UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS

Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira

RICARDO FERNANDES CARVALHO

Tese apresentada à Área Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Carlito Calil Júnior

São Carlos 2005



AGRADECIMENTOS

- Ao professor Dr. Carlito Calil Júnior pela orientação, pela amizade, confiança e apoio contínuos.
- À Universidade Federal da Bahia pela liberação das atividades e em especial aos professores do Departamento de Construção e Estruturas que incentivaram o trabalho e assumiram as atividades durante meu afastamento.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de pessoal do Ensino Superior (CAPES) pela bolsa.
- À Associação dos Pequenos Agricultores do Município de Valente (APAEB) pelo tecido fornecido, transporte e a especial atenção dispensada a este projeto.
- À Produtos Químicos do Nordeste LTDA (PROQUINOR) pelo fornecimento de resina poliuretana e a atenção dispensada a este projeto.
- A Barracuda Tecnologies & Products LTDA pelo fornecimento de parte das resinas epóxi e atenção dispensada a este projeto.
- Aos amigos e companheiros de trabalho: à colega das fibras vegetais Rosana Silva, ao Irmão Alexandre Miná, ao Tio Moreira, ao mestre de tantas lutas Marcos Turci, aos que iniciam uma nova jornada Thalita Fontes e Caio, pela tranquilidade contagiante do Fabrício e a alegria do Sérgio.
- Aos companheiros do LAMEM, Jaime pela presteza, suporte e paciência, Bragatto, Samuel, Arnaldo, Tânia, Cido, Silvio e Roberto.
- A Érica e Elizabeth que tornaram o inicio e o final desta jornada menos tortuosos.

Meus agradecimentos

SUMÁRIO

1.	Inti	odução	1
1.1	l Ob	jetivos	7
1	.1.1	Gerais	
1	.1.2	Específicos	8
1.2	2 Es	copo da pesquisa	9
1.3	3 Co	ntribuição científica	9
2.	Rev	isão bibliográfica	11
2.1		teriorações de elementos de madeira	
2.2		forço de elementos estruturais de madeira	
	2.2.1	Reforço e restauração	
_	2.2.2	O material madeira	
2.3	3 Co	mpósitos	
2	2.3.1	Micromecânica dos compósitos reforçados com	arranjos
2	2.3.2	Conformação de laminados estruturais	32
2.4	4 Te	cidos de sisal	36
2	2.4.1	Tecelagem	40
2	2.4.2	Tratamento das fibras	45
2	2.4.3	Poliuretanas (PU)	47
2	2.4.4	Resina Epóxi (EP)	50
2.5	5 Co	lagem	53
2.6	6 Co	nsiderações sobre a revisão bibliográfica	56
3.	Mat	eriais e métodos	57
3.1	Те	cido de sisal	57
3	3.1.1	Tratamentos dos tecidos	59
3.2	2 Po	liuretanas	60
3.3	В Ер	óxi	62
3.4	4 En	saios físicos	63
3	3.4.1	Densidade por picnometria de hélio	64
3	3.4.2	Microscopia óptica	64
3	3.4.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	64
3 5	5 En	saios mecânicos	66

	3.5.1	Tração em fibras têxteis e fios	66
	3.5.2	Tração em tecidos e compósitos	66
	3.5.3	Emenda submetida ao cisalhamento	67
	3.5.4	Flexão em vigas	69
	3.6 Pro	cessamento dos compósitos	. 69
	3.6.1	Impregnação	70
	3.6.2	Compactação	71
4	. Resu	ıltados e discussão	73
	4.1 Fib	ras, fios e tecidos	. 73
	4.1.1	Tração em fibras vegetais.	73
	4.1.2	Tração em fios	75
	4.1.3	Tração em tecidos	78
	4.2 Cor	npósitos sisal - poliuretanas (PU)	. 80
	4.2.1	Sisal - PU bicomponente (GQATP)	81
	4.2.2	Sisal - PU bicomponente, AMU301	82
	4.2.3	Sisal - PU monocomponente (GQAMR)	83
	4.2.4	Sisal - PU (GQAMR), sem aditivo, imersão	85
	4.2.5	Sisal - PU (GQAMR), com aditivo, imersão.	86
	4.2.6	Interfaces entre a poliuretana e o sisal	87
	4.2.7	Avaliação geral dos compósitos de sisal e poliuretanas	88
	4.3 Cor	npósitos sisal - epóxi (EP)	. 89
	4.3.1 pincelam	Tecido comercial de sisal (telinha) – EP/AR300, impregnados ento	
	4.3.2	Sisal – EP/AR300, impregnado por pincelamento	90
	4.3.3	Sisal - EP/AR300, impregnado por imersão	92
	4.3.4	Tecido de sisal tratado - EP/AR300, impregnado por imersão	94
	4.3.5	Sisal - EP/AR300, compactado à vácuo	96
	4.3.6	Modos de ruptura	98
	4.3.7	Micromecânica aplicada ao compósito sisal-EP	99
	4.4 Lig	ações por cisalhamento em madeira	101
	4.5 Ref	orço em madeiras submetidas à flexão	102
	4.6 Inte	erfaces madeira-epóxi-sisal	104
5	. Cond	clusões 1	07
_		estões para trabalhos futuros	
	Č		

6.	Bibliografia	112
6.1	Referência bibliográfica	112
6.2	Bibliografia consultada	118

PUBLICAÇÕES

- CARVALHO, Ricardo Fernandes; CALIL Jr, Carlito. Compósitos de fibras de sisal para reforço de estruturas de madeira In: EBRAMEM. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, Cuiabá. IX EBRAMEM. Universidade Federal de Goiás, 2004.
- CARVALHO, Ricardo Fernandes; CALIL Jr, Carlito. Compósitos de fibras de sisal para reforço de estruturas de madeira. In: 1º CONGRESSO IBÉRICO DE MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, 2004, Guimarães. A madeira na Construção. 2004. v. Único, p. 459-468.
- CARVALHO, Ricardo Fernandes; CALIL Jr, Carlito. Resistência à tração de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas. In: EBRAMEM. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, Uberlândia. VIII EBRAMEM. Universidade Federal de Uberlândia, 2002.
- CARVALHO, Ricardo Fernandes; CALIL Jr, Carlito; HERNANDES, Antônio Carlos. Resistência à tração de compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira. In: ABM ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2003, Rio de Janeiro. 58º Congresso Anual ABM. São Paulo SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.
- CARVALHO, Ricardo Fernandes; CALIL Jr., Carlito. Compósitos de tecidos de sisal impregnados com poliuretanas derivadas do óleo de mamona submetidos à tração. Revista Baiana de Tecnologia, Camaçari, v. 18, n. 1, p. 119-130, 2003.
- PARTEL, P. M. P.; CALIL JR., C; INO, A.; CARVALHO; R.F., et al.. Análise da cadeia produtiva para execução de painéis estruturais de madeira roliça de pequeno diâmetro In: EBRAMEM. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, Cuiabá. IX EBRAMEM. Universidade Federal de Goiás, 2004.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Exemplos de peças de madeira deterioradas
Figura 2.	Classificação dos compósitos
Figura 3.	Ligações do grupo funcional NCO com hidroxilas associadas à celulose e lignina
Figura 4.	Variação do Módulo de Elasticidade em função de diferentes teores de fibras frágeis
Figura 5.	Cela unitária no arranjo simples
Figura 6.	Esquema de processamento de tecidos e resinas para obtenção de compósitos
Figura 7.	Modelo para a descrição da rigidez das fibras naturais37
Figura 8.	Seção transversal das fibras de sisal por MEV
Figura 9.	Arranjos de tecidos urdidos(a), trançados(b) e tricotados(c)43
Figura 10.	Tipos de arranjos encontrados para tecidos tramados
Figura 11.	Oligômero preparado a partir do bisfenol A e epicloridrina51
Figura 12.	Aspecto do tecido "telinha" da APAEB
Figura 13.	Esquema do arranjo dos tecidos de sisal
Figura 14.	Arranjos de tecidos urdidos e tramados: 2a, arranjo simples; 2b, arranjo composto e 2c, arranjo do tecido de sisal utilizado59
Figura 15.	Corte e montagem dos corpos-de-prova para ensaio de ligações submetidas ao cisalhamento
Figura 16.	Esquema de aplicação dos compósitos nos elementos de madeira e de aplicação da força durante o ensaio
Figura 17.	Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos
Figura 18.	Esquema para conformação dos compósitos
Figura 19.	Ensaios de tração em fibras têxteis de sisal74
Figura 20.	Curvas selecionadas de tração versus deformação em fios de sisal76
Figura 21.	Ensaios de tração em tecidos de sisal
Figura 22.	Corpos-de-prova de tecidos de sisal antes e após o ensaio de tração79
Figura 23.	Aspecto visual do compósito sisal - PU bicomponente (GQATP)82
Figura 24.	Gráfico força deslocamento limitado, para ensaio de tração, do compósito sisal - poliuretana bicomponente comercial83
Figura 25.	Imagem por microscopia de lâmina intermediária em compósitos de sisal e poliuretana monocomponente (GQAMR)84
Figura 26.	Gráfico força-deslocamento para ensaio de tração em compósito Sisal – PU(GQAMR)84
Figura 27.	Gráfico de força x deslocamento para ensaios de tração em compósitos de sisal - PU (GQAMR), sem aditivo, imersão

Figura 28.	Resultados do ensaio de tração em compósitos de sisal - PU (GQAMR), com aditivo, imersão
Figura 29.	Interface entre o sisal e a resina PU comercial
Figura 30.	Resultado do ensaio de tração em compósito sisal(telinha) – EP impregnado por pincelamento90
Figura 31.	Imagem da microscopia por transmissão em compósito sisal — EP91
Figura 32.	Resultados do ensaio de tração em compósito sisal – EP por pincelamento
Figura 33.	Resultados do ensaio de tração em compósito sisal – EP por imersão93
Figura 34.	Comparação entre fibras não tratadas(a) e tratadas (b)94
Figura 35.	Curvas de força x deslocamento dos compósitos de sisal tratado — EP.95
Figura 36.	Curvas selecionadas de força versus deslocamento de compósitos sisal – EP moldados sob vácuo
Figura 37.	Detalhe do exemplar de menor resistência97
Figura 38.	Aspecto típico da ruptura dos compósitos99
Figura 39.	Interface entre o sisal e a resina EP
Figura 40.	Ensaios de ligações de madeira em sisal-epóxi submetidas ao cisalhamento, área de colagem $12x12cm^2$ 101
Figura 41.	Ensaios de ligações de madeira em sisal-epóxi submetidas ao cisalhamento, área de colagem $10x10cm^2$ 101
Figura 42.	Modo de ruptura das emendas de madeiras com compósitos sisal-EP submetidas ao cisalhamento
Figura 43.	Efeito do reforço de vigas de madeira com compósitos de sisal-EP104
Figura 44.	Ruptura típica dos exemplares de madeira reforçados com compósitos de sisal-EP submetidos à flexão
Figura 45.	Aspecto da região de contato entre fibras-resina-madeira
Figura 46.	Detalhe da interface resina-madeira
Figura 47.	Região de contato entre a resina e a fibra

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Classificação das fibras quanto ao comprimento e exemplos24
Tabela 2.	Classificação e exemplos de fibras vegetais
Tabela 3.	Componentes das fibras naturais
Tabela 4.	Composição química de algumas fibras vegetais
Tabela 5.	Comparação das propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais e sintéticas
Tabela 6.	Descrição e designação das poliuretanas utilizadas
Tabela 7.	Características da poliuretana monocomponente - GQAMR61
Tabela 8.	Características da poliuretana monocomponente - GQAMR62
Tabela 9.	Propriedades físicas após a cura total
Tabela 10.	Propriedades físicas e mecânicas após a cura total
Tabela 11.	Valores médios e desvios padrão de propriedades físicas e mecânicas das fibras têxteis de sisal
Tabela 12.	Resultados médios e desvios dos ensaios físicos e tração em fibras têxteis de sisal
Tabela 13.	Comparação de resultados de tração em tecidos
Tabela 14.	Relação entre designação e fornecedores de poliuretana81
Tabela 15.	Resultado do ensaio de tração em PU(GQAMR), sem aditivo, por pincelamento
Tabela 16.	Resultados do ensaio de tração em PU(GQAMR), sem aditivo, por imersão
Tabela 17.	Resultados do ensaio de tração em PU(GQAMR), com aditivo, por imersão
Tabela 18.	Resultado da força de ruptura em ensaio de tração em compósito sisal(telinha) – EP impregnado por pincelamento90
Tabela 19.	Resultados do ensaio de tração em compósitos sisal-EP impregnados por pincelamento91
Tabela 20.	Resultados do ensaio de tração Sisal – EP, por imersão93
Tabela 21.	Resultados obtidos nos ensaios de tração, sisal tratado - EP95
Tabela 22.	Resultados obtidos nos ensaios de tração, sisal – EP moldados sob vácuo
Tabela 23.	Comparação da rigidez (daN/mm) dos exemplares submetidos à flexão sem reforço e com reforço

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM - American Society for Testing Materials

GQATP – Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros

MDI - difenilmetano di-isocianato

NaOH - Hidróxido de sódio

OH – Grupo hidroxila

PU – Poliuretana

EP - Epóxi

TDI - Tolueno di-isocianato

APAEB - Associação dos Pequenos Agricultores do Município de Valente - BA

CCA - Cromo, cobre e arsênio

FPL - Forest Products Laboratory, U.S.

GQAMR - Grupo de Química Analítica e Materiais de Referência

PRF - Polímeros Reforçados com Fibras

DBTDL - dibutil dilaurato de estanho

NDI – di-isocianato de naftaleno;

USP - Universidade de São Paulo;

SEAGRI - Secretaria da Agricultura, Irrigação e Reforma Agrária

SÍMBOLOS

d _e : Diâmetro equivalente
E: Módulo de elasticidade
E: Módulo de elasticidade
G: Módulo à torção
F: Força
I: Momento de inércia
$\ell_{\rm f}$: Comprimento das fibras
ℓ_c : Comprimento crítico das fibras
l: Distância entre os apoios em vigas bi-apoiadas
f: Resistência
φ: Fração volumétrica
δ: Deslocamento
η ₁ :Coeficiente que depende da orientação das fibras
$\eta_2{:}Coeficiente$ que depende do comprimento das fibras e do comprimento crítico
μ: Coeficiente de Poisson
ε: Deformações específicas
Índices
m: Matriz
f: Fibras
c: Compósitos
T: Transversal
L: Longitudinal

RESUMO

O reforço em estruturas de madeira é necessário em vários edifícios com interesse cultural e histórico. Compósitos com fibra tem sido utilizados no reforço de elementos estruturais de madeira. Carbono e fibras de vidro são fibras mais usadas como reforço. Porém, fibras naturais são uma importante alternativa considerando as seguintes vantagens: abundância, biodegradabilidade e o baixo custo comparadas com as fibras de vidro ou fibras de carbono. As fibras têxteis e os fios de sisal foram caracterizados por ensaios de tração. Um novo tecido de sisal industrializado foi desenvolvido com base nos tecidos usados em compósitos estruturais com o objetivo de melhorar o alinhamento das fibras e reduzir as deformações transversais. Ensaios de tração foram utilizados para avaliar os compósitos de sisal com matrizes epóxi e poliuretanas derivadas do óleo de mamona. Os ensaios de flexão e cisalhamento foram utilizados para avaliar a resistência e a rigidez. Também foram analisadas as interfaces entre a madeira e os compósitos e avaliados os modos de ruptura. Os resultados mostraram que o compósito de epóxi e sisal são suficientemente rígidos e resistentes para reforçar estruturas de madeira.

ABSTRACT

Many buildings of cultural and historical interest require reinforcement of their timber structures. This research focuses on fiber-reinforced composites to repair and reinforce such structural elements of wood as an alternative for carbon and glass fibers, which are the materials most commonly used for purposes of reinforcement. Natural fibers are an important alternative, offering several advantages such as their abundant availability, biodegradability and low cost compared with glass or carbon fibers. Sisal In the study reported here, textile sisal fibers and cords were characterized under tensile testing. A new sisal textile was designed based on an industrially manufactured textile for advanced composite arrangements to improve the fibers' alignment and reduce transverse deformations. Composites consisting of a combination of sisal, commercial epoxy and polyurethane based on castor oil resin matrixes were tensile tested. The effect of sodium hydroxide (10%) treatments on the sisal was also evaluated. The composite material was subjected to bending and shear tests to determine its strength and stiffness, and its wood-composite interface and failure modes were investigated. The results showed that the new Sisal Fiber-Reinforced Plastic (SFRP) is sufficiently strong and stiff to serve as a reinforcement of timber structures.

1. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa tem por finalidade o desenvolvimento de um material compósito, formado por fibras de sisal impregnada com resina polimérica destinada à reabilitação de elementos estruturais de madeira. Os motivos que despertam o interesse nesta pesquisa são vários, e podem ser agrupados em econômicos, sociais, estratégicos e ambientais.

O Brasil possui 17 áreas tombadas como patrimônio da humanidade inscritos na UNESCO, das quais seis com grande patrimônio arquitetônico histórico. Na relação de áreas tombadas constam: Centro Histórico de Goiás (GO), Diamantina (MG), Olinda (PE), Ouro Preto (MG), São Luis (MA) e Salvador (BA). Outras cidades podem ser listadas pelos investimentos e interesse cultural e turístico. Na Bahia: a Costa do Descobrimento e a Chapada Diamantina (Lençóis, Andaraí, Igatu, Mucugê, Rio de Contas, Porto Seguro, Santa Cruz Cabrália, Arraial d'Ajuda e Trancoso); em Minas Gerais: os Campos das Vertentes além dos Circuitos do Ouro e do Diamante (Tiradentes, São João Del-Rei, Prados, Resende Costa, Cel. Xavier Chaves, Ouro Preto, Congonhas, Serro, Milho Verde, São Gonçalo); no Maranhão: Alcântara; na Serra do Mar: Paraty, Bananal, Embu das Artes, Cunha, Paranapiacaba, S. Luís do Paraitinga. Outras cidades têm investido

consideravelmente em aumentar os atrativos turísticos a partir do patrimônio arquitetônico e cultural como Rio de Janeiro, São Paulo e Florianópolis.

As histórias das diversas construções nestas áreas de patrimônio arquitetônico apresentam aspectos coincidentes: as estruturas são em madeira, passaram várias décadas sem qualquer manutenção devido à estagnação econômica da região, as estruturas estiveram submetidas ao ataque de agentes degradadores, e atualmente os projetos de revitalização urbanística dos centros históricos requerem mudanças de uso dos imóveis.

A reabilitação de elementos estruturais de madeira pode ser realizada com várias técnicas como a substituição das peças danificadas ou a solidarização de elementos que complementem a capacidade mecânica dos elementos estruturais. As técnicas usuais encontram limitações como a indisponibilidade de elementos para a substituição, os custos elevados, custo ambiental e escassez dos materiais envolvidos, ou a incompatibilidade de características físicas, e tais limitações sugerem a busca de novos materiais. Técnicas de colagem de tecidos sintéticos e minerais impregnados com resinas poliméricas têm sido pesquisadas e implementadas.

A proposta de um novo material alternativo aos usuais deve considerar os aspectos econômicos e ambientais envolvidos na proposta como a disponibilidade, atuais usos, e custos das matérias-primas. Neste trabalho, utiliza-se o sisal como uma matéria-prima inovadora no uso de tecidos impregnados para reabilitação estrutural.

Segundo a SEAGRI (2002), o sisal atualmente tem sido utilizado na produção de fios e cordas, cordéis, tapetes, capachos, artesanato e também como matéria-prima para a fabricação de celulose e papéis finos. Além destes usos consolidados, o sisal tem apresentado características importantes para outras aplicações relativamente recentes, na construção civil em substituição ao amianto e em mantas asfálticas, na base de carpetes, e na indústria automobilística em bancos e painéis.

Segundo a Associação dos Pequenos Agricultores do Município de Valente – BA (APAEB, 2002), o sisal cultivado no Brasil tem sido a Agave Sisalana Perr. (família Amarilidaceae); esta cultura tem uma área plantada de aproximadamente 120 mil hectares com uma produção de 110 mil toneladas de fibra seca. A produtividade brasileira tem sido baixa se comparada a outros países produtores que desenvolveram tecnologias mais avançadas de cultivo e extração da fibra. Atualmente, outros países conseguem produtividade até 4 vezes maior do que a produtividade brasileira. Entre 1965 e 1974 o Brasil produzia mais de 200 mil toneladas por ano de sisal; recentemente a produção tem sido por volta de 134 mil toneladas anuais, o que corresponde a 40% da produção mundial. O Estado da Bahia tem sido o principal produtor do país, com cerca de 85% da produção brasileira. O preço relativo da fibra de sisal tem sido aproximadamente 11% do preço das fibras de vidro e 0,07% do valor das fibras de carbono. Também apresenta vantagem em relação a outras fibras vegetais quando compara-se o desempenho mecânico e o custo unitário.

As fibras de sisal como reforço mecânico em elementos estruturais de madeira necessitam de uma matriz polimérica que possa unir todas as fibras têxteis e também possa unir as fibras ao elemento estrutural de madeira. Recentes pesquisas nacionais produziram resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona com desempenho mecânico vantajoso e variadas aplicações.

O uso óleo de mamona tem sido extenso como matéria-prima nos processos de produção de tintas, lubrificantes, plásticos, borrachas, cosméticos, farmacêuticos, alimentos, ceras e outras aplicações. No Brasil a produção de sementes de mamona alcança 120,9 mil toneladas/ano, numa área plantada de 126,1 mil hectares, segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2002). Atualmente, estima-se o valor do óleo de mamona em US\$740 cada tonelada. No País, os Estados da Bahia, Rio Grande do Norte, Minas Gerais e São Paulo são os que se destacam na produção e industrialização da mamona. Na Bahia encontra-se cerca de 80% da produção de mamona (ricinocultura), mais especificamente nas regiões agrícolas de Irecê, Jacobina, Itaberaba, Senhor do Bonfim, Seabra e Brumado.

O sisal e a mamona são propostos como componentes de material composto e substitutos de materiais usualmente derivados de recursos minerais limitados. O atual momento histórico ressalta a importância do desenvolvimento de tecnologias alternativas daquelas com base no uso intenso de produtos derivados do petróleo quando observado as recentes tensões nas relações internacionais devido às disputas pelo controle de regiões do globo terrestre onde o petróleo tem sido abundante. O sisal e a

mamona são recursos renováveis e o Brasil participa de forma importante na produção mundial total. Ainda, do ponto de vista socioeconômico, o sisal e a mamona são produzidos principalmente em regiões semi-áridas ou áridas onde se localizam populações de baixo rendimento e baixos índices de desenvolvimento social.

As resinas utilizadas usualmente em aplicações estruturais são as epóxi. As resinas epóxi reforçadas com fibras são utilizadas em reparos de estruturas de construções associadas a fibras de vidro e de carbono. Outras aplicações das associações de resinas epóxi com fibras de reforço podem ser verificadas em materiais esportivos, nas indústrias automobilística, náutica e aeroespacial, tendo em comum a todos os produtos o elevado custo. Portanto, as resinas epóxi são uma alternativa válida para atuarem como matriz para as fibras de sisal e ao mesmo tempo adesivo entre o elemento estrutural de madeira a o compósito sisal e epóxi.

As resinas epóxi são polímeros termoestáveis com vantagens como a resistência química, a adesividade a diferentes substratos, a estabilidade química, estabilidade em ambientes úmidos e quentes. Ainda na fase bicomponente, as resinas epóxi apresentam outras vantagens: a ausência de componentes voláteis, a amplitude de variação da viscosidade adequando a resina em função dos processos de moldagem e cura, estabilidade dimensional durante os processos de cura, sem dizer que a polimerização não resulta em gases liberados à atmosfera. Estas características fizeram do epóxi a resina mais utilizada como matriz para compósitos de elevado desempenho.

O desenvolvimento das fibras sintéticas de elevado desempenho mecânico e os respectivos tecidos permitiu a elaboração de materiais criados especificamente para as aplicações estruturais. Assim, surge a categoria de "compósitos avançados" ou de "elevada desempenho". Os compósitos avançados são resultantes do avanço nas pesquisas das resinas, dos tecidos, e dos processos de fabricação especialmente desenvolvidos para otimizar o desempenho mecânico destes materiais. O elevado desempenho tem sido obtido com a orientação de fibras resistentes na direção das tensões principais associadas a matrizes de elevada adesividade e resistentes às ações ambientais e condições de uso dos elementos estruturais. A demanda econômica dos polímeros reforçados com fibras sintéticas tem contribuído para o crescente e rápido desenvolvimento destes materiais, mas o uso de fibras naturais em compósitos estruturais não tem sido usual.

O compósito de fibras têxteis de sisal e resinas epóxi aproveita a adesividade destas resinas em superfícies das fibras naturais e a maior estabilidade química da resina como forma de proteger as fibras da ação ambiental

O compósito de fibras têxteis de sisal e óleo da mamona aproveita o desenvolvimento tecnológico e científico recente dos biocompósitos, das novas resinas poliuretanas, assim como dos tecidos utilizados nos compósitos avançados. Com o aumento do interesse nos materiais ambientalmente adequados, tem aumentado também as pesquisas das fibras naturais utilizadas como reforço de plásticos. A juta, o coco, o algodão e o sisal têm sido empregados e estudados como reforços em termorrígidos, termoplásticos e

em elastômeros. O que possibilita o uso de termorrígidos derivados do óleo de mamona são as recentes pesquisas desenvolvidas no Instituto de Química de São Carlos - USP (IQSC) onde se utiliza o óleo de mamona como parte integrante de poliuretanas termorrígidas, com resultados animadores nas múltiplas aplicações em que vêm sendo estudadas. Os tecidos utilizados nos compósitos avançados possuem arranjos que possibilitam a compatibilização entre os esforços que atuam sobre os elementos estruturais e as propriedades mecânicas destes elementos.

A pesquisa para obtenção do compósito do tecido de sisal impregnado, seja com a poliuretana derivada do óleo de mamona seja com a resina epóxi, corresponde à investigação de um arranjo adequado de tecido de sisal, produzido em tear automático, impregnado com a poliuretana derivada do óleo de mamona termorrígida. Portanto, utilizando-se processos compatíveis com as condições usuais nos serviços de reabilitação de estruturas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Gerais

O trabalho proposto pretende desenvolver um novo compósito para a reabilitação de elementos estruturais de madeira utilizando materiais renováveis e de impacto ambiental reduzido. Com esse objetivo, associa-se resultados e pesquisas em compósitos reforçados com fibras vegetais, em tecnologia das resinas poliuretanas derivados do óleo de mamona e em resinas epóxi. Este trabalho também procura enfatizar a pesquisa do

comportamento mecânico do compósito a partir do estudo das interfaces dos materiais.

1.1.2 Específicos

- Estudar a adesividade entre as resinas utilizadas neste trabalho e as madeiras. Assim com entre estas mesmas resinas e as fibras sisal
- Avaliar os métodos de processamento dos compósitos considerando as restrições para a aplicação do material na estrutura, ou seja, obter um compósito estrutural em condições de temperatura e umidade ambiente.
- Estudar a interface e o comportamento mecânico do compósito da fibra de sisal em matrizes de poliuretana derivada da mamona, e o epóxi. Devem ser consideradas as lacunas a serem pesquisadas no comportamento do compósito proposto em condições que a reabilitação de elementos estruturais de madeira impõe. Ou seja, restrições quanto à conformação e aplicações das fibras de sisal, impregnadas com a poliuretana ou epóxi, e aderidas à madeira.
- Estudar a interface e o comportamento mecânico de peças de madeiras reforçadas com o compósito tecido de sisal em matrizes de poliuretana derivada da mamona e epóxi. Deve ser caracterizado o material quando submetido aos esforços usuais nas estruturas de madeira: flexão e cisalhamento.
- Comparar os resultados obtidos entre a resina de poliuretana derivada
 da mamona e a resina epóxi e avaliar as possibilidades de aplicações

de cada um destes materiais compostos, a partir dos resultados obtidos.

1.2 Escopo da pesquisa

Os objetivos apresentados anteriormente sugerem o contexto deste trabalho. Têm-se como centro da pesquisa o desenvolvimento de material compósito, estrutural, com tecido de sisal, impregnado com poliuretana derivada da mamona ou com resinas epóxi, com ênfase na avaliação das interfaces entre resina, fibra e madeira, relacionando estas características com o comportamento mecânico resultante. Portanto, não se pretende estabelecer modelos de comportamento estrutural ou ainda não se pretende modificar as condições industriais da produção do tecido de sisal, nem o estudo de tecidos híbridos embora estas possibilidades possam ser inquietantes e futuramente necessárias.

A aplicação em reabilitação de elementos estruturais também acrescenta limites ao trabalho, considerando-se os elevados custos na aplicação de controles de temperatura e pressão em elementos de grandes extensões e fixos, como são os elementos estruturais de construções civis.

1.3 Contribuição científica

O presente trabalho apresenta a originalidade de propor um compósito de tecidos em fibras naturais para o reforço de estruturas de madeira. Os compósitos de fibras naturais têm sido estudados por diversos pesquisadores e grupos de pesquisa. Entretanto, geralmente esses estudos se resumem a

estudar tais compósitos na forma de fibras isoladas e curtas ou em tecidos artesanais. Esse trabalho pretende ser o primeiro estudo empregando a poliuretana monocomponente derivada do óleo de mamona, desenvolvida no Instituto de Química de São Carlos (GQAMR - IQSC), como resina de impregnação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está organizada para apresentar os resultados de recentes pesquisas correlatas e também os fundamentos necessários à compreensão do presente trabalho por profissionais de diferentes formações. Inicialmente, são apresentados alguns dos mecanismos de deterioração das madeiras e a conseqüência desta deterioração: a integridade mecânica dos elementos estruturais de madeira. Também estão apresentadas as técnicas usuais para o reforço dos elementos estruturais de madeira danificados, com ênfase às soluções nos reforços que utilizam materiais compostos com fibras. Em seguida, estão apresentados os conceitos necessários sobre os materiais compostos, fibras, fios, tecidos, fibras vegetais e alguns conceitos sobre as resinas poliméricas tratadas no presente trabalho. Também apresenta-se a descrição dos processos usuais na conformação de polímeros reforçados com fibras e de colagem de reforços em substrato estrutural.

2.1 Deteriorações de elementos de madeira

As deteriorações que ocorrem nos componentes estruturais de madeira são alterações na integridade da estrutura, como por exemplo o surgimento de fendas e rachaduras, alterações de cor causados por influência ambiental ou interna. Os usos, mesmos previstos, também resultam em decomposições do material e da estrutura.

As estruturas das construções e seus elementos estruturais são submetidas a ações e interagem com o ambiente que em conjunto contribuem com a perda das propriedades iniciais. Segundo Pinheiro e Rocco Lahr (1997), os agentes deterioradores da madeira podem ser divididos em dois grupos: abióticos (físicos, mecânicos e químicos) e bióticos (fungos, bactérias e insetos). O ataque biológico às estruturas de madeira tem sido a principal causa de deterioração que resulta na perda de massa e, conseqüentemente, a perda da capacidade de resistência dos elementos estruturais. Hiorisch (1997), descrevendo a recuperação do piso de madeira do Palácio Universitário da Universidade Federal de Rio de Janeiro, identificou duas diferentes espécies infestantes de cupim. As figuras 1a, 1b são registros ilustrativos da deterioração resultante do ataque de insetos em estruturas de telhados que freqüentemente ocorrem em elementos estruturais de madeira.

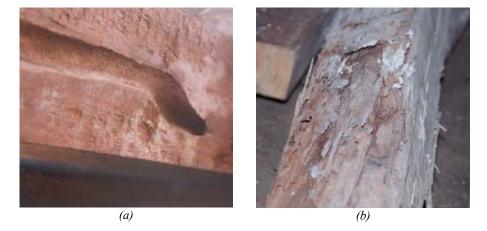


Figura 1. Exemplos de peças de madeira deterioradas.

O relato de Ribeiro (1997) para as intervenções realizadas na restauração da Casa França-Brasil no Rio de Janeiro pode ser um exemplo do que ocorre em estruturas sem manutenção adequada por longo período:

"O clima quente e úmido do local favoreceu o desenvolvimento de microorganismos no madeiramento do prédio. ... a cúpula estava quase que totalmente destruída em função da ação dos cupins,...".

Quanto ao telhado, verificou-se que bastava trocar algumas peças de madeira, reforçar outras em estado razoável de conservação que ainda mantinham condições de estabilidade,...". Ribeiro (1997).

As figuras 1a e 1b ilustram a perda de massa e as alterações decorrentes da ação de agentes degradadores. Estas alterações podem ser progressivas com o passar tempo e podem vir a comprometer a segurança ou as condições de uso da estrutura como um todo ou de elementos estruturais. Resistência e rigidez dos materiais são aspectos relacionados à segurança e à limitação das deformações dos elementos estruturais.

2.2 Reforço de elementos estruturais de madeira

2.2.1 Reforço e restauração

As reabilitações de estruturas em construções antigas ocorrem simultaneamente à restauração, sendo esse um processo de recuperação dos materiais, forma e aparência das estruturas. Segundo Cruz e Soares (2002), pode-se observar que nos trabalhos de restauração muitas peças de madeira encontram-se comprometidas pela ação do tempo e de agentes agressivos.

Mas, além da função estrutural, estas estruturas exercem outras funções como o registro de técnicas construtivas usuais no passado.

O processo mais simples de reabilitação de elementos estruturais de madeira tem sido a substituição dos elementos danificados denominado de tradicional. As características do material e de execução das estruturas usuais de madeira, além da disponibilidade de material, possibilitam as substituições dos elementos danificados com facilidade. Atualmente, a substituição vem encontrando limitações. Ribeiro (1997) argumenta que a substituição de elementos estruturais de madeira por outros do mesmo material na restauração da Casa França-Brasil seria onerosa devido às grandes dimensões das peças. Além dos custos elevados, podem ser incluídos outros fatores que limitam a simples substituição, como, por exemplo, os valores culturais das estruturas preservadas, e as restrições econômicas e ambientais das espécies anteriormente abundantes e que estão presentes em grande parte das construções históricas. Segundo Cruz e Soares (2002), a madeira em estruturas antigas não só desempenha um papel estrutural, mas também representa verdadeira obra de arte.

Para reforçar estruturas sem substituir os componentes danificados, podem ser solidarizados outros elementos que complementam a capacidade mecânica do elemento original. Os materiais normalmente empregados nestes reforços são: outro elemento de madeira, ou metálico como, chapas, barras, cabos ou perfis de aço ou alumínio, além de polímeros reforçados com fibras. Os métodos de transferência dos esforços entre a estrutura original e os

elementos de reforço podem ser mecânicos, com pinos e conectores, assim como adesivos.

Um exemplo de introdução de elementos metálicos para reforço de estruturas de madeira pode ser a protensão transversal. A protensão transversal de tabuleiros de pontes em madeira laminada pregada foi desenvolvida originalmente no Canadá para reabilitar tais tabuleiros. Esta técnica consiste em introduzir uma tensão de protensão transversal às peças de madeira forçando com que todas as peças contribuam solidariamente para a resistência da estrutura quando submetida a cargas atuantes. Os mecanismos relacionados como causadores de danos nestes tabuleiros são: o aumento do tráfego de veículos e a deterioração decorrente das rachaduras no asfalto que possibilitam a penetração de água, além da delaminação observada nas estruturas laminadas pregadas (Okimoto, 2001).

Segundo Dagher (2000), freqüentemente reforços metálicos promovem um significativo aumento de resistência e de rigidez, mas falhas na transferência de esforços entre a madeira e o reforço tem sido relatado, geralmente relacionado com a incompatibilidade entre a madeira e o material de reforço. Experiências com vigas de madeira reforçadas com placas de alumínio aderidas apresentaram delaminação entre a madeira e o metal com pequenas variações de umidade da madeira. Os diferentes comportamentos higroscópicos e diferentes rigidez da madeira e do material de reforço podem provocar a separação da linha de adesivo ou a ruptura da madeira próximo à linha de adesivo. Silva et al (2004) relacionam os seguintes problemas no uso de sistemas metálicos:

- Abertura de fendas devido à concentração de tensões que surgem quando se recorre a um reforço com um elevado módulo de elasticidade, como a aço;
- A espessura considerável dos elementos ligados devido ao reforço;
- Diferenças entre as deformações da madeira e dos metais quando submetidos a tensões, variação de umidade ou temperatura;
- Considerações de ordem estética.

Os polímeros reforçados com fibras de vidro têm sido empregados de diversas maneiras, como reforço de vigas, como material externo, em painéis com núcleos de madeira, reforço externo de compensados e como barra tensionada. Diferentemente dos reforços com aço ou alumínio, os reforços de madeira com compósitos poliméricos têm obtido desempenho satisfatório porque as propriedades físicas, químicas e mecânicas deste material são bastante versáteis. Os polímeros reforçados com fibras (PRF) podem ser produzidos propriedades ortotrópicas anisotrópicas. com ou Consequentemente, os problemas de incompatibilidade com a madeira podem ser minimizados, e também podem facilmente ser incorporados à produção industrial de elementos estruturais compostos, (Dagher, 2000).

Wheeler e Hutchinson (1998) consideram que a grande vantagem nos métodos de reabilitação que empregam resinas tem sido a capacidade de reparar a estrutura no local com o mínimo de interferência no método de construção original. Cita ainda a possibilidade de usos de materiais de elevada resistência como vantagens possíveis, mas ressalta também algumas desvantagens como: ausência de ensaios de longa duração tanto para

verificação da evolução do desempenho mecânico como em aspectos de durabilidade; e os custos dos materiais são considerados elevados.

Bainbridge, Mettem et al (1998) afirmam que o uso de compósitos no reparo e reabilitação de elementos estruturais danificados ou deteriorados tem resultado no aumento da durabilidade, na redução dos custos de manutenção, no aumento da resistência à flexão e rigidez de peças fletidas em estruturas novas ou em uso, no aumento da resistência à fadiga.

Em geral, têm sido utilizadas as fibras de vidro ou de carbono como material de reforço em estruturas de madeira. Entretanto, têm sido registrados estudos em pesquisas de ciência e tecnologia de materiais para substituição das fibras sintéticas pelas fibras vegetais, tanto em matrizes termofixas como termoplásticas. O aumento do interesse dos pesquisadores por esta substituição decorre das vantagens econômicas e ambientais das fibras naturais.

As estruturas de construções novas também podem ser reforçadas com compósitos. Hernandez, et al (1997) avaliaram o potencial da produção comercial de vigas em unidades industriais de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro e um adesivo para madeira compatível com equipamento disponível. Os autores argumentam que em projetos de pontes tem sido freqüente a redução da espessura do tabuleiro para prover a abertura hidráulica exigida. No reforço de pontes construídas em madeira laminada colada (MLC), utilizam-se tiras finas de polímeros pultrudados reforçados com fibras de vidro. Estes reforços permitem reduzir a espessura do tabuleiro porque o reforço aumenta a rigidez e a resistência. Os resultados obtidos

indicam aumentos de 18% na rigidez e 26% na resistência com a adição de 3% em volume de compósito de fibra de vidro. Embora os valores experimentais obtidos tenham sido comparáveis aos teóricos, a delaminação deve ser melhor estudada.

2.2.2 O material madeira

A função da madeira no presente trabalho pode ser definida como o substrato ao qual se adere um compósito com o objetivo de alterar o desempenho mecânico dos elementos de uma estrutura em madeira. Desta forma, pode-se ressaltar os aspectos de superfície e de microestrutura como fundamentais para a compreensão do comportamento das ligações entre madeira, adesivo e compósito de reforço.

A estrutura celular da madeira disponibiliza cavidades que, penetradas pelo adesivo, possibilitam a transferência de esforços entre os materiais por mecanismos de intertravamento. Entretanto, a acessibilidade destas cavidades aos adesivos depende de fatores como: tratamentos preliminares físicos e químicos, ângulo de corte da madeira em relação às fibras, presença de extrativos, e a espécie da madeira. Nas madeiras de reflorestamento, quando submetidas à impregnação de preservativos, estes formam uma camada superficial dificultando o contato do adesivo com a madeira.

Segundo Forest Products Laboratory (FPL, 1999), madeira é um substrato que oferece boas condições de adesividade, observando-se condições intrínsecas, e de processos e tratamentos que afetam suas características superficiais. Como características intrínsecas são

recorrentemente citadas: a compatibilidade físico-química com diversos adesivos, a presença de extrativos na superfície, a rugosidade e a porosidade. Entre os processos e tratamentos que afetam a adesividade são ressaltados: a limpeza que garanta a isenção de contaminantes na superfície, as operações de acabamento superficial, além de tratamentos térmicos, preservativos e acoplantes.

2.3 Compósitos

Segundo Dagher (2000), os compósitos com a madeira resultou em significativas transformações no uso da madeira como material de construção no século 20.

Materiais compostos 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, para cada tipo de aplicação desejada (Hull, 1995). Calister (1985) propõe uma classificação dos compósitos de acordo com o esquema apresentado na figura 2.

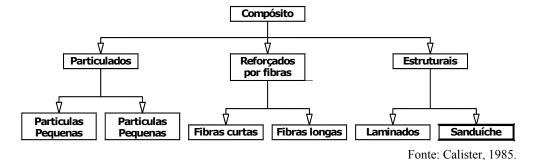


Figura 2. Classificação dos compósitos.

Existem diversos motivos econômicos, ambientais e técnicos para o uso dos polímeros reforçados com fibras (PRF) em reabilitação de estruturas de madeira, sendo os principais: aumento da resistência e da rigidez, aumento da confiabilidade que proporciona melhorias no desempenho da estrutura, possibilita o uso de madeiras de menor resistência, reduz a variabilidade nas propriedades mecânicas, reduz os efeitos da variação volumétrica que atuam em linhas de cola, aumenta a eficiência estrutural reduzindo o peso e as dimensões das estruturas, aumenta a capacidade de uso das estruturas.

Os materiais compostos laminados estruturais de elevado desempenho mecânico, por vezes designados de avançados, são amplamente utilizados em diversos setores industriais, e grande parte desta versatilidade se deve às relações entre as propriedades mecânicas e o peso dos materiais. As indústrias náutica e aeronáutica são exemplos em que o desempenho do produto final deve garantir a segurança necessária, mas se o peso do produto acabado for excessivo pode até mesmo inviabilizar o uso. Outros ramos da indústria também empregam largamente os materiais compósitos de alto desempenho como os materiais esportivos e a indústria automobilística de competição. Os compósitos de alto desempenho também possuem custos elevados decorrente dos custos das resinas, como a epóxi; e das fibras, como as de carbono.

Os compósitos utilizados em reabilitação de estruturas de madeira são compósitos estruturais laminados unidirecionais. O uso deste tipo de compósito deve-se a possibilidades de orientar as fibras de reforço nas direções nas quais ocorrem as necessidades de reforço.

As propriedades dos compósitos podem ser consideradas como uma combinação entre as propriedades da matriz, das fibras e das interfaces entre fibra e matriz. Na avaliação do desempenho dos compósitos com fibras, têm sido observados os seguintes parâmetros:

- Características dos materiais componentes, fibra e matriz;
- Geometria das fibras, seção transversal e comprimento;
- Arranjo das fibras;
- Proporção entre os materiais;
- Características da interface dos materiais.

As propriedades dos compósitos dependem da fração volumétrica de fibras que possuem maior resistência e módulo de elasticidade, e, portanto, a eficiência mecânica do compósito depende da maximização do teor de fibras em relação ao teor de resina.

As características dos materiais compostos estão limitadas às características dos materiais componentes. As resinas poliméricas e as fibras são disponíveis em diversos materiais, sendo que Hull (1995) destaca as fibras de vidro, de carbono e as orgânicas, e diversas matrizes poliméricas termoestáveis e termoplásticas. Assim como qualquer material, a escolha de fibras e matrizes deve considerar as condições de uso, as ações mecânicas atuantes, o ambiente e os agentes potencialmente degradadores, os custos e os benefícios durante a vida útil do material em uso. Os materiais compósitos requerem verificações específicas quanto à compatibilidade entre os materiais componentes como, por exemplo, a aderência, e a estabilidade química.

A seção transversal das fibras varia segundo o material e o processo de obtenção. As fibras metálicas ou sintéticas apresentam seções uniformes enquanto as fibras vegetais apresentam seções variáveis tanto na dimensão quanto na forma. O diâmetro equivalente (d_e) corresponde ao diâmetro do círculo de área igual à área da seção transversal da fibra e facilita a comparação entre os diversos tipos de seção. As fibras vegetais possuem uma variação bastante ampla dessa característica, pois são formadas por processos naturais de pouca homogeneidade, o que torna o diâmetro equivalente um parâmetro difícil de ser quantificado.

O coeficiente de forma (ℓ_f/d_e) tem sido um parâmetro utilizado para descrever a relação entre características geométricas das fibras, corresponde a razão entre o comprimento (ℓ_f) e o diâmetro equivalente (d_e). Entretanto, quando se trata de determinadas fibras, como por exemplo as de vidro que são usadas em feixes, não tem sido fácil definir as fibras pela relação de forma. Este parâmetro também tem sido utilizado para classificar as fibras entre longas e curtas, sendo as fibras curtas usualmente definidas como tendo um comprimento inferior a 100 vezes o diâmetro equivalente. As fibras têxteis de sisal são longas, tendo diâmetro equivalente como fração do milímetro, e o comprimento entre 90 e 120 centímetros.

Outro parâmetro importante tem sido a percentagem do volume de fibras dispersas no volume total do compósito, ou simplesmente teor de fibras, geralmente expressa em termos de fração volumétrica. Usualmente as fibras possuem características mecânicas superiores às matrizes; portanto, procura-se sempre obter compósitos com o máximo de fibras possível para

que possam ser satisfeitos os critérios de desempenho mecânico com o mínimo de peso e volume. Os fatores que limitam esta maximização são os elevados custos das fibras sintéticas em relação às resinas poliméricas e as condições de processamento dos materiais.

O arranjo influencia significativamente o comportamento do elemento estrutural composto, sendo que, os arranjos dependem bastante do comprimento. As fibras curtas se prestam a distribuições aleatórias ou medidas adicionais no processamento devem ser adotadas para permitir a orientação. As fibras longas permitem tanto arranjos aleatórios como orientados. Os arranjos aleatórios são conseguidos com mantas enquanto os arranjos orientados são obtidos com tecidos, mechas ou fios. As fibras de sisal são naturalmente longas e o uso destas para a fabricação de cordas facilitam uso de arranjos orientados enquanto o uso de fibras curtas de sisal exige o fracionamento.

A equação (1) (Agarwal e Broutman, 1990) é o modelo de associação paralela das fibras para estimativa do módulo de elasticidade do compósito. Este mesmo modelo pode ser aplicado à resistência à tração. O coeficiente η₁ depende e evidencia a influência da orientação das fibras; varia entre 1 para as fibras orientadas e 1/6 para uma distribuição aleatória.

$$E_c = \eta_1 \eta_2 E_f \phi_f + E_m (1-\phi_f)$$
 (1)

onde:

η₁, coeficiente que depende da orientação das fibras.

- η_2 , coeficiente que depende do comprimento das fibras e do comprimento crítico ℓ_c .
- E_f, módulo de elasticidade das fibras.
- φ_f, fração volumétrica de fibras.
- E_m, módulo de elasticidade da matriz.
- E_c, módulo de elasticidade do compósito.

Na equação (1) o coeficiente η_2 evidencia a importância do comprimento das fibras enquanto η_1 evidencia a importância da orientação. O comprimento crítico (ℓ_c) é o comprimento mínimo da fibra necessário para que as tensões de aderência entre a fibra e a matriz se desenvolvam. A Tabela 1 apresenta a classificação das fibras quanto ao comprimento (ℓ_f).

Tabela 1. Classificação das fibras quanto ao comprimento e exemplos.

Disc				
Curtas	Longas	Contínuas		
$0 < \eta_2 \le 1$	$\eta_2 \cong 1$	$\eta_2 = 1$		
$\ell_{\rm f}/d_{\rm e} < 100$	$\ell_{\rm f}/d_{\rm e} \geq 100$	$\ell_{\rm f} \to \infty$		
Fracionadas de vários	Fibras têxteis de sisal	Vidro		
materiais	amianto	Carbono		

A interface dos materiais pode ser descrita, segundo Tita (2002), como sendo a camada que demarca fases distintas assim como fibra, matriz e camada de revestimento. Entre fibras e matrizes, interface é a região na qual estes materiais transferem as tensões e as deformações uns para os outros, possibilitando a contribuição de ambos para a resistência dos compósitos. As interações entre fibras - matriz ocorrem por uma série de fenômenos físicos e químicos entre as superfícies dos materiais. Inicialmente, pode-se considerar

o contato entre protuberâncias e reentrâncias como inibidores de deslocamentos relativos, por oferecer regiões de atrito que se opõem a estes deslocamentos. Estes mecanismos são normalmente encontrados em fibras artificiais.

A adesão entre a fibra e a matriz pode ser descrita como fenômenos físico-químicos que ocorrem entre os materiais. Yosomiya, et al. (1989), sugerem a análise das interfaces entre materiais através de três fatores:

- 1- Ligações mecânicas, incluindo os efeitos de ancoragem.
- 2- Ligações por interações físicas entre as moléculas dos diferentes materiais, como as interações entre as moléculas polares.
- 3- Ligações por interações químicas, como as ligações covalentes.

Hull (1995) acrescenta a interdifusão dos materiais que forma uma região de interfase, na qual, os materiais estão intimamente misturados devido à mobilidade molecular. A adesão por ligações químicas é a que envolve maior energia para a ruptura. Joseph, Thomas e Pavithran (1996) descreveram as ligações entre as fibras ligno-celulósicos e compostos que possuem o grupo funcional NCO: a ligação é descrita por reação entre as hidroxilas (OH) da celulose e da lignina, como descrito na figura 3.

$$+ N = C = O + OH - R \rightarrow - N - C - O - R$$

Fonte: Joseph, Thomas e Pavithran, 1996.

Figura 3. Ligações do grupo funcional NCO com hidroxilas associadas à celulose e lignina.

2.3.1 Micromecânica dos compósitos reforçados com arranjos unidirecionais

Compósitos são materiais resultantes da combinação de dois ou mais componentes, que diferem nas propriedades físicas e químicas de cada um. A finalidade da composição de diferentes materiais é criar um novo material adequado às diversas situações de uso. As propriedades dos compósitos podem ser consideradas como uma combinação entre as propriedades da matriz e as das fibras. Entretanto, a interface entre as duas fases distintas deve ser suficientemente resistente para promover a transferência de tensões e deformações entre os dois materiais.

Os tecidos técnicos unidirecionais utilizados em compósitos estruturais são arranjos de fios em uma única direção, podendo conter fios transversais apenas para manter os fios longitudinais unidos. Os fios transversais são revestidos com adesivo para que possam manter o arranjo dos fios longitudinais durante a embalagem, transporte e aplicação do tecido. Este tipo de arranjo tem sido útil quando as direções das tensões atuantes são conhecidas, podendo-se assim alinhar o reforço à tensão atuante.

O comportamento dos compósitos unidirecionais submetidos a tensões de tração pode ser modelado assumindo-se que as propriedades e as seções transversais das fibras são uniformes, o arranjo das fibras é paralelo ao longo de todo o compósito e que existe uma perfeita adesão entre a fibra e a matriz. A perfeita adesão entre fibra e matriz pode ser expressa na igualdade entre deformações das fibras (ε_f), da matriz (ε_m) e do material composto (ε_c), como apresentado na equação (2).

$$\varepsilon_{\rm c} = \varepsilon_{\rm m} = \varepsilon_{\rm f}$$
(2)

Em condições de tração quase estática, uma ação externa de tração (P) é equilibrada com a soma das forças atuantes tanto na matriz (P_m) quanto nas fibras (F_f) .

$$F_c = F_m + F_f \tag{3}$$

A combinação das equações (2) e (3) por meio das relações entre as deformações, resistência à tração e módulo de elasticidade resultam nas equações (4) e (5), conhecidas como regra de mistura para módulo de elasticidade e para a resistência, respectivamente. Nestas equações, tanto o módulo de elasticidade (E) quanto a resistência (f) nos compósitos são estimados em função das frações volumétricas (φ) de cada material do compósito. Os índices c,f e m relacionam as propriedades ao compósito, à fibra e à matriz, respectivamente.

$$E_c = E_f \phi_f + E_m \phi_m \tag{4}$$

$$f_c = f_f \phi_f + f_m \phi_m \tag{5}$$

Através de considerações semelhantes, o comportamento de compósitos de fibras transversais ao carregamento pode ser descrito pela equação 6 (Agarwal e Broutman, 1990):

$$\frac{1}{E_c} = \frac{\phi_f}{E_f} + \frac{\phi_m}{E_m} \tag{6}$$

A figura 4 apresenta esquematicamente a variação de estimativa do módulo de elasticidade em função de diferentes teores de fibras (ϕ_{f1} , ϕ_{f2}).

Quanto maior o teor de fibras mais o comportamento do compósito se aproximará do comportamento das fibras. Assim, os materiais compósitos possuem flexibilidade para se adequar a variados níveis de desempenho mecânico e variados tipos de processamento.

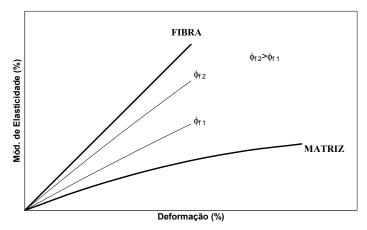


Figura 4. Variação do Módulo de Elasticidade em função de diferentes teores de fibras frágeis.

Existem limites para os teores de fibras incorporados aos compósitos seja por critérios de desempenho mecânico quanto por limitações geométricas nos arranjos das fibras. O limite máximo ($\phi_{máx}$) pode ser estimado pelo empacotamento máximo de fibras em seções unitárias. O limite inferior (ϕ_{min}) de incorporação das fibras é estabelecido por critérios de desempenho mecânico, considerando que, se o teor de fibras for insuficiente, a matriz será responsável por grande parte da resistência e, assim, a ruptura do compósito será definido pelo comportamento da matriz.

As premissas adotadas para a dedução da regra da mistura são válidas apenas para pequenas deformações, com a matriz e a fibra submetidas ao regime elástico de deformação. Quando os compósitos são submetidos a

deformações progressivas podem ser identificados 4 estágios diferentes até a ruptura:

- Nas deformações iniciais, tanto a matriz como as fibras estão em regime elástico;
- A matriz passa ao regime de deformações plásticas ou não lineares;
- Se as fibras forem dúcteis também passam ao regime de deformações plásticas ou não lineares; se forem frágeis este estágio não é observado;
- Finalmente, ocorre a ruptura das fibras e consequentemente a ruptura do compósito.

O comportamento dos compósitos em deformações próximas à ruptura é influenciado quase que exclusivamente pelo comportamento das fibras. Então, a variabilidade das propriedades das fibras interfere no desempenho dos compósitos. Nas fibras vegetais, a variabilidade de comportamento de fibras de mesma origem corresponde à variabilidade de seção, da composição química e dos métodos de obtenção. Esta variabilidade pode ser observada tanto se comparadas a diferentes fibras quanto em diferentes regiões de uma única fibra.

Nos compósitos com fibras frágeis, alinhamento unidirecional, submetidos à tração, o colapso se inicia pela ruptura das fibras nas seções menos resistentes. O aumento progressivo das tensões implica na ruptura de novas fibras. A ruptura das fibras é um processo aleatório. Algumas das seções do compósito perdem a capacidade de resistir, ao nível de tensão aplicado, com o aumento da quantidade de fibras rompidas, resultando na

completa ruptura do compósito. Outra possibilidade de ruptura dos compósitos é por cisalhamento da matriz.

Assim os mecanismos de ruptura dos compósitos podem ser descritos de 3 diferentes modos:

- 1- Frágil: A ruptura do compósito se inicia com a ruptura de uma fibra na seção de menor resistência, sendo a tensão atuante sobre esta fibra redistribuída entre as demais fibras através da matriz; assim, as tensões nas demais fibras se elevam. O processo de ruptura em cadeia, resultante das contínuas rupturas e respectivas redistribuições de tensões, ocorre em grande velocidade.
- 2- Frágil com ruptura da interface matriz-fibra: O mecanismo de ruptura das fibras pode ocorrer associado à ruptura da interface entre a matriz e a fibra, se adesão entre estas superfícies não for suficiente para resistir às elevadas tensões de cisalhamento nesta região. As superfícies de fratura decorrentes deste tipo de ruptura são mais rugosas que na ruptura frágil, expõem as extremidades das fibras arrancadas da matriz e também os respectivos vazios deixados pelas fibras na parte oposta da amostra.
- 3- Frágil com ruptura da interface matriz-fibra com arrancamento das fibras e cisalhamento da matriz: neste modo de ruptura, a matriz não é suficientemente resistente às tensões de cisalhamento atuantes nas interfaces entre a matriz e a fibra, e se propagam através da matriz.

Os compósitos podem se adaptar a situações de tensões multidirecionais também alinhando as fibras em várias direções. Arranjos de fibras

distribuídas em duas direções ortogonais podem ser realizadas utilizando tecidos bidirecionais. Os tecidos são arranjos de fios unidos por forças de contato e pelo intertravamento obtido nos diversos métodos de confecção. Os tecidos urdidos e tramados são formados pela intercalação de fios em duas direções: o urdume, que são os fios longitudinais e a trama composta por fios transversais. A figura 5 apresenta a cela unitária utilizada para estimar os parâmetros elásticos dos compósitos reforçados com tecidos.



Fonte: Tabiei, Yi (2002). Figura 5. Cela unitária no arranjo simples.

Existem vários tipos de tecidos tramados, e as das formas mais usuais são a simples e a sarja. O tipo simples é obtido pelo cruzamento alternado de fios perpendiculares e a sarja é o cruzamento alternado de três ou mais fios, mas também são encontrados o cesto e o cetim. Todos estes tipos possuem a mesma quantidade de fios nas duas direções. Os compósitos de tecidos são formados pela saturação do tecido por um polímero que quando curado comporta-se como matriz do compósito. Neste tipo de arranjo, a regra da mistura não tem se mostrado um modelo adequado para estimativas do comportamento destes compósitos. Uma das alternativas de análise utiliza adaptações na teoria de laminação; outras, mais recentes, elaboram modelos a partir de celas unitárias dos arranjos a fim de estimar os estados de tensão internos.

Os modelos que estimam as propriedades mecânicas dos compósitos com tecidos utilizam vários parâmetros tais como a gramatura do tecido (massa por superfície), a fração volumétrica de fibras, a ondulação e o arranjo dos fios, e as propriedades dos materiais constituintes. A generalização da lei de Hooke simplificada para situações bidimensionais, ortotrópica, pode ser descrita pela equação (7). As constantes Q_{ij} estão relacionadas com as constantes elásticas: módulo de elasticidade longitudinal (E_L) , módulo de elasticidade transversal (E_T) , coeficiente de Poisson (μ_{LT}) e módulo de elasticidade à torção (G_{LT}) ; as tensões em função das deformações podem ser determinadas por:

$$\begin{cases}
\sigma_{1} \\
\sigma_{2} \\
\tau_{12}
\end{cases} =
\begin{bmatrix}
Q_{11} & Q_{21} & 0 \\
Q_{12} & Q_{22} & 0 \\
0 & 0 & Q_{66}
\end{bmatrix}
\begin{cases}
\varepsilon_{1} \\
\varepsilon_{2} \\
\gamma_{12}
\end{cases}$$
(7)

As modelagens numéricas destes compósitos utilizam também conceitos das celas unitárias, teorias de laminação e o método de elementos finitos tridimensional. Em geral, os modelos de elementos finitos requerem grande quantidade de elementos para descrever uma cela unitária em modelos tridimensionais.

2.3.2 Conformação de laminados estruturais

A conformação do compósito compreende as operações necessárias para obtenção da forma final do produto composto. As operações de conformação são geralmente a aplicação dos materiais nas fôrmas, e os controles de temperatura e pressão para permitir a cura das resinas e compactação dos materiais.

Diversas questões devem ser consideradas no planejamento da conformação dos compósitos: a formação de bolhas devido à polimerização das resinas, o aprisionamento de ar tanto na mistura quanto à aplicação da resina, os efeitos de borda e o acabamento de superfície.

As características dos materiais e do processo de fabricação são variáveis que modificam o comportamento e propriedades finais dos compósitos, entre elas a viscosidade da resina, o arranjo e o teor das fibras, e o método de aplicação da resina, processos auxiliares como aplicação à vácuo e pressão, ciclo de temperatura ora para acelerar ora para retardar a polimerização, formato das fôrmas, entre outras. Todos os fatores interagem mutuamente, mas para efeito descritivo podemos agrupá-los e tratá-los separadamente. A figura 6 apresenta o esquema de conformação de materiais compostos.

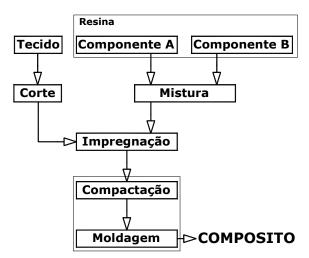


Figura 6. Esquema de processamento de tecidos e resinas para obtenção de compósitos.

As principais características da conformação dos compósitos que devem ser observadas nas resinas são o tempo em aberto (ou tempo de gel), a liberação de gases voláteis e a viscosidade. As características das fibras que mais interferem no processo de conformação são o teor de fibras, o comprimento, e a seção transversal. As condições de processamento como a pressão, a temperatura, a umidade, a pressão de aplicação da resina, além dos detalhes de fôrmas, são variáveis relacionadas ao processo de conformação. Todas estas variáveis devem ser consideradas para a obtenção de um material que atenda às necessidades da aplicação prevista.

Na fase de conformação, a resina apresenta um comportamento fluido, a interação entre as fibras e a matriz é caracterizada pela molhabilidade ou pela energia superficial dos materiais. A eficiência mecânica do material está relacionada a características como continuidade e homogeneidade. Propriedades físicas como por exemplo a rugosidade superficial devem ser consideradas em peças da indústria naval ou aeroespacial e é uma importante característica.

Segundo Blass (1985), os processos para conformação de polímeros reforçados com fibras são classificados em moldes abertos, em moldes fechados, por pistola, em câmara de pressão, por centrifugação, em matrizes combinadas, por injeção, por laminação contínua, enrolamento de filamentos, em câmara de vácuo e moldagem manual. Esta classificação é uma orientação para estudos pois nas indústrias podem ser encontradas diversas variações e combinações destes processos. Pode ainda ser observado que a utilização de moldes e matrizes especiais só se torna economicamente viável quando o projeto destina-se à produção em série de um grande número de peças permitindo assim a diluição dos custos dos moldes.

O material e o processo destinados à reabilitação de elementos estruturais existentes devem se adequar à diversidade de dimensões e à pouca ou nenhuma mobilidade da peça deteriorada. Cruz e Soares (2002) relatam:

"muitas vezes, o restauro dessas peças acontece em locais de difícil acesso e o trabalho de recuperação se torna complicado. Daí, a necessidade do estudo de materiais e métodos que auxiliem na execução destes serviços e permitam que o resultado alcançado ofereça boas condições de resistência aos esforços mecânicos, conservando a aparência original da estrutura".

Desta forma, algumas técnicas podem ser consideradas inadequadas ao reforço de estruturas em serviço. A técnica de enrolamento de filamento exige a rotação do substrato, operação inviável para as estruturas existentes. O processo de câmara de pressão para ser aplicada em estruturas em uso exigiria a formação de uma câmara externa, acoplada à estrutura capaz de suportar as pressões necessárias à conformação. E a técnica de projeção por pistola é destinada à formação de compósitos de fibras picotadas e distribuição aleatória. Portanto, para as condições de obra, as técnicas de conformação mais adequadas são as laminações de tecidos pré-impregnados ou impregnados por imersão ou impregnados por pincelamento. Técnicas auxiliares que propiciem controle de temperatura, pressão, e umidade são possíveis mas são onerosos, devendo ser evitados ou limitados.

A laminação manual é um processo de aplicação de tecidos de reforço e resina catalisada em um molde aberto, onde é realizada a compactação através de roletes e pincéis para eliminar más acomodações das fibras, bolhas de ar, excesso de resina e conferindo assim mais qualidade de acabamento e resistência à peça. O processo de moldagem por contato manual pode ser

utilizado para a produção de peças extensas como cascos de embarcações de passeio e piscinas residenciais. A desvantagem geralmente associada a este método é a limitação à produção de peças com formatos relativamente simples.

2.4 Tecidos de sisal

O primeiro uso de fibras naturais como reforço de plásticos é atribuída à fibra de algodão utilizada em radar militar, e características como o desempenho mecânico, baixo custo, baixa densidade e vantagens no processamento são relacionadas como fatores que impulsionam a pesquisa e o uso das fibras naturais em substituição das fibras sintéticas. Mais recentemente, a escassez do petróleo e as preocupações ambientais revigoraram esta tendência pois as fibras naturais são provenientes de recursos renováveis e biodegradáveis. A tabela 2 apresenta a classificação das fibras vegetais quanto a origem anatômica e exemplos de fibras.:

Tabela 2. Classificação e exemplos de fibras vegetais.

100000 21	erussijieugus e enempres	tre just the regettines.
Caule	Fruto	Folha
Linho	Coco	Sisal
Cânhamo	Algodão	Henequen
Juta		
Rami		
Madeira		
	E . E 1 1 (1050)	

Fonte: Erhardt (1976).

As fibras naturais podem ser consideradas como polímeros naturais compostos principalmente por celulose hemicelulose e lignina, além de quantidades menores de açúcares livres, proteínas, extrativos, e produtos inorgânicos. Os componentes químicos são distribuídos entre as paredes

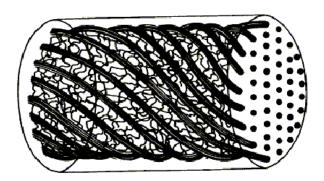
primária, secundária e terciária das paredes celulares. A parede secundária ainda apresenta duas diferentes camadas, interna e externa. Joseph, et al. (2000) relacionam os compostos das fibras naturais e as funções que estes desempenham nas fibras quando comparados aos materiais compósitos, tabela 3.

Tabela 3. Componentes das fibras naturais.

Componente	Característica do polímero	Função
Celulose	Altamente cristalino, orientado e moléculas	Fibra
	extensas.	
Hemicelulose	Semicristalino, moléculas curtas.	Matriz
Lignina	Amorfo, moléculas extensas.	Matriz
Extrativos	Alguns poliméricos outros não polimérico.	

Fonte: Joseph, et al. (2000).

O modelo das fibras naturais, como compósitos de celulose envolta em lignina e hemicelulose, é mostrado na figura 7.



Fonte: Bledzki e Gassan, 1999.

Figura 7. Modelo para a descrição da rigidez das fibras naturais.

A composição química das fibras vegetais varia de espécie para espécie e nas diferentes partes da mesma folha. Além disto, fatores como localização geográfica, idade, clima e condições do solo também alteram a composição química das fibras. Rowell; Han e Rowell (2000) apresentam tabelas que comparam a composição química de diversas espécies, como pode ser

observado na tabela 4 adaptadas dos autores. O sisal apresenta um elevado teor de celulose, característica relacionada ao desempenho mecânico. Assim como na madeira, as fibras naturais são compostas principalmente de celulose, lignina e hemicelulose que, combinadas, são freqüentemente descritas como compósito natural no qual cada componente desempenha uma função.

Tabela 4. Composição química de algumas fibras vegetais.

Tipo de Fibra	Celulose	Lignina
Sisal - agave	43-62	7-9,2
Bagaço de cana	32-48	19-24
Bambu	26-43	21-31
Semente de linho	43-47	21-23
Juta	45-63	21-26
Linho	57-77	9-13
Algodão	85-96	0,7
Fibras de madeira Conífera	40-45	26-34

Fonte: Rowell; Han e Rowell (2000)

A tabela 5 apresenta o desempenho mecânico e densidade de diversos tipos de fibras naturais.

Tabela 5. Comparação das propriedades físicas e mecânicas de fibras naturais e sintéticas.

Fibra	Densidade	Deformação específica	Resistência à tração	Módulo de Elasticidade
		na ruptura		
	(g/cm ³)	(%)	(MPa)	(GPa)
Sisal	1,5	2,0-2,5	511-635	9,4-22,0
Algodão	1,5-1,6	7,0-8,0	287-597	5,5-12,6
Juta	1,3	1,5-1,8	393-773	26,5
Linho	1,5	2,7-3,2	345-1035	27,6
Vidro	2,5	2,5	2000-3500	70,0
Aramida	1,4	3,3-3,7	3000-3150	63,0-67,0
Carbono	1.4	1.4-1.8	4000	230.0-240.0

Fonte: Bledzki e Gassan, (1999).

O sisal (agave sp) é uma monocotiledônea originária do México, com folhas estreitas e compridas, medindo de 10cm a 15cm de largura e 120cm a 160cm de comprimento, de cor verde e terminando por um espinho escuro. A figura 8 apresenta a seção transversal de fibra de sisal fraturada onde se pode observar a estrutura das paredes celulares.

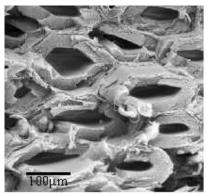


Figura 8. Seção transversal das fibras de sisal por MEV.

No campo, o processamento de sisal consiste no corte, o desfibramento, a lavagem/secagem e o batimento. O corte é feito rente ao tronco com uma faca ou foice, deixando cerca de sete folhas na planta. Em seguida, as folhas cortadas são transportadas em ganchos de madeira até o local do desfibramento. A retirada das fibras têxteis da folha do sisal é feito por uma máquina rudimentar a "Paraibana" sendo que, essa máquina possui um rotor que, quando em movimento, aciona um mecanismo, provocando o esmagamento da folha. A lavagem da fibra é feita no final do dia em tanques com água, onde é imersa durante a noite. Pela manhã, as fibras são colocadas em varais feitos com fios de arame, para secarem expostas ao sol.

A etapa seguinte é a preparação das fibras para a comercialização. Inicialmente é realizada uma pré-qualificação visual das fibras em função das impurezas presentes. O batimento consiste em remover o parênquima que

envolve a fibra do sisal, essa etapa se processa nas batedeiras - máquinas dotadas de um tambor rotativo que ao bater na fibra faz com que o parênquima se desprenda. Após o batimento, a fibra é classificada e enfardada para então ser comercializada.

As fibras têxteis de sisal são conhecidas por utilizações como: cordas, tapetes e em produtos artesanais. Outras utilizações menos conhecidas destas fibras são como matéria prima de papeis especiais e na indústria automobilística. A diversidade de aplicações requer que algumas definições sejam explicitadas. Os fios para tecelagem de tapetes são formados por fibras têxteis extraídas da folha de sisal com comprimentos que variam de 90cm a 150cm, unidas por torção, utilizadas pela indústria têxtil em tecidos de decoração. As fibras têxteis são compostas por feixes alinhados de células vegetais (fibras) cujo comprimento é da ordem de 5mm e diâmetro entre 10μ e 20μ. Segundo Silva (2003), as fibras têxteis também são conhecidas como fibras técnicas.

2.4.1 Tecelagem

Para fins estruturais, a distribuição das fibras na matriz exerce grande influência nas propriedades dos compósitos. Como visto, é conveniente alinhar as fibras com os esforços principais atuantes nas estruturas. A tecelagem de fibras sintéticas associadas à impregnação de resinas de alto desempenho mecânico e resistente às ações ambientais possibilitou o avanço em aplicações nas quais o desempenho mecânico deve ser elevado, como em materiais esportivos, na indústria automobilística, naval e aeroespacial.

Os arranjos das fibras podem ser classificados conforme as dimensões (curtas ou longas), a orientação (orientada ou aleatória) e a maneira pela qual as fibras estão unidas (isoladas, tecidas ou coladas).

Algumas solicitações mecânicas não possuem um sentido preferencial, como as contrações volumétricas por variações térmicas, químicas ou higroscópicas, e nestas situações a distribuição aleatória é mais adequada do que reforçar uma direção específica. A distribuição aleatória das fibras curtas em compósitos resulta num material com propriedades macroscópicas isotrópicas. A distribuição aleatória também é utilizada para reduzir os efeitos e riscos dos materiais com acentuado grau de anisotropia. Em geral, a obtenção de fibras curtas é realizada por corte das fibras longas. O processo de produção dos materiais é um fator condicionante do tipo de arranjo. Por exemplo, a moldagem de elementos plásticos em moldes envolve o fluxo da resina através de dutos e orifícios para o preenchimento dos moldes; as fibras misturadas às resinas devem ser de dimensões que não impeçam este fluxo. Outro processo de conformação no qual as fibras curtas são utilizadas é a pulverização simultânea das fibras e das resinas contra os moldes abertos.

Fios

Os fios de sisal são também conhecidos comercialmente como barbantes ou cordões. As fibras têxteis alinhadas podem ser mantidas unidas por torção resultando num material mais compacto conhecido como fio. Segundo Ribeiro (1984), as características da torção dos fios altera as propriedades mecânicas finais dos fios e é especificado pela quantidade de voltas dadas pela fibra por unidade de comprimento. Fios pouco torcidos

resultam num material maleável enquanto os fios produzidos com muitas voltas por unidade de comprimento resultam num material de maior resistência mecânica. A torção garante a união mecânica e o trabalho conjunto das fibras; entretanto exerce pouca influência sobre o custo dos fios pois a redução de produtividade em fios com maior número de voltas por comprimento é compensada pela alteração na velocidade das máquinas. Geralmente os fios são descritos através do diâmetro médio, admitindo-se um formato circular da seção. Esta simplificação é adequada para os processos adotados em diversas operações de tecelagem.

A especificação técnica e comercial de fios têxteis é a relação entre o comprimento de fio por unidade de massa, denominada titulação. A unidade de titulação pode ainda ser a expressão de uma relação com um padrão de referência. Existem 4 sistemas principais para expressar a titulação: o denier, o grupo Tex, o sistema inglês e o Sistema Internacional (SI). A relação entre o custo e a titulação dos fios é inversa: quanto mais fino, maior a titulação, é maior o custo do fio por unidade de massa.

Mantas de fibras longas

As mantas são arranjos de fibras têxteis longas nos quais as fibras são dispostas aleatoriamente num plano e mantidas unidas ou por compactação ou por pequenas quantidades de adesivo. Este tipo de arranjo geralmente é utilizado em peças caracterizadas geometricamente pela pequena espessura de uma das dimensões. Com este arranjo, procura-se obter um comportamento mecânico dos compósitos quase-isotrópico na placa.

Mechas

Diferentemente dos arranjos anteriormente descritos, as mechas compõem o grupo de arranjos de fibras têxteis orientadas, sendo as mechas orientadas em uma direção. Este tipo de arranjo é conveniente quando são conhecidas as direções dos esforços que atuarão sobre a peça. O arranjo em mechas consiste no alinhamento de uma porção de fibras longas podendo, ou não, ser unidas por adesivos aplicados em espaçamento pré-definido. As mechas também podem ser arrumadas em fitas impregnadas fornecidas em rolo.

Arranjos em tecidos

Os tecidos são arranjos de fios unidos por forças de contato e pelo intertravamento obtido nos diversos métodos de confecção. Gommers et. al. (1998) consideram três tipos diferentes de tecidos e apresentam os esquemas destas variações, como reproduzido na figura 9. Os tecidos urdidos, também conhecidos como tramados, são formados pela intercalação de fios em duas direções (figura 9a); os tecidos trançados são formados pelo cruzamento de fios em duas ou três direções, como na figura 9b; e os tecidos tricotados, como esquematizados na figura 9c, são formados pelo interlaçamento dos fios.





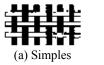


Fonte: Gommers, et al. (1998).

Figura 9. Arranjos de tecidos urdidos(a), trançados(b) e tricotados(c).

Segundo Carvalho, Cavalcanti e Cavalcante (2000), os tecidos tramados são os mais comuns como reforço em plásticos, principalmente em compósitos de alto desempenho. Os tecidos tramados são produzidos principalmente pela tecelagem automática ou manual de fios. Os fios são dispostos alinhados verticalmente no urdume e, através de laços, são divididos em dois grupos e elevados ou baixados para a passagem dos fios da trama (horizontais). Os fios da trama são lançados entre os fios do urdume e compactados pela batida de um pente. A densidade do tecido ou espaçamento entre os fios depende do pente utilizado e da força de batida do pente. Dependendo do padrão empregado, se obtêm diferentes padrões de tecidos. As propriedades mecânicas do tecido tramado são controladas principalmente por parâmetros tais como o arranjo do tecido, natureza, dimensões e torção do fio e espaçamento entre os fios ou densidade do tecido.

Existem quatro tipos principais de tecidos tramados; os tipos usuais são o tipo simples e o tipo sarja. O tipo simples é obtido pelo cruzamento alternado de fios perpendiculares e o tipo sarja é o cruzamento alternado de dois ou mais fios. Na figura 10, são apresentados os esquemas de algumas tramas encontradas em tecidos urdidos.









Fonte:Barracudatec (2003)

Figura 10. Tipos de arranjos encontrados para tecidos tramados

Segundo Carvalho, Cavalcanti e Cavalcante (2000), os tecidos tricotados são caracterizados pela interligação de um fio em laçadas utilizando-se agulhas de tricô. Neste tipo de tecido, uma série de pontos de

tricô ou laçadas são interconectadas pela agulha que faz com que o fio passe através de uma laçada previamente efetuada para formar uma nova laçada. Numa estrutura tricotada, ao longo da largura do tecido, na direção horizontal, tem-se as carreiras de pontos e, na direção vertical, tem-se as colunas ou cordões. As laçadas nas carreiras e nos cordões são interconectadas formando o tecido. Os tecidos tricotados têm apresentado elevada produtividade, baixo custo e elevada elasticidade, anisotropia reduzida, bom ajuste do tecido no desenvolvimento de compósitos com formas complexas, e resistência ao impacto. A diferença no alinhamento das fibras entre os tecidos tricotados e tramados é a principal razão para os diferentes comportamentos apresentados por esses tecidos. A maneira de configurar os arranjos também impõe diferenças físicas entre tecidos tramados e tricotados, como a baixa fração volumétrica de fibras no compósito e a maior espessura final dos tecidos devidos às laçadas.

Tecidos Unidirecionais

Os tecidos unidirecionais apresentam poucas fibras na direção perpendicular com o principal objetivo de manter as fibras da direção principal unidas, Friorelli (2002).

2.4.2 Tratamento das fibras

O tratamento das fibras é conduzido para melhorar as condições de adesão entre as fibras e a matriz ou ainda para alterar as características das fibras. Alguns dos resultados obtidos têm sido o aumento da rugosidade e a superfície exposta das fibras, a remoção da lignina externa das fibras, ou o

aumento da cristalinidade dos polímeros naturais das fibras. A seguir, são descritos trabalhos que resumem os tratamentos usuais.

Li et al (2000) apresentam uma revisão sobre compósitos com fibras de sisal e sobre os tratamentos usuais das fibras, e argumentam que o tratamento das fibras pode aumentar a adesão entre a fibra e a matriz, e ao mesmo tempo, reduzir a absorção de água. Os métodos apresentados são:

- Introdução de agentes acoplantes como os silanos;
- Grafitização com peróxidos;
- Tratamentos com álcalis ou permanganatos para aumentar a superfície exposta e a rugosidade superfícial da fibra; e
- Tratamentos térmicos.

Rong et al. (2001), estudando tratamentos superficiais em compósitos de sisal e epóxi, concluíram por algumas orientações de preparação destes compósitos. As fibras de sisal podem ser quimicamente modificadas por tratamentos físicos e químicos. Os processos químicos se destinam a ativar a superfície introduzindo compostos reativos para obter fibras com maior extensibilidade devido à remoção parcial da lignina e da hemicelulose. O tratamento térmico das fibras pode resultar em fibras mais rígidas devido ao aumento da cristalinidade da celulose. A adesão entre as interfaces das células externas do sisal e do epóxi é um aspecto decisivo no comportamento mecânico dos laminados. No caso dos ensaios de tração, o aumento da interação entre matriz e fibra na interface inibe a fratura transversal e serve como um pré-requisito para o aumento da resistência e do módulo de elasticidade, enquanto que ligações intercelulares mais fracas facilitam o arrancamento das células externas, provocando o estiramento das

microfibrilas nas células que contribuem para o desempenho mecânico dos compósitos. As fibras de sisal tratadas aumentam a resistência e a adesão entre o contorno das fibras e a matriz.

O tratamento mais recorrente é a imersão das fibras em hidróxido de sódio (NaOH) em concentrações até 10%, Mochnacz et al (2002); Amico et al (2001), Joseph, Thomas e Pavithran (1996); Silva, Silvestre et al (2000); são exemplos de pesquisadores que conduziram o tratamento de mercerização nas fibras de sisal.

2.4.3 Poliuretanas (PU)

Os termos poliuretanas ou poliuretanos referem-se a um grupo de materiais compostos por macromoleculares contendo a ligação uretana repetida vezes e, esses polímeros não são derivados de um processo de policondensação uretana, usualmente derivada da reação de um isocianato com um grupo hidroxila.

As poliuretanas são materiais essenciais usados na fabricação de produtos para uso final e aplicações industriais, como estofados e peças de interior de automóveis, móveis, colchões, eletrodomésticos, construção, revestimentos, adesivos, selantes e elastômeros. A ampla utilização dos sistemas poliuretanas pode ser atribuída: ao baixo consumo energético, a facilidade com que as condições de processo e as propriedades dos produtos podem ser ajustadas. Segundo Forest Products Laboratory (1999), as poliuretanas comerciais apresentam ampla variedade de viscosidade, são fornecidas em sistemas mono ou bicomponente, variadas tonalidades entre o

amarelo e o marrom e também transparente. Como o adesivo é aplicado diretamente sobre a superfície do substrato, apresenta reatividade com a água superfícial e do ambiente; a cura é realizada à temperatura ambiente e com pressões superiores às da pressão atmosférica. A resistência não se altera significativamente quando estão úmidos ou secos. É resistente à água e à umidade atmosférica, resistência limitada para ciclos de molhagem e secagem. Nas construções, as poliuretanas são aplicadas como adesivo em sistemas de pisos e divisórias; compensados, laminados com metal e plástico.

Segundo Vilar (2002), os produtos produzidos com poliuretanas têm apresentado crescimento de consumo. O autor compara os sistemas de dois e um componente e ressalta que os sistemas de dois componentes possuem como desvantagem a necessidade de mistura dos reagentes, em proporções estequiométricas, o que exige o uso de equipamentos ou de mão-de-obra adequada; enquanto as poliuretanas de um componente normalmente são prépolímeros com baixo teor de NCO livre, curados com a umidade do ar. Os sistemas monocomponente podem ser aplicados com equipamentos automatizados, nas produções em grande escala.

Segundo Vilar (2002), os adesivos de um componente à base solvente podem ser reativos ou totalmente reagidos. Os sistemas de um componente totalmente reagido são soluções de PU de alto peso molecular que formam filmes pela evaporação do solvente. Com a utilização de solventes voláteis, os filmes enrijecem e adquirem bom comportamento se submetidos a ações mecânicas. Estes sistemas utilizam principalmente o di-isocianato de difenil metano (MDI) e que são fornecidos em soluções de 5 a 25% de resina.

A polimerização das poliuretanas de um componente pode ser por cura com a umidade do ar; com isocianatos bloqueados; com secagem ao ar, ou radiação UV ou com feixe de elétrons. Os sistemas de cura com a umidade do ar são constituídos de prepolímeros com terminação isocianato que curam à temperatura ambiente por reação com a umidade do ar. Os prepolímeros, com teor de NCO livre de 3 a 16% são fabricados pela reação de um poliol e um di-isocianato como por exemplo o di-isocianato de difenil metano (MDI) ou o di-isocianato de tolueno (TDI) ou poliisocianato (MDI-polimérico) e são estocados à temperatura ambiente, sob atmosfera seca. Stevens (1999) descreve a reação entre o poliol e o di-isocianato conforme equação (8).

No processo de cura, baseado na reação NCO/água, são formados poli(uretano/uréia) de alto peso molecular; entretanto, o desprendimento de gás carbônico (CO₂) pode acarretar bolhas em linhas de cola espessas. Stevens (1999) descreve as reações de cura por umidade (H₂O) conforme equação (9).

Estes adesivos normalmente necessitam de pelo menos 40% de umidade relativa do ar para que se processe a cura. Na construção civil, os adesivos monocomponente de poliuretanos, curados com a umidade do ar, na

temperatura ambiente, são aplicados em juntas com movimentos severos em metais, vidro, cerâmica, madeira, plástico, concreto e alvenaria.

2.4.4 Resina Epóxi (EP)

A adesividade entre resinas epóxi e materiais celulósicos tem sido estudadas e os resultados relatados são de excelente desempenho. Os epóxi são considerados resinas versáteis, podem se apresentar nos estados: sólido ou líquido, com maior ou menor viscosidade. As resinas epóxi comerciais são polímeros derivados do petróleo que podem formar ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas; estas configurações estruturais resultam em polímeros de alta resistência, resistentes à umidade, estável quimicamente em contato com outros compostos químicos, dimensionalmente estável quando submetidos a ações de longa duração. Apresentam estabilidade dimensional no processo de polimerização, resistência à abrasão e a impactos, além de poderem ser moldados a frio. O comportamento mecânico dos epóxi usuais não é alterado até temperaturas de 60°C, porém, sistemas especiais podem manter o comportamento mecânico inalterado até os 200°C. Os sistemas epóxi são usados na formulação de tintas protetoras de alto desempenho para manutenção industrial, revestimento de alta resistência química, tintas marítimas, isolamentos elétricos, adesivos diversos, laminados, pisos, ferramentaria, modelação, construção civil. Flower (1995) aponta as resinas epóxi como fundamental no desenvolvimento histórico dos compósitos estruturais e como as pesquisas continuam intensas. Como desvantagens são relacionados o longo tempo de cura, a absorção de umidade e a necessidade de armazenamento em baixas temperaturas. Além disso, o

desenvolvimento das resinas epóxi e o sigilo comercial das formulações reduzem ou dificultam a obtenção de informações detalhadas das resinas por seus respectivos fabricantes.

A norma americana ASTM D1763 discrimina seis diferentes tipos de resinas epóxi, entre as quais se destacam pelo uso comercial três tipos:

1- Resinas epóxi à base de bisfenol A; são as mais utilizadas, pois são versáteis e de menor custo, proveniente da reação de epicloridrina e bisfenol A, podem ser líquidas, semi-sólidas ou sólidas dependo do peso molecular;

Figura 11. Oligômero preparado a partir do bisfenol A e epicloridrina.

O peso molecular do oligômero pode ser ajustado com o teor de epicloridrina obtendo-se diferentes viscosidades de líquidos até sólidos em função do grau de polimerização. Stevens (1999) descreve as reações intermediárias para obtenção das resinas epóxi.

- 2- Resinas epóxi à base de bisfenol F (Novolac). O uso de bisfenol F propicia às resinas epóxi maior número de ligações cruzadas e melhor desempenho mecânico, químico e térmico, principalmente quando curado com aminas aromáticas ou anidridos;
- 3- Resinas epóxi Bromadas: são resinas à base de epicloridrina, bisfenol A e tetrabromobisfenol A, com esses quatro átomos adicionais de bromo as resinas não propagam chamas.

Devido aos custos, diversas aplicações utilizam cargas minerais como por exemplo: materiais pulverulentos de carbonato de cálcio, alumínio, ferro, quartzo, calcita, talco; ou material granular de alumínio ou quartzo. O uso de cargas reduz a contração e a reação exotérmica durante a cura, proporciona um menor coeficiente de dilatação térmica, melhora a condutibilidade térmica, reduz a deformação no calor, diminui os custos de produção e reduzem a absorção de água.

As hidroxilas presentes na celulose podem reagir com o epóxi pois apresentam grupamentos éteres alifáticos que catalisam reações de eterificação hidroxila - epóxi, mas a reação pode ser impossibilitada em função da reatividade do agente de cura.

O epóxi é polímero com ampla utilização em laminados estruturais. Wheeler e Hutchinson (1998), comparando resultados entre epóxi e poliuretanas comerciais, ressaltam que madeiras com umidade superior a 22% não apresentaram significativa perda na adesão, e ciclos de umidade não afetaram a resistência de adesão. Os autores mencionam a significativa variabilidade dos resultados obtidos no trabalho, atribuída à variabilidade da madeira. Comparando sistemas epóxi e poliuretanas, observaram que as resinas poliuretanas apresentam menor resistência de aderência quando as madeiras contêm teores de umidade superiores a 10%, sendo a ruptura

Reação de um álcool sobre um ácido carboxílico, muitas vezes catalisada por um ácido

mineral.

observada no adesivo. A comparação entre os adesivos epóxi e poliuretanos indicaram que os poliuretanos apresentam redução no desempenho mecânico quando submetidos a ciclos de umidificação e secagem.

O uso de compósitos de fibra de vidro impregnados com epóxi também foi estudado recentemente por Fiorelli (2002) que conclui que as resinas epóxi são excelentes materiais para impregnação de tecidos por ter características físicas e químicas adaptáveis a muitas situações de conformação, possuindo bom desempenho de adesividade em diversas condições de temperatura e umidade variadas. Quando curados, os polímeros epoxídicos apresentam bom desempenho mecânico e boa adesividade à madeira.

2.5 Colagem

Os adesivos são substâncias que mantêm unidos dois materiais através de uma superfície de contato. Adesivos são usados na indústria de madeira para a produção de vigas laminadas coladas, madeira compensada, e união de elementos de madeira em vigas caixão. Em aplicações estruturais, o adesivo deve ser tão durável como os componentes unidos.

Outra categoria de adesivos inclui os que são usados para aplicações essencialmente não estruturais. Estas são aplicações onde as tensões atuantes nas interfaces são baixas, por exemplo, no verniz e em camadas de acabamento superficial ou em aplicações onde as conseqüências de colapso não são críticas. Em cada aplicação, as exigências específicas condicionam a

escolha do adesivo. Os critérios principais incluem custo, facilidade de uso, desempenho estrutural e durabilidade.

Até 1930, os adesivos principais eram colas animais (de sangue, peles, tendões, osso e cartilagem), e caseina (de leite). Adesivos produzidos de goma e grãos eram predominantemente usados na produção de chapas. Estes adesivos são todos suscetíveis à umidade alta e sofrem ataques de microorganismos. As resinas sintéticas foram desenvolvidas para suprir a necessidade de maior confiabilidade estrutural e adesão durável; são produtos provenientes da indústria petroquímica embora alguns sejam encontrados naturalmente nas madeiras, como os taninos. As resinas sintéticas mais comumente usadas como adesivos são à base de formaldeídos e as resinas epóxi.

Segundo FPL (1999), os polímeros sintéticos podem ser desenvolvidos e sintetizados como adesivos podendo ser caracterizados como termoplástico ou termofixo. Os termoplásticos são longas cadeias poliméricas que amolecem e tornam-se fluidos quando aquecidos e novamente rígidos quando resfriados. Os termoplásticos são geralmente pouco resistentes ao calor e a carregamento mecânico de longa duração. Alguns adesivos termoplásticos são as emulsões de poliacetato de vinila, elastômeros. Polímeros termofixos são excelentes adesivos estruturais porque são formados por reações irreversíveis. Eles possuem ligações cruzadas entre as cadeias poliméricas, possuem resistência mecânica superior aos termoplásticos, são resistentes à umidade, e suportam esforços por longo tempo sem deformações. Como

exemplos, resinas adesivas termofixas são as fenólicas, resorcinólicas, as melaminicas, os isocianatos, as uréias e as epóxidicas.

As condições em que se apresenta o substrato para aderência exercem forte influência sobre o desempenho dos adesivos. As características das superfícies que podem ser ressaltadas como preponderantes na interface de contato são a molhabilidade e a energia livre superficial. Podem ser realizadas operações mecânicas que propiciem melhor adesão, incrementando o intertravamento mecânico. A adesão química é explicada através de três teorias: da difusão, eletrônica, ou da adsorção; nestes casos, tratamentos superficiais alteram o comportamento das ligações, tanto colaborando quando se utilizam acoplantes quanto prejudicando quando impurezas bloqueiam o contato entre o adesivo e o substrato.

Materiais lignocelulósicos, como a madeira, possuem hidroxilas reativas, que podem formar ligações químicas com os grupos NCO (Vilar, 2002). A colagem do compósito nos elementos de madeira pode ser realizada de duas maneiras: consolidação simultânea ou seqüencial. Na consolidação simultânea, ao mesmo tempo em que a resina cura, o compósito é consolidado em contato com a madeira. A consolidação seqüencial consiste na formação prévia do compósito, em chapas, e a posterior colagem do mesmo no elemento de madeira

A consolidação simultânea do compósito e a colagem da madeira possui vantagens como a redução do número de operações necessárias. Por outro lado, a consolidação do compósito para posterior colagem na madeira possibilita a industrialização do compósito e maior controle de qualidade.

2.6 Considerações sobre a revisão bibliográfica

Existem muitas construções de interesse histórico e cultural que, para serem reabilitadas ao uso, necessitam de reforço estrutural. A solução para reforço das estruturas de madeira com materiais compostos de polímeros e fibras de reforço atende a critérios econômicos, estéticos, de segurança e conforto estrutural. Existe também a possibilidade de reforço de novos elementos estruturais industrializados aumentando assim o seu desempenho. O custo econômico e a escassez dos recursos não renováveis utilizados em reforço com os compósitos de fibras sintéticas usuais justificam a pesquisa de novos materiais alternativos como as fibras de sisal e os polímeros derivados de produtos naturais.

A eficiência do material composto depende significativamente do arranjo das fibras. Os arranjos artesanais não atendem a critérios de qualidade como a homogeneidade de produção. A industrialização dos tecidos de sisal é orientada ao mercado de decoração, ou como enchimento de componentes para a indústria automobilística. Portanto, é necessário o desenvolvimento de tecido com a finalidade específica de reforçar compósitos de uso estrutural.

A solução proposta deve atender também às condições de uso na construção civil. As estruturas de construções são substratos para reforço de grande extensão, e fixas. Os controles de pressão e temperatura, se não puderem ser evitados, não devem apresentar faixas estreitas de trabalho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa foram utilizados: tecidos de sisal, resinas poliuretanas e epóxi. As propriedades, a preparação e o processamento dos materiais utilizados, assim como, os métodos de ensaios utilizados na avaliação dos materiais, são descritos neste capítulo.

3.1 Tecido de sisal

Os tecidos da APAEB são formados pelo trançado de fios de sisal torcidos, coloridos. Os fios de sisal podem ser simples ou duplos, estes últimos resultantes da torção de 2 fios simples. O tecido inicialmente selecionado para os ensaios preliminares é um arranjo destinado à decoração de ambientes como por exemplo cortinas. Este tecido é flexível e relativamente leve, sendo denominado comercialmente de "telinha". A figura 12 apresenta o aspecto do tecido.

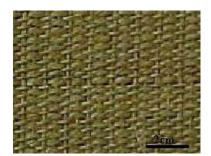


Figura 12. Aspecto do tecido "telinha" da APAEB.

A gramatura deste tecido é de 1543g/m². O esquema longitudinal da trama do tecido é apresentado na figura 13.



Figura 13. Esquema do arranjo dos tecidos de sisal.

Os fios da trama são bastante deformados para contornar os fios do urdume. O arranjo dos fios na direção principal é senoidal, o que implica em seções transversais não alinhadas aos esforços na direção destes fios. Este arranjo também contribui para a ocorrência de grandes deformações transversais quando o tecido for submetido a tensões no sentido principal.

Um novo tecido alternativo foi desenvolvido e avaliado como reforço dos compósitos estruturais. O tecido alternativo utilizado foi desenvolvido em conjunto com a APAEB e são formados pelo trançado de fios de sisal torcidos, coloridos e tratados quimicamente. Os fios de sisal podem ser simples ou duplos, estes últimos resultantes da torção de 2 fios simples. O arranjo do tecido está apresentado na figura 14c. Este arranjo apresenta a massa por superfície de tecido de 1385 g/m², espaçamento entre os fios da trama (e_t) de 1 cm enquanto o espaçamento entre os fios do urdume (e_u) é nulo, e a relação entre massas dos fios dispostos no urdume e na trama (U/T) é de 6 vezes.

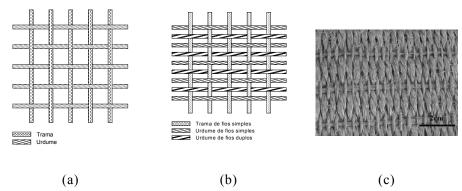


Figura 14. Arranjos de tecidos urdidos e tramados: 2a, arranjo simples; 2b, arranjo composto e 2c, arranjo do tecido de sisal utilizado.

Este tecido foi desenvolvido com o objetivo de se obter a maior quantidade possível de fios em uma única direção e a menor quantidade possível de fios transversais.

3.1.1 Tratamentos dos tecidos

A avaliação da umidade do tecido de sisal em São Carlos foi realizada em amostras deixadas em condições ambiente, e posteriormente secas em estufa a 100±2°C até não se encontrar variação, na determinação da massa, superior a 2%. Os resultados obtidos em ensaios realizados em diferentes meses do ano variaram entre 8% e 10% de umidade no tecido de sisal quando armazenado em condições ambientais.

As moldagens das amostras de compósitos foram precedidas pela secagem dos tecidos para retirar a umidade livre, e adsorvida nas fibras vegetais. O critério adotado para definir o procedimento de secagem foi fixar uma temperatura de secagem que não altere as fibras de sisal e estabelecer um tempo em estufa para o qual não se verifique variação de massa decorrente da perda de umidade. O procedimento adotado considerou o tecido seco ao ar, e posterior secagem em estufa, por 24 horas a 80±3°C.

A mercerização é um tratamento alcalino que resulta na remoção parcial da hemicelulose e da lignina, o que aumenta a cristalinidade das fibras, com redução do diâmetro e da densidade das fibras (Bledzki; Gassan, 1999). A avaliação dos efeitos da mercerização dos tecidos de sisal foi realizada com duas amostras do tecido retiradas; uma foi tratada com hidróxido de sódio, outra não foi submetida ao tratamento. A amostra tratada foi imersa em uma solução de hidróxido de sódio a uma concentração de 10% em massa, por 1 hora em temperatura ambiente; a solução foi preparada com 15ml de solução para cada 1g de tecido. Após o tratamento, a amostra foi lavada em água destilada, e em seguida, seca ao ar por 24 horas. Tanto a amostra tratada como a não tratada foram secas em estufa a 80°C até que leituras consecutivas de massa não apresentassem diferença superior a 1%.

3.2 Poliuretanas

Neste trabalho, se analisou 3 tipos de poliuretanas, sendo duas desenvolvidas no IQSC, e, uma terceira, monocomponente. A tabela 6 apresenta as diferentes designações, os fornecedores e a quantidade de componentes de cada poliuretana.

Tabela 6. Descrição e designação das poliuretanas utilizadas.

Designação	Fornecedor	Componentes
IQSC-GQATP	Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros	2
Comercial: AMU301	Produtos Químicos do Nordeste LTDA	2
IQSC-GQAMR	Grupo de Química Analítica e Materiais de Referência	1

Jesus (2000) apresenta os componentes e a rota de obtenção da poliuretana bicomponente derivada do óleo de mamona desenvolvida pelo

Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química de São Carlos – USP. Avaliou-se a resina como adesivo para a fabricação de madeira laminada colada (MLC) com resultados experimentais que demonstram a viabilidade técnica dessa proposta.

A poliuretana AMU301 foi fornecida pela empresa Produtos Químicos do Nordeste LTDA (Proquinor) que produz sistemas elastômeros de poliuretanas também bicomponente contendo o óleo de mamona. A partir das necessidades específicas do presente trabalho, a Proquinor desenvolveu o produto AMU301 com as seguintes características informadas pelo fabricante:

Tabela 7. Características da poliuretana monocomponente - GQAMR.

Propriedades	Valor	Unidades e observações
Tempo de gel	35	minutos
pico exotérmico	64,5	$^{\circ}\mathrm{C}$
viscosidade à 25°C	4.743	cps

A poliuretana monocomponente foi desenvolvida no Grupo de Química Analítica e Materiais de Referência (GQAMR - IQSC), inicialmente desenvolvida para formação de filmes para pinturas, e, posteriormente, modificada para aplicações como adesivo. Segundo Carlo e Polito (2001), o adesivo à base de óleo de mamona é um sistema poliuretana monocomponente, estabilizado pela umidade do ar. Os principais componentes utilizados para elaboração deste adesivo são: óleo de mamona, propilenoglicol, trimetilolpropano, tolueno diisocianato, xileno, acetato de etil glicol, antioxidante fosforado, e opcionalmente utiliza-se o aditivo dibutil dilaurato de estanho (DBTDL) na concentração 0,02 em massa. Silva

e Gonçalves (2002) apresentaram o desenvolvimento de chapas produzidas com fibras de madeira utilizando esta poliuretana modificada para ser empregado como adesivo. Rodrigues e Altafim (2002) mostram estudos das propriedades elétricas e mecânicas da madeira impregnada com a mesma resina poliuretana.

A tabela 8 apresenta algumas características da poliuretana monocomponente desenvolvida no Instituto de Química de São Carlos (IQSC) da Universidade de São Paulo (USP), pelo Grupo de Análise Química e Materiais de Referência (GQAMR).

Tabela 8. Características da poliuretana monocomponente - GQAMR.

Propriedades	Valor	Unidades e observações
Viscosidade Brookfield	75,20	cps
Densidade	0,96	g.cm ⁻³
Solventes		Ésteres e Aromáticos
Teor de NCO	2,20	% sobre sólidos
Teor de Sólidos	35	0/0

Fonte: Carlo e Polito (2002)

3.3 Epóxi

As resinas epóxi utilizadas são designadas comercialmente de "Sistema AR-300", fornecida pela Barracudatec Tecnologies & Products LTDA. Segundo o fornecedor, o sistema epóxi AR-300 foi desenvolvido para uso nos processos de fabricação em fibra de vidro, fibra de carbono e fibras aramidas em componentes de material com baixo peso. O sistema é composto por uma formulação de resina epóxi e endurecedores com diferentes velocidades de cura. A resina foi desenvolvida para ser adequada a variadas condições de impregnação com elevada molhabilidade e baixa viscosidade. O

tempo em aberto, ou tempo de trabalho, pode ser ajustado com a combinação de dois endurecedores. O sistema resina - endurecedor foi desenvolvido na proporção de 3:1, respectivamente, e é totalmente curado sem a necessidade de pós-cura (aquecimento após a conformação), não apresenta amina secundária do epóxi possibilitando laminações adicionais e colagens estruturais. A tabela 9 apresenta as propriedades do sistema informadas pelo fabricante.

Tabela 9. Propriedades físicas após a cura total

Endurecedores	AH 30	AH 150
Viscosidade (CPS)	900	350
Tempo de trabalho, min	30	150
Tempo de gel (150g, 25°C), min	30	300

Propriedades após a mistura a 25°C. Fonte: O fornecedor

A tabela 10 apresenta as propriedades mecânicas do sistema de resina epóxi, informadas pelo fabricante.

Tabela 10. Propriedades físicas e mecânicas após a cura

	otal.	
Endurecedores	AH30	AH150
Elongação (%)	3,2	3,2
Contração	< 0.002	< 0.002
Módulo de elasticidade (GPa)	2,6	2,6
Resistência à flexão (MPa)	9,4	10,1
Resistência à compressão (MPa)	13,9	15,9

Fonte: O fornecedor

Após contatos com o fornecedor e ensaios preliminares, foi selecionado o endurecedor AH150 de menor viscosidade e maior desempenho mecânico.

3.4 Ensaios físicos

Os ensaios físicos realizados foram as microscopias ópticas e eletrônicas para a avaliação das impregnações e das interfaces entre os

materiais. Também foram realizadas medidas de densidade por picnometria de gás hélio nas fibras de sisal.

3.4.1 Densidade por picnometria de hélio

Segundo Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais (CCDM, 2003), o ensaio de determinação de densidade em materiais sólidos e particulados por picnometria de hélio é considerado real se a amostra não apresentar poros fechados oclusos, caso contrário, o valor obtido é da densidade aparente. Este ensaio usualmente é utilizado na determinação de densidade em materiais sólidos, particulados e géis desde que não contenham gases voláteis. O equipamento utilizado é o Ultrapycnometer 1000, modelo UPY-1, produzido pela Quantachrome Corporation.

3.4.2 Microscopia óptica

As microscopias ópticas por transmissão e por reflexão têm sido utilizadas para avaliar a superfície das fibras, identificar e avaliar o aprisionamento de bolhas resultantes do processo de polimerização da resina ou de ar incorporado nos processos de mistura das resinas, e conformação do compósito. As informações obtidas são a localização preferencial e as dimensões das bolhas formadas.

3.4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os microscópios eletrônicos são instrumentos que usam um feixe de elétrons com elevados níveis de energia para avaliar amostras. Este ensaio tem sido aplicado para se obter as seguintes informações: textura superficial;

morfologia; composição química; e informações cristalográficas por Raio X, sendo que cada tipo de informação requer um tipo específico de configuração do microscópio eletrônico ou por dispositivos próprios. Os microscópios eletrônicos funcionam como de forma semelhante aos ópticos, a não ser que usem um estreito feixe de elétrons em vez de luz na formação da "imagem" da amostra.

O princípio básico de funcionamento do microscópio eletrônico é a emissão de um feixe de elétrons contra a amostra; este fluxo é limitado e controlado por lentes de campos magnéticos. Os elétrons atingem a amostra com um determinado nível energético e várias interações podem acontecer: o retroespalhamento, a transmissão, a absorção e a emissão de freqüências eletromagnéticas com, por exemplo, o raio X.

A definição das imagens e a ampliação obtida nas imagens têm auxiliado diversos trabalhos científicos. Costa, Rezende e Almeida (2000) utilizaram a microscopia eletrônica de varredura (MEV) para obter dados sobre a distribuição, formato e localização preferencial dos vazios nas amostras tanto de tecidos unidirecionais como bidirecionais de carbono/epóxi. Silva, et al. (2000) utilizam imagens de MEV para a caracterização das superfícies fraturadas de compósitos de poliuretana e fibras de sisal.

No presente trabalho, se realizou microscopias eletrônicas para avaliar superfícies de fratura dos compósitos, as interfaces entre os materiais, e a formação de vazios não identificáveis em microscópios ópticos. Também se

realizou o MEV para avaliação dos efeitos de mercerização na morfologia superficial das fibras.

3.5 Ensaios mecânicos

As fibras têxteis, fios e tecidos de sisal, compósitos de sisal e resinas poliuretanas e epóxi foram ensaiados à tração, e os ensaios de flexão e cisalhamento foram realizados em corpos-de-prova de madeira associada aos compósitos para avaliar o desempenho das ligações entre a madeira e os compósitos de sisal e epóxi, assim como avaliar o reforço de vigas de madeira com sisal.

3.5.1 Tração em fibras têxteis e fios

Os ensaios em fibras têxteis e fios de sisal se realizaram no Laboratório de Polímeros do Departamento de Materiais da universidade Federal de São Carlos DEMA-UFSCar. Um dos aspectos mais importantes em ensaios de fibras e fios são os métodos de fixação dos corpos-de-prova. As garras que fixam os fios e fibras não devem provocar concentração de tensões mas ao mesmo tempo não devem deixar o material deslocar.

3.5.2 Tração em tecidos e compósitos

A metodologia adotada para a execução do ensaio foi o da norma americana ASTM D3039 (1997) que estabelece procedimento para a realização de ensaios de tração em materiais compósitos. A velocidade de deslocamento das garras da prensa foi limitada a 2mm/min. As dimensões dos corpos-de-prova foram 30mm x 240mm, maiores do que os limites

mínimos recomendados, pois o tecido é manufaturado a partir de cordas com diâmetros entre 2mm e 3mm. O equipamento utilizado na realização dos ensaios foi a máquina digital DARTEC do LaMEM (Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras), com capacidade nominal de 100kN.

3.5.3 Emenda submetida ao cisalhamento

Baraldi (1996), estudando ligações de corpos-de-prova de madeira por chapas de dentes estampados, submetidos ao cisalhamento, adotou as recomendações metodológicas descritas na norma NR7190/97 da ABNT. A proposta de substituição das chapas de dentes estampados por elementos colados foi conduzida para a avaliação das ligações madeira-adesivo-compósito submetidas ao cisalhamento, mas o método original foi adaptado. Observa-se que, no método de ensaio adotado por Baraldi (1996), os corpos-de-prova são montados com afastamento de 2mm para evitar o contato entre os elementos dos corpos-de-prova; entretanto, esta metodologia não se aplica a elementos colados pois o afastamento de 2mm entre os elementos dos corpos-de-prova provocaria concentrações de tensões nas interfaces das ligações.

O ensaio proposto elimina o afastamento entre os elementos dos corposde-prova e, para reduzir o atrito entre as superfícies, foi realizado o aparelhamento por plaina, a colagem de fita, e aplicando-se ainda um lubrificante (vaselina) sobre as fitas adesivas. As fitas com adesivo também são utilizadas para limitar a área de colagem dos compósitos na madeira. A figura 15 apresenta o aspecto da montagem dos elementos e dos corpos-deprova adotados.

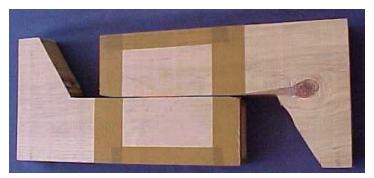


Figura 15. Corte e montagem dos corpos-de-prova para ensaio de ligações submetidas ao cisalhamento.

A figura 16 apresenta o esquema de aplicação dos compósitos nos elementos de madeira e o sentido de aplicação da força (F) durante a realização do ensaio. Durante o ensaio foram medidos os deslocamentos relativos entre os elementos de madeira (δ) por meio de relógios comparadores.

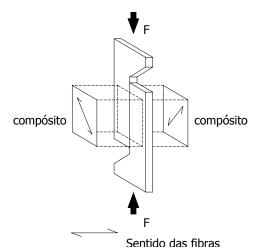


Figura 16. Esquema de aplicação dos compósitos nos elementos de madeira e de aplicação da força durante o ensaio.

A avaliação da rigidez das ligações submetidas ao cisalhamento é realizada em gráficos de força versus deslocamentos (F/δ) .

3.5.4 Flexão em vigas

A avaliação das alterações de rigidez em ensaios de flexão foi realizada para verificar as alterações de desempenho de vigas de madeira sem reforço e com reforço dos compósitos de sisal-epóxi. A variabilidade de comportamento das madeiras é elevada; portanto, os ensaios foram realizados dentro do regime elástico em vigas para a determinação da rigidez sem reforço. As vigas então foram reforçadas com os compósitos sisal-EP e novamente avaliada sua rigidez. O limite do regime elástico da madeira foi estimado com o ensaio de 3 corpos-de-prova piloto. A figura 17 apresenta o esquema do ensaio onde, o deslocamento no centro da viga (δ) foi medido por relógios comparadores, a distância entre o apoio e o ponto de aplicação da força (a) foi de 30cm, e a distância entre os apoios (l) de 100cm.

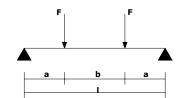


Figura 17. Esquema do ensaio de flexão em 4 pontos.

3.6 Processamento dos compósitos

Para análise dos diversos tipos de processamento dos polímeros reforçados com fibras, pode-se distinguir diversas fases: mistura, impregnação, compactação e moldagem, embora designações dos processos de conformação correntes ressaltem apenas um aspecto mais característico.

A mistura das resinas deve garantir a homogeneidade das resinas bicomponente, sendo que neste trabalho foi realizada manualmente. A moldagem garante a geometria especificada para o produto, tendo sido utilizado neste trabalho moldes planos.

A incorporação de bolhas de ar durante o processamento de polímeros reforçados com fibras é um problema que pode reduzir significativamente o desempenho dos compósitos. O processo de mistura das resinas bicomponente pode ser uma fonte de incorporação de bolhas de ar na resina. A mistura manual realizada com espátulas apresentou elevada incorporação de ar em resinas com viscosidade elevada. Então, optou-se por misturas de pequenas quantidades, depositadas em sacos fechados e misturadas manualmente dentro dos sacos.

3.6.1 Impregnação

A impregnação possibilita o envolvimento das fibras. As primeiras tentativas de impregnação dos tecidos de fibras de sisal foram realizadas por pincelamento das resinas sobre os tecidos. Este método é empregado na indústria naval para laminação de cascos de embarcações com mantas e tecidos, geralmente de fibra de vidro, e a extração de bolhas de ar é realizada também manualmente com roletes metálicos (Nasseh, 2000). Também foi avaliada a impregnação por imersão do tecido na resina possibilitando o envolvimento das fibras.

3.6.2 Compactação

Inicialmente, avaliou-se a moldagem livre, o tecido impregnado foi posto em repouso sobre bancadas, mas pode-se observar que não se obtém controle sobre a forma final do compósito pois a resina tende a se depositar no fundo do compósito resultando num material assimétrico, heterogêneo e de grande espessura. A assimetria causada pela maior quantidade de resina numa das faces resulta em deformações decorrentes da retração durante o processo de cura.

Os compósito compactados por pressão foram mantidos durante a cura entre 2 elementos que fixam a forma plana do compósito, como esquematizado na figura 18. As condições da compactação foram: pressão de 1,27MPa, temperatura ambiente, e o tempo de cura das resinas foi de 3 dias,

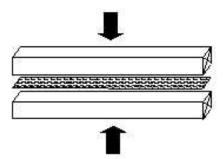


Figura 18. Esquema para conformação dos compósitos.

Este método de conformação atende aos requisitos necessários para aplicação deste material em canteiros de obras, pressão e temperatura ambiente mas são usais a utilização de fôrmas para a conformação de materiais processados *in loco*.

A compactação por vácuo foi realizada em pressão de 0,3atm durante 24 horas. Este processo tem sido empregado em compósitos estruturais com

fibras sintéticas como alternativa para se reduzir a quantidade de ar aprisionado em laminações de áreas extensas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ensaios de tração foram realizados em fibras, fios e tecidos de sisal; assim como em compósitos de sisal e resinas para avaliar o desempenho e o comportamento deste materiais. As composições de elementos de madeira e compósitos forma avaliadas em ensaios de cisalhamento e de flexão de vigas em 4 pontos. As microscopias estão apresentadas em conjunto com as análises dos resultados.

4.1 Fibras, fios e tecidos

Inicialmente, foram ensaiadas à tração as fibras têxteis, os fios formados por fibras retorcidas e os tecidos de sisal. Estes ensaios colaboram para o entendimento do comportamento dos compósitos submetidos à tração.

4.1.1 Tração em fibras vegetais

A avaliação do comportamento das fibras de sisal submetidas à tração iniciou-se com a avaliação da seção transversal média das fibras estimadas a partir da massa específica real das fibras de sisal (1,591g/cm³) determinada por picnometria de gás hélio, o comprimento e a massa total da fibra. Os ensaios de tração em 14 exemplares de fibras têxteis de sisal apresentaram comportamentos variados tanto nos parâmetros quantitativos quanto na forma

das curvas tensão versus deformação. A variabilidade do comportamento à tração destas fibras pode ser exemplificada nas curvas tensão versus deformação apresentadas na figura 19.

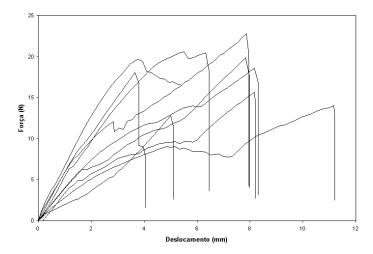


Figura 19. Ensaios de tração em fibras têxteis de sisal.

A tabela 11 apresenta os resultados médios e desvios padrões obtidos das áreas das seções transversais, deformações da ruptura, resistência e módulo de elasticidade à tração (MOE).

Tabela 11. Valores médios e desvios padrão de propriedades físicas e mecânicas das fibras têxteis de sisal.

		Deformação		
N=14	Área	específica	Resistência	MOE
		na ruptura		
	(cm^2)	(%)	(MPa)	(GPa)
Média	$7,42 \times 10^{-4}$	7,070%	218,3	10,69
Desvio padrão	$\pm 1,39 \times 10^{-4}$	±3,949%	±51,2	±6,95
Coeficiente de variação	18,8%	55,9%	23,5%	65,1%

A composição heterogênea das fibras naturais e as variações de seção ao longo das fibras têxteis, descrita na revisão bibliográfica, contribuem para a grande variabilidade observada na área das fibras. A variabilidade das

propriedades mecânicas avaliadas são decorrentes da heterogeneidade química e física das fibras têxteis.

A origem e o processamento das fibras têxteis de sisal podem colaborar para o entendimento dos resultados obtidos próximos ao limite inferior aos descritos na revisão bibliográfica. A composição química e a anatomia dos vegetais pode variar em função de fatores como o tipo de solo e a disponibilidade de água; também o processamento das fibras podem alterar o comportamento mecânico. Por exemplo, a limpeza mecânica por atrito realizada no inicio do processamento das fibras retira parte das substâncias superficiais das fibras, além de atuar como um pré-estiramento das fibras processadas.

A massa específica real obtida por picnometria de gás hélio apresentou resultado de 1,591g/cm³, compatível com os valores citados na revisão bibliográfica. A determinação da área média das fibras têxteis a partir da massa específica real evita processos de estimação por aproximação das seções transversais das fibras a círculos e medidas de supostos diâmetros.

4.1.2 Tração em fios

Os ensaios de tração realizados em 21 exemplares de fios de sisal apresentaram um comportamento mais uniforme quando comparados aos ensaios em fibras isoladas. Na figura 20, apresenta-se 4 exemplares: o de menor e o de maior resistência, o de maior módulo de elasticidade e um quarto selecionado como típico do conjunto por apresentar resultados resistência (f_t), deformação na ruptura (ε_t) e módulo de elasticidade (MOE)

mais próximos das respectivas médias. Nestes ensaios, avaliou-se a área de fibras da massa específica, semelhante às determinações realizadas para as fibras têxteis.

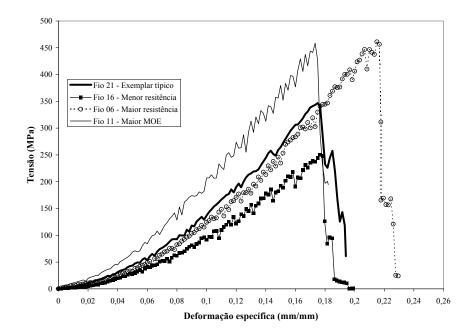


Figura 20. Curvas selecionadas de tração versus deformação em fios de sisal.

As curvas de tensão versus deformação em fios submetidos à tração apresentam um aspecto descontínuo e com progressivo ganho de rigidez, comportamento não usual em materiais homogêneos. O aspecto descontínuo pode ser atribuído a rupturas localizadas de uma ou de algumas fibras e uma posterior redistribuição de esforços entre as fibras próximas que passam a atuar sob novos níveis de tensão. A avaliação das tensões internas nos fios é complexa, à tração longitudinal resulta na tendência à retificação de cada fibra individual, no atrito entre fibras adjacentes e no confinamento das fibras internas. O aparente ganho de rigidez, com o aumento da declividade das tangentes às curvas, pode ser inicialmente explicado pelo aumento das

deformações e tensões transversais decorrentes do aumento da tensão de tração longitudinal. Assim, o ensaio pode ser dividido em duas fases: uma inicial, de acomodação das fibras com ganhos progressivos de rigidez do fio, e uma segunda etapa, com o comportamento próximo à linearidade da curva tensão versus deformação. Os módulos de elasticidade apresentados na tabela 12 foram calculados na segunda fase dos ensaios.

As estatísticas descritivas das medidas de área, resistência (f_t) , deformação na ruptura (ϵ_t) e módulo de elasticidade (MOE) dos fios ensaiados estão apresentadas na tabela 12.

Tabela 12. Resultados médios e desvios dos ensaios físicos e tração em fibras têxteis de sisal

<i>J</i>	fisicos e iração em fioras texteis de sisai.				
	,	Deformação			
N=21	Área	específica de	Resistência	MOE	
		ruptura			
	(cm^2)	(%)	(MPa)	(GPa)	
Média	$8,59x10^{-3}$	0,186%	365,6	6,31	
Desvio	$\pm 1,14 \times 10^{-3}$	±0,027%	±62,3	± 0.67	
padrão	±1,14X10	10,02770	$\pm 02,3$	±0,07	
Coeficiente	13,3%	14,5%	17,0%	10,5%	
de variação	13,370	14,370	17,070	10,370	

A comparação entre as áreas obtidas nas avaliações de fibras têxteis e fios de sisal demonstra que os fios ensaiados apresentam em média 11,6 vezes mais área que as fibras. Os fios também apresentaram resistência média 1,67 vezes maior. As comparações entre as deformações e os módulos de elasticidade evidenciam a redução na variabilidade dos resultados que podem ser explicados através das redistribuições de tensões e deformações entre fibras adjacentes.

4.1.3 Tração em tecidos

As curvas de força versus deslocamento obtidas dos ensaios de tração dos tecidos de sisal também apresentaram um aspecto descontínuo. Os tecidos são conjuntos de fibras têxteis e, portanto, também se pode compreender o comportamento descontínuo como resultado das rupturas localizadas, de uma ou de algumas fibras, e a posterior redistribuição de esforços entre as fibras próximas que passam a atuar sob novos níveis de tensão. Este comportamento também pôde ser constatado durante a realização dos ensaios pela emissão de estalos provenientes do corpo-de-prova, referentes às rupturas localizadas. A figura 21 apresenta o aspecto das curvas força versus deslocamento dos ensaios de tração em tecidos de sisal. As nove amostras ensaiadas apresentaram força média de ruptura de 1,27 kN com coeficiente de variação de 32,4%.

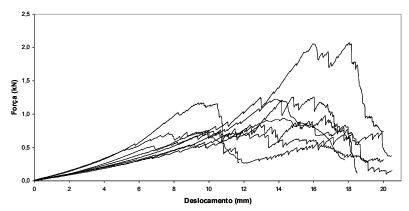


Figura 21. Ensaios de tração em tecidos de sisal.

Dois modos de ruptura foram identificados: a ruptura dos elementos de sisal, e o escorregamento das fibras, ambos causando grandes deslocamentos. Após os ensaios, os corpos-de-prova apresentaram o modo de ruptura apresentado na figura 22.

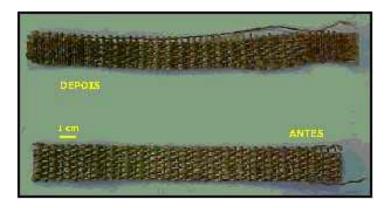


Figura 22. Corpos-de-prova de tecidos de sisal antes e após o ensaio de tração.

Os resultados da força de ruptura na tração em tecidos de sisal podem ser comparados aos obtidos por Fiorelli e Dias (2002), que caracterizaram o tecido unidirecional de fibra de vidro, com 15mm de largura, e obtiveram uma força média de ruptura de 1,66kN, e o coeficiente de variação de 7,73%. A tabela 13 apresenta a comparação entre os resultados com o tecido unidirecional de fibras de vidro e o tecido de sisal.

Tabela 13. Comparação de resultados de tração em tecidos

			minuos de mação e.	
Material do	Força de ruptura / largura do corpo-de- prova	C.V.	Massa específica por área (ρ2)	Força máxima específica
tecido	(N/mm)	(%)	(g/cm^2)	(N.m/g)
Fibra de vidro	110,9	7,73	600	184,8
Fibra de sisal	42,5	32,4	1385	30,7

A maior variabilidade verificada nos resultados dos ensaios conduzidos no tecido de sisal (32,4%) em relação ao tecido de fibra de vidro pode ser atribuída tanto às diferentes origens (industrial e natural) como aos diferentes comprimentos individuais das fibras. As fibras de sisal, embora longas, não são contínuas. A transferência de tensões entre fibras adjacentes depende das forças de contato entre elas. Já nas as fibras de vidro, estas são

contínuas e as tensões são transferidas diretamente às garras que fixam o exemplar na máquina de ensaio.

A comparação das forças de rupturas dos diferentes tecidos indica que o tecido unidirecional de fibra de vidro é 2,6 vezes mais resistente, para uma mesma largura, que o tecido de fibra de sisal ensaiada. E a comparação da resistência específica entre os tecidos, resistência por massa, indica que o tecido de fibra de vidro é 6 vezes mais resistente que o tecido de sisal ensaiado. A maior resistência dos tecidos de fibras de vidro confirma as expectativas dos dados da revisão bibliográfica.

Os ensaios nos tecidos de sisal também evidenciam que as fibras transversais que compõem os tecidos alteram o comportamento do sisal nos ensaios de tração. Os fios de sisal submetidos à tração apresentam comportamento mais homogêneo evidenciado tanto na covariância quanto nas curvas força versus deslocamento. Os tecidos submetidos à tração não apresentam uma fase linear nas curvas força versus deslocamento; apresentam apenas a fase de acomodação das fibras até alcançar a maior força possível e, em seguida, deslocamentos significativos.

4.2 Compósitos sisal - poliuretanas (PU)

Nestes ensaios, avaliaram-se as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona na impregnação de tecidos de sisal formando compósitos para uso como reforço estrutural. A tabela 14 apresenta a designação utilizada e a origem das poliuretanas derivadas do óleo de mamona.

Tabela 14. Relação entre designação e fornecedores de poliuretana.

Designação	Fornecedor	
IQSC-GQATP	Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros	
Comercial: AMU301	Produtos Químicos do Nordeste LTDA	
IQSC-GQAMR	Grupo de Química Analítica e Materiais de Referência	

Avaliaram-se os processos de impregnação (pincelamento e imersão), as interfaces entre a poliuretana e o sisal, ambos a partir de critérios de desempenho mecânico e de funcionalidade. Neste item são apresentados os resultados obtidos.

4.2.1 Sisal - PU bicomponente (GQATP)

A resina apresentou tempo em aberto, ou seja, disponível ao trabalho, de 30 minutos, embora suficiente para trabalhos em laboratório, é insuficiente para situações usuais em ambiente de canteiro de obras considerando que são necessárias às operações de impregnação do tecido e de aplicação do compósito na estrutura de madeira. O tempo em aberto se mostrou sensível à variação de temperatura ambiente, alterando significativamente as condições de trabalho com a poliuretana. A resina apresenta sensibilidade em contato com a umidade, resultando na liberação de gases no processo de polimerização. A figura 23 apresenta o aspecto visual do compósito tecido de sisal - poliuretana, onde se observa a formação intensa de bolhas em decorrência do processo de polimerização, sob confinamento e temperatura ambientes.



Figura 23. Aspecto visual do compósito sisal - PU bicomponente (GQATP).

4.2.2 Sisal - PU bicomponente, AMU301

A poliuretana comercial avaliada foi a fornecida pela Proquinor que produz sistemas elastômeros de poliuretanas também bicomponente contendo o óleo de mamona. A partir das necessidades específicas do presente trabalho, a Proquinor desenvolveu o produto designado como AMU301.

Os resultados dos ensaios de tração nos compósito de sisal-PU comercial apresentam módulo de elasticidade médio de 496MPa, desvio padrão de 75MPa e coeficiente de variação de 15,1%. As curvas força versus deslocamento dos 7 corpos-de-prova estão apresentadas na figura 24.

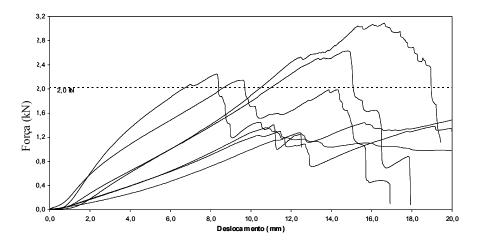


Figura 24. Gráfico força deslocamento limitado, para ensaio de tração, do compósito sisal - poliuretana bicomponente comercial.

As curvas da figura 24 foram limitadas em 20mm de deslocamento porque 3 amostras apresentaram o comportamento de ruptura semelhante aos tecidos, com grandes deslocamentos após a ruptura.

O compósito de matriz poliuretana e fibras do tecido de sisal apresenta comportamento, nos ensaios de tração, significativamente diferente do tecido por apresentar o aspecto descontínuo após as deformações do compósito passar do ponto de ruptura. A heterogeneidade entre as curvas tensão versus deformação é um aspecto que também se observa nestes compósitos.

4.2.3 Sisal - PU monocomponente (GQAMR)

O processo de impregnação adotado nestas amostras foi o pincelamento, moldagem e cura confinada, e a imagem por microscopia (figura 25) é apresentada para se obter uma melhor avaliação da distribuição de bolhas formadas no processo de cura da resina. Na imagem da lâmina intermediária do compósito tecido de sisal e poliuretana monocomponente, pode-se observar a formação de vazios (1) decorrente do processo de polimerização.

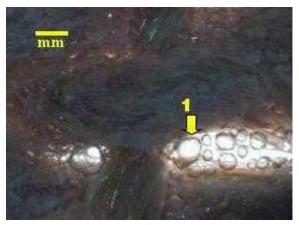


Figura 25. Imagem por microscopia de lâmina intermediária em compósitos de sisal e poliuretana monocomponente (GQAMR).

Os vazios observados são aproximadamente esféricos e foram aprisionados no interior dos nichos de resina, entre os fios de sisal que formam o tecido.

Na figura 26, são apresentados os gráficos do ensaio de tração (força x deslocamento) em compósito de poliuretana GQAMR e o tecido de sisal e a média das resistências máximas obtidas. Os deslocamentos na ruptura foram observados entre 5,3mm e 10,0mm.

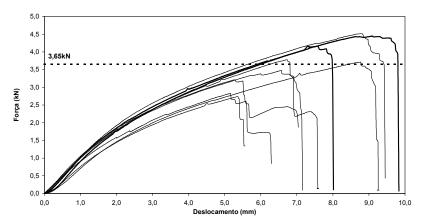


Figura 26. Gráfico força-deslocamento para ensaio de tração em compósito Sisal – PU(GOAMR).

A tabela 15 apresenta os resultados das forças de ruptura observadas em nove exemplares, com seção retangular de 3mm x 30mm.

Tabela 15.	Resultado do es	nsaio de tração	em PU(GQAMR),	sem aditivo,

	por pincelamento.	
	Máxima	4,51
	Média (\bar{x})	3,65
Força de ruptura (kN)	Mínimo	2,74
	Desvio padrão(s)	$\pm 0,65$
	s / \overline{x}	17,8%

O aspecto das curvas de força versus deslocamento apresenta comportamento uniforme com trechos lineares, diferentemente das curvas observadas nos ensaios realizados com a matriz de poliuretana AMU301. As heterogeneidades observadas são na força e no deslocamento de ruptura.

4.2.4 Sisal - PU (GQAMR), sem aditivo, imersão

A figura 27 e a tabela 16 apresentam os resultados dos ensaios de tração nos compósitos de tecido de sisal e poliuretana monocomponente (GQAMR), sem catalisador, e impregnação realizada por imersão.

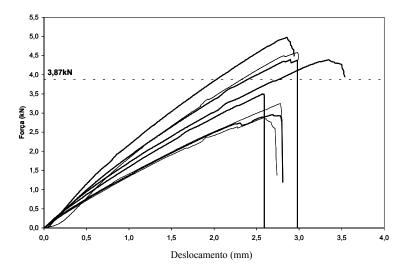


Figura 27. Gráfico de força x deslocamento para ensaios de tração em compósitos de sisal - PU (GQAMR), sem aditivo, imersão.

Tabela 16. Resultados do ensaio de tração em PU(GQAMR), sem aditivo,

	por imersão.	
	Máxima	4,97
	Média (\bar{x})	3,87
Força de ruptura (kN)	Mínimo	2,88
	Desvio padrão(s)	± 0.81
	s / \overline{x}	20,9%
Mádula da	Média (\bar{x})	3,49
Módulo de elasticidade (GPa)	Desvio padrão(s)	$\pm 0,732$
	s / \overline{x}	21,0%

O processo de impregnação por imersão apresentou forças de ruptura superiores ao processo de impregnação por pincelamento. As curvas de força versus deslocamento apresentam maior homogeneidade com trechos retilíneos melhor definido. A heterogeneidade nas forças de ruptura também se apresentam elevadas. As diferenças entre o comportamento do compósitos impregnados por pincelamento e por imersão pode ser atribuído à redução no aprisionamento de ar durante o processo de impregnação pois o tecido de sisal é relativamente espesso e a resina, por apresentar viscosidade elevada, dificulta a saída das bolhas.

4.2.5 Sisal - PU (GQAMR), com aditivo, imersão.

A figura 28 e a tabela 17 apresentam os resultados dos ensaios de tração realizados em oito exemplares de compósitos de tecido de sisal e poliuretana monocomponente (GQAMR), com o aditivo dibutil dilaurato de estanho (DBTDL) na concentração 0,02 em massa, e a impregnação foi realizada por imersão.

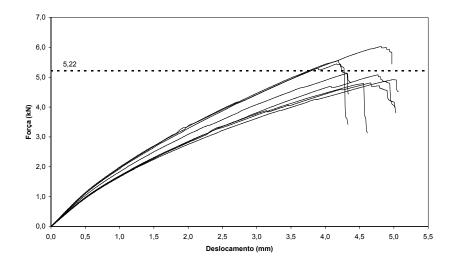


Figura 28. Resultados do ensaio de tração em compósitos de sisal - PU (GQAMR), com aditivo, imersão.

Tabela 17. Resultados do ensaio de tração em PU(GQAMR), com aditivo,

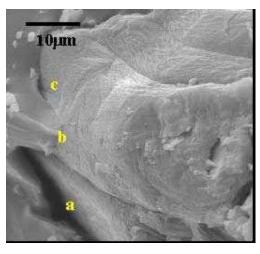
	por imersão	
Força de ruptura (kN)	Máxima	6,04
	Média (\bar{x})	5,22
	Mínimo	4,79
	Desvio padrão(s)	$\pm 0,43$
	$_{ m S}$ / \overline{x}	8,2%
Módulo de elasticidade (GPa)	Média (\bar{x})	3,491
	Desvio padrão(s)	$\pm 5,19$
	$_{\mathrm{S}}$ / \overline{x}	14,2%

O desempenho dos compósitos com matriz de poliuretana monocomponente (GQAMR), com aditivo, se apresentou superior aos compósitos moldados sem aditivos e as curvas de força versus deslocamento não apresentam dispersão significativamente diferente dos demais ensaios realizados.

4.2.6 Interfaces entre a poliuretana e o sisal

A figura 29 apresenta a microscopia eletrônica da interface entre a fibra de sisal e a poliuretana (AMU301). A seção exposta a partir da ruptura dúctil do compósito permite observar regiões na quais já ocorreu a separação

completa entre a fibra e o polímero (a), regiões nas quais o polímero se mantém aderido à fibra (b) e regiões onde a ligação polímero-fibra está sendo rompida (c).



- (a) Ruptura da ligação entre a poliuretana e a fibra de sisal.
- (b) Ligação da poliuretana com a fibra de sisal.
- (c) Início de ruptura da ligação entre a poliuretana e a fibra de sisal.

Figura 29. Interface entre o sisal e a resina PU comercial.

4.2.7 Avaliação geral dos compósitos de sisal e poliuretanas

As impregnações com a resina poliuretana bicomponente (GQATP) resultaram num material onde a formação de bolhas superficiais altera as características estéticas do tecido de sisal e compromete o desempenho mecânico do compósito. A estética é um valor a ser considerado em diversas aplicações em estruturas de madeira. O confinamento em moldes abertos não alterou estas observações, embora tenha reduzido os problemas descritos.

O resultado estético da impregnação por imersão do tecido com a poliuretana bicomponente comercial foi satisfatório, não sendo possível observar a formação ou o aprisionamento de bolhas, o que resultou em uma superfície regular, e plana. A forma de ruptura do compósito de tecido de

sisal e poliuretana bicomponente comercial foi bastante semelhante à ruptura em tecidos não impregnados, e os resultados são compatíveis com o aspecto e com a rigidez observados empiricamente nos compósitos, e com a propriedade elastomérica da poliuretana.

4.3 Compósitos sisal - epóxi (EP)

As resinas epóxi utilizadas para impregnação do tecido foram fornecidas pela Barracudatec Tecnologies & Products LTDA com denominação comercial de AR-300, com endurecedores AH30 e AH150. Os processos de impregnação utilizados foram o pincelamento, em imersão e a vácuo. Estas alternativas foram avaliadas para definir a resina e processo mais adequado aos reforços de elementos estruturais.

4.3.1 Tecido comercial de sisal (telinha) - EP/AR300, impregnados por pincelamento

Foram moldados exemplares de compósitos de epóxi reforçados com o tecido comercial de sisal identificado como telinha. A impregnação destes exemplares foi realizada por pincelamento. A figura 30 e a tabela 18 mostram os resultados obtidos.

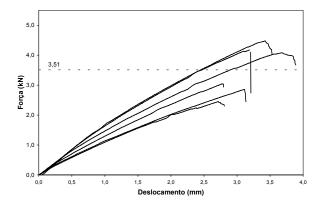


Figura 30. Resultado do ensaio de tração em compósito sisal(telinha) – EP impregnado por pincelamento.

Tabela 18. Resultado da força de ruptura em ensaio de tração em compósito sisal(telinha) – EP impregnado por pincelamento.

	1 8	
	Máxima	4,48
	Média (\bar{x})	3,51
Força de ruptura (kN)	Mínimo	2,45
-	Desvio padrão(s)	± 0.83
	s / \overline{x}	23,7%

4.3.2 Sisal – EP/AR300, impregnado por pincelamento

Foram moldados exemplares de compósitos de epóxi reforçados com o novo tecido de sisal desenvolvido para o presente trabalho. A impregnação destes exemplares foi realizada por pincelamento. A figura 31 mostra pequenas bolhas próximas à superfície dos fios aprisionadas em decorrência da impregnação por pincelamento.

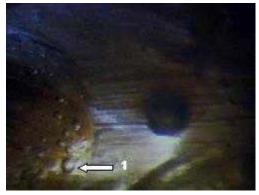


Figura 31. Imagem da microscopia por transmissão em compósito sisal – EP.

A figura 32 e a tabela 19 apresentam os resultados do ensaio de tração em dez exemplares de compósitos de sisal-epóxi AR300.

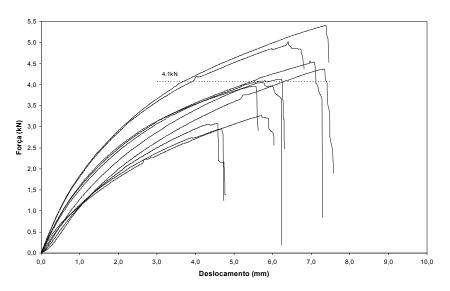


Figura 32. Resultados do ensaio de tração em compósito sisal – EP por pincelamento.

Tabela 19. Resultados do ensaio de tração em compósitos sisal-EP impregnados por pincelamento.

impregnados por pineeramento.		
	Máxima	5,40
Força de ruptura (kN)	Média (\bar{x})	4,08
	Mínimo	2,96
	Desvio padrão(s)	$\pm 0,809$
	s / \overline{x}	19,8%

Comparando-se os resultados obtidos nestes ensaios de tração em compósitos de sisal e epóxi com os compósitos de sisal e poliuretanas

podemos observar que a matriz de epóxi apresenta maior resistência à tração que a poliuretana monocomponente também impregnada por pincelamento. Entretanto, a poliuretana monocomponente impregnada por imersão e curada com aditivo apresentou força de ruptura maior. A dispersão dos resultados também apresenta-se elevada, assim como nos resultados obtidos com os compósitos obtidos com as poliuretanas.

Pode ser observado também que os compósitos reforçados do novo tecido desenvolvido para o presente trabalho apresentou forças de ruptura superior aos compósitos reforçados com o tecido comercial (telinha).

4.3.3 Sisal - EP/AR300, impregnado por imersão

Exemplares impregnados por imersão foram preparados e submetidos aos ensaios de tração com a finalidade de avaliar as diferenças entre os dois processos, considerando que a viscosidade das resinas epóxi é menor que as viscosidades das resinas poliuretanas avaliadas. Os ensaios foram conduzidos com a utilização de transdutor de deslocamento com garra para a determinação do módulo de elasticidade do compósito. A figura 33 e a tabela 20 apresentam os resultados dos 8 exemplares ensaiados.

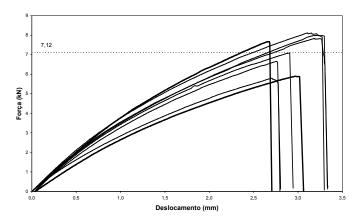


Figura 33. Resultados do ensaio de tração em compósito sisal – EP por imersão.

Tabela 20. Resultados do ensaio de tração Sisal – EP, por imersão.

Força de ruptura (kN)	Máxima	8,12
	Média (\bar{x})	7,12
	Mínimo	5,80
	Desvio padrão(s)	$\pm 0,947$
	$_{\mathrm{S}}$ / \overline{x}	13,3%
Módulo de elasticidade (M Pa)	Média (\bar{x})	5 175
	Desvio padrão(s)	$\pm 713,7$
	s / \overline{x}	13,8%

Comparando-se os resultados obtidos em exemplares impregnados por pincelamento e impregnados por imersão, de compósitos sisal-epóxi, pode-se observar que a impregnação por imersão apresenta maior resistência à tração, assim como observado nos ensaios realizados com matrizes poliuretanas. Nota-se também a redução da dispersão nos resultados de força máxima e módulo de elasticidade obtidos nestes ensaios em comparação com os demais compósitos ensaiados.

A comparação estatística entre as resistências obtidas em compósitos impregnados por pincelamento e por imersão foi realizada através de testes de hipótese. Como hipótese nula (H_0) admiti-se que as médias sejam iguais, contra a hipótese de que as médias sejam diferentes (H_1) . A partir dos dados

da tabela 19 e da tabela 20 calcula-se o parâmetro estatístico (t_{cal}), sendo o seu valor 7,215. O parâmetro estatístico verificado para a distribuição de probabilidades de Student com grau de liberdade igual a 15 (t_{15;0,5%}) é de 2,947. Como o parâmetro estatístico calculado é superior ao encontrado na distribuição de probabilidade, rejeita-se a hipótese de igualdade entre as médias de resistência, e conclui-se que as médias são diferentes, com o nível de confiança de 99%.

4.3.4 Tecido de sisal tratado - EP/AR300, impregnado por imersão

Exemplares utilizando tecidos de sisal tratados por mercerização e moldados por imersão foram preparados e submetidos aos ensaios de tração com a finalidade de avaliar as diferenças de comportamento no ensaio de tração entre compósitos reforçados com fibras tratadas e não tratadas. Os ensaios foram conduzidos com a utilização de transdutor de deslocamento com garra para a determinação do módulo de elasticidade do compósito. As figuras 34(a) e 34(b) obtidas por microscopia eletrônica de varredura apresentam superfícies de fibra não tratada, e tratadas.

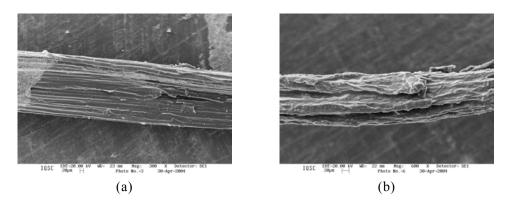


Figura 34. Comparação entre fibras não tratadas(a) e tratadas (b).

Podem ser observadas as alterações morfologias nas superfícies decorrentes do tratamento de mercerização. O ataque do hidróxido de sódio à superfície das fibras resultou na remoção parcial da hemicelulose e da lignina superfícial, expondo a estrutura interna das fibras vegetais. A avaliação das alterações físicas decorrentes do tratamento foi realizada em 3 amostras quadradas de tecido com 55mm de aresta submetidas ao tratamento. As variações de massa por superfície de tecido foram de 2%.

A figura 35 e a tabela 21 apresentam os resultados de ensaios de 8 exemplares moldados por imersão, reforçadas com tecidos tratados.

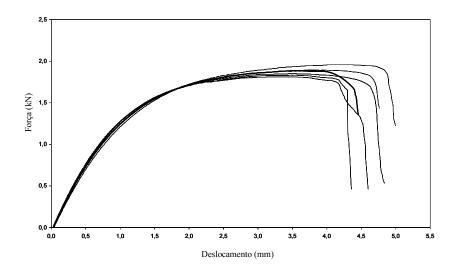


Figura 35. Curvas de força x deslocamento dos compósitos de sisal tratado – EP.

Tabela 21. Resultados obtidos nos ensaios de tração, sisal tratado
- EP

	Resistência	Módulo de Elasticidade MOE	
	MPa	GPa	
Média	35,7	2,63	
Desvio padrão	2,9	±0,12	
Coeficiente de variação s / \overline{x}	8,1%	4,6%	

O tratamento realizado no tecido de sisal modificou o comportamento do compósito com epóxi na resistência, no módulo de elasticidade, e na variabilidade dos resultados. A comparação entre os resultados mostra que o tratamento reduziu em cerca de 43% a resistência do compósito. O tratamento também alterou o módulo de elasticidade reduzindo o valor obtido sem o tratamento. A variabilidade dos resultados foram reduzidos com o tratamento, o que pode ser observado tanto nos valores da covariância quanto nos gráficos de força por deslocamento.

4.3.5 Sisal - EP/AR300, compactado à vácuo

Exemplares compactados à vácuo foram preparados e submetidos ao ensaios de tração com a finalidade de avaliar as diferenças entre este processo e a compactação por pressão. Oito corpos-de-porva amostras foram ensaiados e apresentaram pequena variabilidade. Três curvas foram selecionadas, sendo duas mais externas, para apresentar os limites entre os quais as demais curvas se apresentam, e a terceira, identificada na figura 36 pela letra A, destaca-se por apresentar resistência significativamente menor.

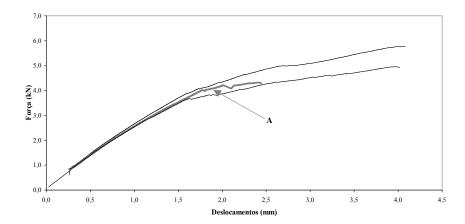


Figura 36. Curvas selecionadas de força versus deslocamento de compósitos sisal – EP moldados sob vácuo.

Após o ensaio de tração, o exemplar A foi analisado em lupa óptica. A figura 37 mostra o detalhe de falha na produção do tecido da amostra deste exemplar. A ruptura do corpo-de-prova com níveis de resistência inferior aos demais pode ser atribuída à heterogeneidade mostrada. Este resultado confirma a opção por processos industriais de produção dos tecidos que garantam maior homogeneidade.

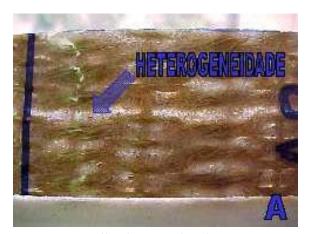


Figura 37. Detalhe do exemplar de menor resistência.

Na tabela 22 são apresentados os resultados médios bem como variações de resistência e módulo de elasticidade obtidos nestes ensaios.

Tabela 22. Resultados obtidos nos ensaios de tração, sisal – EP moldados sob vácuo

	Resistência	Módulo de Elasticidade		
	Resistencia	MOE		
	(MPa)	(GPa)		
Média	49,1	5,2		
Desvio padrão	$\pm 2,2$	$\pm 0,5$		
Coeficiente de variação	4,5%	10,6%		

Pode ser observado que o processo de compactação à vácuo reduz a variabilidade dos resultados de resistência e de módulo de elasticidade. Comparando-se os resultados com a imersão, os valores médios são menores.

Estes resultados podem ser explicados pelas bolhas de ar aprisionadas no tecido, que a compactação à vácuo não retirou. A figura 37 também apresenta o aspecto das bolhas aprisionadas.

4.3.6 Modos de ruptura

Os compósitos de fibras de sisal e matrizes em resinas epóxi apresentam modos de ruptura frágil. As superfícies formadas pela fratura dos exemplares ensaiados à tração passam nas proximidades dos fios transversais, sendo os fatores que contribuem para a redução da resistência:

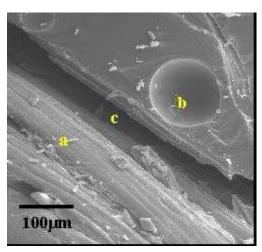
- A concentração de polímero com o afastamento necessário entre os fios para a passagem dos fios transversais, pois reduz a fração volumétrica de fibras localmente;
- A maior dificuldade nos processos de compactação em retirar o ar incorporado nestas regiões, em decorrência da maior complexidade no arranjo dos fios;
- A presença dos fios transversais, pois desalinham as fibras dos fios longitudinais reduzindo a eficiência de reforço.

A figura 38 apresenta uma ruptura típica dos compósitos de sisal-EP submetido à tração, onde pode ser observado que seções de ruptura foram formadas nas proximidades dos fios transversais consecutivos.



Figura 38. Aspecto típico da ruptura dos compósitos.

A figura 39 apresenta a microscopia eletrônica da interface fibra de sisal com o epóxi após a fratura no ensaio de tração. Podem ser observados uma fibra transversal (a), o aspecto de uma bolha aprisionada (b) e o afastamento entre a fibra e o polímero (c).



- (a) Fibra transversal de sisal.
- (b) Bolha de ar aprisionada durante processamento do compósito.
- (c) Espaço entre a fibra e a matriz.

Figura 39. Interface entre o sisal e a resina EP.

4.3.7 Micromecânica aplicada ao compósito sisal-EP

A fração volumétrica (ϕ_f) de fibras nos compósitos ensaiados pode ser determinada a partir da massa específica das fibras, massa de fibras no compósito, massa específica do compósito avaliada em balança hidroestática

e a massa do compósito. O módulo de elasticidade das fibras (E_f) foram determinadas experimentalmente e se adotou o módulo de elasticidade do epóxi (E_m) de 2,6GPa (tabela 10). A regra da mistura (Agarwal e Broutman, 1990), equação (10), permite estimar o módulo de elasticidade do compósito unidirecionais (E_c) para pequenas deformações.

$$E_c = E_f \phi_f + E_m (1 - \phi_f)$$
 (10)

Os compósitos de sisal - epóxi impregnados por imersão apresentaram fração volumétrica de 0,53, e, aplicando-se os valores na equação 10, obtémse como estimativa do módulo de elasticidade do compósito o valor 6,89GPa. Esse valor estimado é superior ao experimental (5,2GPa). A diferença entre os resultados pode ser explicada considerando a superfície de fratura e a regra da mistura. Pode-se relacionar os seguintes fatores:

- A concentração de polímero com o afastamento necessário entre os fios para a passagem dos fios transversais reduz a fração volumétrica de fibras localmente, enquanto a teoria pressupõe fração volumétrica homogênea;
- A maior dificuldade nos processos de compactação em retirar o ar incorporado nestas regiões em decorrência da maior complexidade no arranjo dos fios;
- A presença dos fios transversais desalinham as fibras dos fios longitudinais e, compondo os fios, as fibras são posicionadas em forma helicoidal, enquanto a teoria pressupõe fibras posicionadas no mesmo sentido das tensões principais.

4.4 Ligações por cisalhamento em madeira

Os ensaios de ligações em madeira submetidas ao cisalhamento foram realizados em corpos-de-prova com áreas de colagem de 10cm x10cm e 12cmx12cm. As figuras 40 e 41 apresentam as curvas de força versus deslocamento dos ensaios.

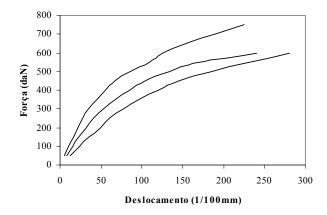


Figura 40. Ensaios de ligações de madeira em sisal-epóxi submetidas ao cisalhamento, área de colagem 12x12cm².

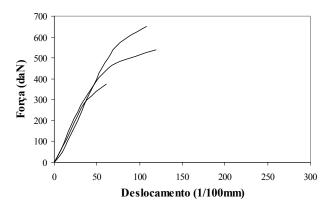


Figura 41. Ensaios de ligações de madeira em sisal-epóxi submetidas ao cisalhamento, área de colagem 10x10cm².

A rigidez média observada entre os deslocamentos de $6x10^{-4}$ m e $30x10^{-4}$ m nos ensaios de cisalhamento foram:

- Para a área de colagem $10x10cm^2$, obteve-se 817 daN/mm
- Para a área de colagem 12x12cm², obteve-se 292 daN/mm

Os ensaios realizados podem ser divididos em 3 fases: inicialmente as curvas força versus deslocamento apresentam aspecto linear crescente; em seguida, forma-se um patamar que corresponde a grandes deslocamentos e a distorção do tecido (como apresentado na figura 42); e na terceira fase, com os deslocamentos impedidos, o ensaio volta a apresentar aspecto crescente, até o descolamento entre o compósito e a madeira.



Figura 42. Modo de ruptura das emendas de madeiras com compósitos sisal-EP submetidas ao cisalhamento.

4.5 Reforço em madeiras submetidas à flexão

A avaliação de rigidez em ensaios de flexão foi realizada para verificar as alterações de desempenho de vigas de madeira sem reforço e com reforço dos compósitos de sisal-epóxi. Os corpos-de-prova submetidos à flexão foram ensaiados conforme a figura 17. A rigidez (k) no ensaio de flexão é a relação entre a força (F) e o deslocamento no centro da viga (δ), como apresentado na equação (11). Em pequenas deformações, a rigidez também está relacionada com o módulo de elasticidade (E), a inércia da seção (I), a

distância entre o apoio e o ponto de aplicação da força (a), e a distância entre os apoios (l), como mostrado na equação (12), conforme a mecânica dos sólidos (Timoshenko, Gere, 1983).

$$k = \frac{F}{\delta} \tag{11}$$

$$k = \frac{24 \cdot E \cdot I}{a(3l^2 - 4a^2)} \tag{12}$$

Os 6 exemplares ensaiados apresentaram aumento de rigidez; tendo variações entre 10,1% e 17,7% com média de 14,2%. A média das forças de rupturas obtidas nos ensaios com os corpos-de-prova reforçados foi de 943daN, enquanto para os módulos de ruptura (MOR) foi observada a média de 41MPa. Os resultados dos ensaios individuais estão apresentados na tabela 23.

Tabela 23. Comparação da rigidez (daN/mm) dos exemplares submetidos à flexão sem reforço e com reforço.

Exemplar	Força de ruptura	MOR (MPa)	Rigidez (daN/mm) Reforço		Variação
	(daN)		Sem	Com	(%)
1	515	42,92	16,1	18,0	11,8
2	505	42,08	17,9	21,1	17,7
3	495	41,25	29,9	34,5	15,2
4	500	41,67	23,5	26,9	14,3
5	520	43,33	33,1	36,5	10,1
6	425	35,42	29,0	33,6	15,9

A figura 43 apresenta o resultado típico do ensaio em um exemplar. enquanto a figura 44 apresenta o aspecto típico dos corpos-de-prova rompidos.

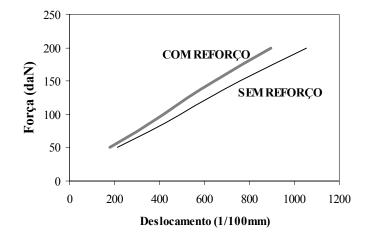


Figura 43. Efeito do reforço de vigas de madeira com compósitos de sisal-EP.



Figura 44. Ruptura típica dos exemplares de madeira reforçados com compósitos de sisal-EP submetidos à flexão.

4.6 Interfaces madeira-epóxi-sisal

As interfaces entre os materiais foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura. A figura 45 apresenta a imagem na qual podem ser identificados os materiais.

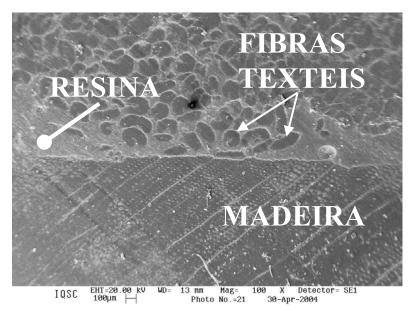


Figura 45. Aspecto da região de contato entre fibras-resinamadeira.

A figura 46 apresenta em detalhe a região de contato entre a resina e a madeira, podendo-se observar a resina ocupando as reentrâncias superficiais da madeira.

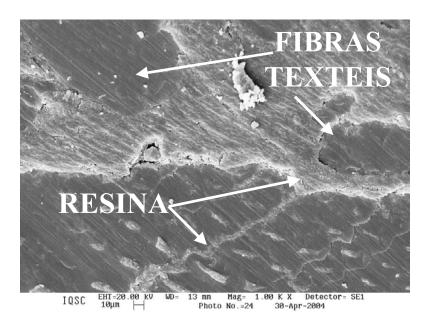


Figura 46. Detalhe da interface resina-madeira.

