

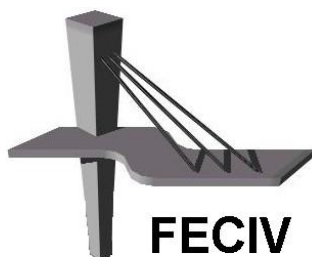


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE
COMPÓSITOS DE MATRIZ EPÓXI REFORÇADA
COM FIBRA DE RAMI PARA FINS DE REFORÇO
ESTRUTURAL**

ISABEL MARIA SOARES

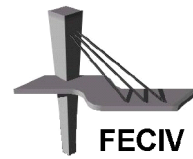
UBERLÂNDIA, JANEIRO DE 2012



FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Isabel Maria Soares

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS DE
MATRIZ EPÓXI REFORÇADA COM FIBRA DE RAMI PARA FINS
DE REFORÇO ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

Área de Concentração: Estruturas e Construção Civil

Orientadora: Profa. Dra. Leila Aparecida de Castro Motta

UBERLÂNDIA, JANEIRO DE 2012



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ATA Nº: 089/2011

CANDIