB S. **Tensile, flexural And Interlaminar
Shear Properties Of Woven Jute And Jute-Glass Fabric Reinforced Polyester
Composites** Journal of Materials Processing Technology 207 (2008) 330–335

SILVA C. C. et al. **Desenvolvimento de Tecidos de Sisal para Utilização em
Compósitos Poliméricos** Artigo IV CONGIC-IFRN, 2009

SREEKUMAR P.A., THOMAS S.P., *et al.* **Effect of Fiber Surface Modification on
the Mechanical and Water Absorption Characteristics of Sisal/Polyester
Composites Fabricated by Resin Transfer Molding** Composites Part A: Applied
Science and Manufacturing Volume 40, Issue 11, November 2009, Pages 1777-1784

STEWART D.; AZZINI, A. *et al.* **Sisal fibres and their constituent non-
cellulosic polymers.** Industrial Crops and Products, n.6, p.17-26, 1997.

THUESEN, H.G. e FABRYCKY, W.J. **Engineering Economy.** 3aEdition. Prentice-
Hall Inc. 1989.

VAZQUEZ-RODRIGUEZ, JM; FRANCO HERRERA, PJ; GONZALEZ CHI-PI,
**Analysis of the interface between a thermoplastic fiber and a thermosetting matrix
using photoelasticity.** Composites Part A: Applied Science and Manufacturing
Volume 38, Issue 3, Pages 819-827, March 2007

WAMBUA P., IVENS J., VERPOEST I. **Natural fibers: Can They Replace Glass in
Fbre Reinforced Plastics.** Compos. Sci. Technol. 63, 1259–1264. 2003.