A figura 47 apresenta o contato entre as fibras e a resina. Pode ser observado que não há vazios entre estas regiões.

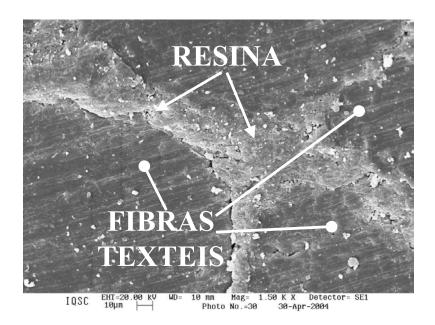


Figura 47. Região de contato entre a resina e a fibra.

As imagens de microscopia eletrônica indicam a eficiência da resina utilizada em garantir o envolvimento completo das fibras, e, também, a compatibilidade com a madeira.

5. CONCLUSÕES

Dos estudos teórico e experimental realizados conclui-se que os compósitos com tecidos de sisal e resinas poliuretanas e epóxi são viáveis tecnicamente.

Entre as resinas avaliadas, a resina epóxi é a mais adequada para aplicações estruturais. As resinas poliuretanas bicomponentes não apresentaram desempenho satisfatório seja mecânico ou estético, mas sim sensibilidade às variações ambientais o que impõe alterações nas condições de produção dos compósitos. A poliuretana monocomponente utilizada com o aditivo apresentou maior estabilidade às variações das condições ambientais e resultados mecânicos superiores às poliuretanas bicomponente. A resina epóxi apresentou os melhores resultados de desempenho mecânico, maior resistência e menor variabilidade. As resinas epóxi também apresentaram melhor solução estética acrescentando apenas brilho à superfície do tecido de sisal. Portanto, a resina epóxi mostrou ser a mais viável para os reforços de elementos estruturais de madeira com compósitos de sisal.

Os resultados apresentados demonstram que o novo tecido desenvolvido para o presente trabalho é mais adequado que os tecidos comerciais. O novo tecido apresenta maior facilidade de impregnação, maior relação entre fios

longitudinais e transversais: e a menor quantidade de fios transversais reduz a heterogeneidade dos compósitos. Estes resultados podem ser previstos pelos fundamentos apresentados na revisão bibliográfica.

A observação das impregnações por microscopia óptica demonstra que o pincelamento da resina no tecido de sisal é uma técnica que facilita o aprisionamento de gases no interior do compósito. Os gases são incorporados durante os processos de mistura e aplicação das resinas ou são provenientes das reações de polimerização. A espessura e a complexidade do arranjo do tecido também favorecem o aprisionamento de bolhas de ar ou outros gases. A impregnação por imersão apresenta resultados superiores às impregnações por pincelamento, tanto nos resultados mecânicos como na redução da variabilidade dos resultados.

A aplicação de pressão na compactação dos compósitos de sisal utilizados em reforço de estruturas melhora significativamente o comportamento do compósito. A alternativa de compactação com vácuo, embora reduza a variabilidade no comportamento dos compósitos, não se apresentou adequada para a redução de vazios, o que também pode ser constatado nos resultados dos ensaios de tração. As pressões de compactação utilizadas neste trabalho foram obtidas com dispositivos facilmente reprodutíveis em condições de reparo nas estruturas já existentes.

O tratamento de mercerização do tecido de sisal diminuiu significativamente a variabilidade no comportamento dos compósitos submetidos ao ensaio de tração; entretanto, reduziu a rigidez e a resistência

demonstrando que o tratamento, nas condições realizadas, não é adequado ao uso em compósito com função estrutural.

A variabilidade dos resultados de tração nos compósitos de sisal analisados são inferiores à variabilidade das madeiras, aspecto importante a ser considerado no uso deste material em funções estruturais.

As resinas epóxi e poliuretanas monocomponente apresentaram boa adesividade as fibras de sisal, demonstradas nas microscopias eletrônicas e nos ensaios de tração. A adesão entre a resina epóxi e a madeira também pode ser considerada adequada como demonstrado nas microscopias eletrônicas e nos ensaios mecânicos. Nos ensaios de flexão, não foram observados delaminações e, nos ensaios de cisalhamento, a separação entre o compósito e a madeira só ocorre após a ruptura do compósito.

A micromecânica dos compósitos unidirecionais pode ser aplicada com limitações aos resultados obtidos pois colabora na compreensão dos resultados obtidos mas não estima adequadamente os resultados obtidos. A heterogeneidade dos compósitos, o não alinhamento das fibras e o complexo estado de tensões internas do compósito tracionado podem ser listados como causas das diferenças observadas entre os resultados experimentais e as estimativas obtidas a partir da micromecânica dos compósitos unidirecionais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A variação de intensidade do tratamento de mercerização dos tecidos pode alterar o comportamento dos compósitos com tecidos tratados. A variação na intensidade do tratamento pode ser obtido tanto no tempo, na

temperatura quanto na concentração da solução utilizada no tratamento.

Pode-se investigar as relações entre a intensidade do tratamento e as mudanças de comportamento mecânico em compósitos estruturais.

O arranjo dos tecidos de sisal podem ser aprimorados reduzindo-se as deformações causadas pelos fios transversais. Como sugestão, pode-se estudar a substituição dos fios transversais por fibras têxteis de sisal para compor o arranjo do tecido. O processo de união entre as fibras transversais e os fios longitudinais pode ser mecânico ou com adesivos químicos. Entretanto, é necessário manter a opção por tecidos industrializados ou capazes de serem industrializados pois demonstra-se neste trabalho a necessidade de homogeneidade do tecido.

A diferença entre os valores teóricos do módulo de elasticidade dos compósitos de sisal e epóxi e os valores observados neste trabalho também são influenciado pela presença de vazios. Sugere-se a avaliação das frações volumétricas de vazios e a relação com o desempenho mecânico dos compósitos.

O presente trabalho está orientado para a obtenção de compósitos aplicados em reforço estrutural e, portanto, as alternativas analisadas em poliuretanas não foram consideradas adequadas. Mas, outras aplicações para os compósitos de sisal e poliuretanas podem ser desenvolvidas tais como para a indústria moveleira e em revestimentos para tratamento acústico de ambientes.

As características como: a densidade, a porosidade superficial e a presença de extrativos variam entre espécies e podem interferir na adesividade dos polímeros à superfície da madeira. Portanto, considera-se importante que sejam desenvolvidos estudos específicos para avaliar a adesividade em madeiras de diferentes espécies.

6. BIBLIOGRAFIA

6.1 Referência bibliográfica

- AGARWAL,B.D.;BROUTMAN; (1990). Analysis and performance of fiber composites. 2o. Edition. John Wiley & Sons, INC.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1994). ASTM D1763 Standard Specification for Epoxy Resins. CD-Rom. Philadelphia.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1997). ASTM D3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. (CD ROM). Philadelphia.
- AMICO, S. C.; MOCHNAZ, S.; COSTA, T. H. S. (2001). Tensile strenght of sisal fibres II: influence of chemical treatment from the point of view of a weibull distribution. In: 6° CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS / IX INTERNATIONAL MACROMOLECULAR COLLOQUIUM. *CD-Rom*.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1997). ABNT NBR 7190 Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro.
- APAEB Associação dos Pequenos Agricultores do Município de Valente, (2002). http://www.apaeb.org.br. Acessado em março de 2002. Valente, BA.
- BAINBRIDGE, R.J.; METTEM, C.J.; DRAKE, R.; ANSELL, M.P. (1998). Application for composites materials in timber structures. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, /5th WCTE/. Montreux, Switzerland. August, 1998. *Anais*, v.2, p.716-717.

- BARALDI, L.T. (1996). Método de ensaios de ligações de estruturas de madeira por chapas com dentes estampados. São Carlos, SP. Dissertação (mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos /EESC/, USP.
- BARRACUDATEC TECNOLOGIES (2003). Catálogo técnico de produto. http://www.barracudatec.com.br/ /acesso em dezembro de 2003/. Rio de Janeiro.
- BLASS, Arno (1985). Processamento de polímeros. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina.
- BLEDZKI, A.K.; GASSAN; J.; (1999). Composites reinforced with cellulose based fibres. *Progress in Polymer Science*, v.24, p.221–274.
- BURGER, L.M.; RICHTER, H.G.; (1991). Anatomia da madeira. São Paulo, SP. Nobel.
- CALISTER, W. D. (1985). Materials Science and Engineering, An Introduction. 3th edition, John Wiley and Sons, Inc..USA
- CARLO, E. de.; POLITO, W.L. (2001). Estudos de novos materiais poliméricos baseados em sistemas uretanos alternatinos síntese e caracterização de um sistema monocomponente com processo de estabilização (cura) pela água. In: IV SIMPÓSIO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS /SICEM/. São Carlos.
- CARLO, E. de.; POLITO, W.L.; (2002). Sobre o desenvolvimento, aplicação e caracterização de um novo material poliuretana monocomponente baseado em óleo vegetal com processo de cura pela umidade do ar. Apresentação em CD-Rom disponível na biblioteca do IBRAMEM.
- CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W. S; CAVALCANTE, J. M. F, (2000). Influência da arquitetura do tecido nas propriedades de compósitos poliéster/tecido de juta. In: 14o. Congresso de Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, CBECIMAT. São Pedro/SP, 2000.
- CARVALHO, R. F.; CALIL Jr, C.. (2002). Resistência à tração de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas. In: EBRAMEM. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2002, Uberlândia. VIII EBRAMEM. Universidade Federal de Uberlândia.
- CARVALHO, R. F.; CALIL Jr, C.. (2003) Comparação entre processo de conformação de polímeros reforçados com tecido de sisal. In: VI SICEM, 2003, São Carlos. Simpósio em Ciência e Engenharia de Materiais. São Carlos: Programa de Pós Graduação Interunidades em Ciência e Engenharia dos Materiais, 2003. v. Único, p. 71-72.

- CARVALHO, R. F.; CALIL Jr, C.. (2003). Compósitos de tecidos de sisal impregnados com poliuretanas derivadas do óleo de mamona submetidos à tração. Revista Baiana de Tecnologia, Camaçari, v. 18, n. 1, p. 119-130, 2003.
- CARVALHO, R. F.; CALIL Jr, C.; HERNANDES, A. C.(2003). Resistência à tração de compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de madeira. In: ABM ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS, 2003, Rio de Janeiro. 58º Congresso Anual ABM. São Paulo SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2003.
- CARVALHO, R. F.; CALIL Jr, C. (2004). Compositos de fibas de sisal para reforço de estruturas de madeiras In: EBRAMEM. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, Cuiabá. IX EBRAMEM. Universidade Federal de Goias, 2004.
- CARVALHO, R. F.; CALIL Jr, C. (2004). Compósitos de fibras de sisal para reforço de estruturas de madeira. In: 1º CONGRESSO IBÉRICO DE MADEIRA NA CONSTRUÇÃO, 2004, Guimarães. A madeira na Construção. 2004. v. Único, p. 459-468.
- CCDM Centro de Caracterização e Desenvolvimento de Materiais, Universidade Federal de São Carlos (2003). www.ccdm.ufscar.br/servicos/tecnicas/ceramicas/densi.php, acesso em dezembro de 2003.
- COSTA, M.L.; REZENDE, M.C.; ALMEIDA, S.F.M..(2000). Efeito do arranjo das fibras na resistência de compósitos com resina epóxi na presença de vazios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. São Pedro SP.
- CRUZ, I.P.; SOARES, N. (2002). Estudo do comportamento das ligações madeira-resinafibra de vidro. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA.. Uberlândia. Julho de 2002. *CD-Rom*.
- DAGHER, H. J.; (2000). High-Performance Wood Composites for Construction. In:VII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, São Carlos. Julho de 2000. *Anais*.
- ERHARDT, T., et al (1976). Curso técnico textil, volumes 2 e 3. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.

- FIORELLI, Juliano (2002). Utilização de fibras de carbono e fibras de vidro para reforço de vigas de madeira. São Carlos, SP. Dissertação (mestrado). Interunidades em Ciência e Engenharia dos materiais /EESC/IFSC/IQSC, USP.
- FLOWER, H.M.; (1995). High performance materials in aerospace. 1.ed. Chapman & Hall.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY, (1999). Wood Handbook Wood as engineering material. Madison, Wisconsin. http://www.fpl.fs.fed.us/, em 07/11/2002.
- GOMMERS, B.; VERPOEST, I.; HOUTTE, P.; (1998). The Mori-Tanaka method applied do textile composite. *Materials Acta Metallurgica*, vol.46, no.6, pg.2223-2235.
- HERNANDEZ, R.; DAVALOS, J.F.; SONTI, S.S.; KIM, Y.; MOODY, R.C. (1997). Strength and Stiffness of Reinforced Yellow-Poplar Glued-Laminated Beams. Forest Products Laboratory, /FPL/RP/554. Madison, WI, U.S..
- HIORISCH, M. (1997). Recuperação de piso de madeira no palácio universitário da Universidade Federal do Rio de Janeiro. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES. Porto Alegre/RS. *Anais*, v.2. p.663-670.
- HULL, D.; (1995). An introduction to composites materials. Cambridge University Press. (Cambridge Solid State Science Series).
- JANG, B.Z.; (1994). Advanced polymer composites. ASM International.
- JESUS, M.H. (2000). Estudo do adesivo de poliuretana à base de mamona em madeira laminada colada (MLC). Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos /EESC/, USP.
- JOSEPH P.V. MATTOSO L.H.C.; TOLEDO, R.D.; (2000). Natural fiber reinforced thermoplastic composites. In: *Natural polymer and agrofibers based composites*. São Carlos: USP/Unesp/Embrapa.
- JOSEPH, K.; THOMAS, S.; PAVITHRAN, C.; (1996). Effect of chemical treatment on the tensile properties of short sisal fibre-reinforced polyethylene composites. *Polymer*, v.37, n.23, p.5139-5149.
- LI,Y.; MAI, Y.; YE, L. (2000). Sisal fibre and its composites: a review of recent developments. Composites Science and Technology, v.60, p.2037-2055.
- MOCHNACZ, S., AMICO, S. C., SYDENSTRICKER, T.H.D. (2002). Caracterização e modificação superficial de fibras de sisal para utilização em compósitos poliméricos. In:

- CONGRESSO EN CIENCIA DE MATERIALES DEL MERCOSUR SULMAT'2002. 10 a 14 de Setembro de 2002, Joinville, SC.
- NASSEH, J.; (2000). Manual de construção de barcos. Ed. Booklook. Rio de Janeiro, RJ.
- OKIMOTO, F.S., (2001). Análise da perda de protensão em pontes protendidas de madeira. Tese (doutorado). São Carlos, SP. Escola de Engenharia de São Carlos /EESC/, USP.
- PARTEL, P. M. P.; CALIL JR., C; INO, A.; CARVALHO; R.F., et al.. Análise da cadeia produtiva para execução de painéis estruturais de madeira roliça de pequeno diâmetro In: EBRAMEM. ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRA E ESTRUTURAS DE MADEIRA, 2004, Cuiabá. IX EBRAMEM. Universidade Federal de Goiás, 2004.
- PINHERO R.V.; ROCCO LAHR F. A. (1997). Patologias das estruturas de madeiras. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, Porto Alegre-RS. *Anais*, v.1. p.481-488.
- RIBEIRO, R.T.M. (1997). Recuperação de obras históricas restauração da casa França-Brasil. In: IV CONGRESSO IBEROAMERICANO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, Porto Alegre-RS. *Anais*, v.2. p.679-685
- RODRIGUES, W.; ALTAFIM R.A.C. (2002). Estudo das propriedades elétricas e mecânicas da madeira impregnada com resina poliuretana derivada de óleo de mamona. In: V Simpósio em Ciência e Engenharia de Materiais /SICEM/. São Carlos. *Resumos*.
- RONG, M.Z.; ZHANG, M.Q.; LIU,Y.; YANG, G.C.; ZENG, H.M.; (2001). The effect of fiber treatment on the mechanical properties of unidirectional sisal-reinforced epoxy composites. *Composites Science and Technology*, v.61,p.1437–1447.
- ROWELL, Roger M.; HAN, James S.; ROWELL, Jeffrey S. (2000). Characterization and Factors Effecting Fiber Properties. in: *Natural Polymers and Agrofibers Composites*. E. Frollini, A.L. Leão and L.H.C. Mattoso. São Carlos Brazil 2000.
- SEAGRI Secretaria da Agricultura, Irrigação e Reforma Agraria Governo do Estado da Bahia (2002). http://www.seagri.ba.gov.br, acessado em março de 2002.
- SILVA, R. V. (2003). Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. Tese Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- SILVA, R. V.; SILVESTRE FILHO, G. D.; SANTOS, N. C.; BOSE FILHO, W. W.; CARVALHO, J.; SPINELLI, D. (2000). Comportamento mecânico do compósito

- sisal/poliuretana derivado do óleo de mamona. In: 14o. Congresso de Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, CBECIMAT. São Pedro/SP, 2000.
- SILVA, S. A. M.; GONÇALVES, R. (2002). Chapas produzidas com fibras de madeira e adesivo poliuretana à base de óleo de mamona. In:VIII Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Uberlândia. Julho de 2002.
- SILVA, S.P.L.; CACHIM, P.B.; JUVANDES, L.F.P. (2004). Técnicas avançadas de reforço de estruturas de madeira com compósitos reforçados com fibras (FRP). IN: A madeira na construção, 1o. Congresso Ibero, Guimarães, v.1, p. 613-621.
- STEVENS, P. Malcolm (1999). Polymer chemistry: an introduction. 3rd edition. Oxford University. New York. TABIEI, A; YI, W.T. (2002). Comparative study of predictive methods for woven fabric composite elastic properties. Composite Structures, v.58, n.1, p.149-164.
- TIMOSHENKO, S.P.; GERE, J.E. (1983). Mecânica dos sólidos. Editora LTC Livros Técnicos e Científicos. Rio de Janeiro.
- TITA, S. P. S (2002). Efeito dos tratamentos de superfície das fibras de bagaço de cana-deaçucar e sisal nas propriedades de compósitos de matriz fenólica e lignofenólicas. Dissertação (mestrado). São Carlos, SP, Instituto de Química de São Carlos /IQSC/, USP.
- VILAR, W. D. (2002). Química e tecnologia das poliuretanas 3.ed, http://www.poliuretanas.com.br/, acessado em 13/04/2003.
- WHEELER, A.S.; HUTCHINSON, A.R. (1998). Resin repairs to timber structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v.18, p.1-13.
- YOSOMIYA, R.; et al. (1989). Adhesion and bonding in composites. New York, Marcel Dekker, Inc., 1989.RIBEIRO, Luiz G. (1984). Introdução à tecnologia têxtil. Cetiqt/SENAI. Rio de Janeiro.

6.2 Bibliografia consultada

- ADMS; R.D.; COMYN, J.; WAKE, W.C.; (1997). Structural adhesives joints in engineering, 2.ed. Chapman & Hall.
- ALAWADY, M; (1998). Repair of timber poles by injection grouting. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, /5th WCTE/. Montreux, Switzerland. August, 1998. *Anais*, v.2, p.611-617
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1990). ASTM D1652-Standard Test Method for Content of Resin-Matrix Composites by Matrix Digestion. CD-Rom. Philadelphia.
- ARAÚJO, L.C.R. (1992). Caracterização química, térmica e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais óloequímicos. São Carlos SP. Dissertação (mestrado). Instituto de Física e Química de São Carlos USP.
- AZAMBUJA, M. A.; DIAS, A. A.. (2002). Avaliação da compatibilidade entre o adesivo à base de mamona utilizado na fabricação de MLC e o tratamento preservativo com CCA. In: VIII ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA /EBRAMEM/. Uberlândia. Julho de 2002. *CD-Rom*.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E (2003). Como Fazer experimentos. Editora Unicamp. Campinas, SP.
- CHEN, C. (1998). Mechanical performance of fiberglass reinforced timber joints. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING /5th WCTE/. Montreux, Switzerland. August, 1998. *Anais*, v.2, p.500-507.
- CONAB Companhia Nacional de Abastecimento, Governo Federal. (2002). http://www.conab.gov.br, acessado em março de 2002.
- CREW, K.; GREENLAND A; BAKOSS, S. (1998). Application of Advanced Fibre Reinforced Plastic Composites To Structural Timber. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING /5th WCTE/. Montreux, Switzerland. August, 1998. *Anais*, v.2, p.716-717.

- CRUZ, I.P.; MENDONÇA, M. (2000). Comportamento de ligações madeira-resinas sintéticas e fibra de vidro na restauração de peças estruturais. In: XXIX JORNADAS SULAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL. Punta del Leste, Uruguay. CD-Rom.
- DAGHER, H.J.; BRENTON, J.; (1998). Creep Behavior of FRP-reinforced glulam beams. WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING /5th WCTE/. Montreux, Switzerland. August, 1998. *Anais*, v.2, p.161-168.
- DAI, J.; HAHN, H.T.; (2003). Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding. *Composite Structures*, v.61, p.247-253.
- DAVIS, G. (1997). The performance of adhesive systems for structural timbers. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, v.17, n.3, p.247-255, august, 1997.
- DIAS, C.G.B.T. (2003). Tenacificação de sistemas epóxi com modificadores de impácto alastomérico (CTBN) e termoplástico (PEI). Tese (Doutorado), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP.
- ESAU, K.; (1974). Anatomia das plantas com sementes. Trad. Morretes, B.L.de. São Paulo, SP. Edgard Blücher/Editora da Universidade de São Paulo.
- LOPES, E.L. (2003). Influência das características do compatibilizante de polipropileno maleificado nas propriedades mecânicas de polipropileno reforçados com fibras de vidro curtas. Tese (Doutorado), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP.
- MEDEIROS, E.S. de (2002). Desenvolvimento de compósitos de resina fenólica reforçados por tecido híbridos juta/algodão. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- NIU, M.C.H.; (1993). Composite: Airframe structures. 2.ed. Hong Kong. Conmilit Press LTD.
- NUNES, R.C.R.; VISCONTE, L.L.Y.; (2000). Natural fiber / elastomeric Composities. In: Natural Polymers and Agrofibers Composites. E. Frollini, A.L. Leão and L.H.C. Mattoso. São Carlos Brasil.
- PEREIRA; C.N.(1999). Compósitos polipropleno-fibras de sisal: Preparação, desempenho mecânico e caracterização estrutural. Tese (Doutorado), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP.
- SILVA, J.L.G.; AL-QURESHI, H.A.; (1999). Mechanics of wetting systems of natural fibres with polymeric resin. *Journal of Materials Processing Technology*, v.92, n.93, p.124-128.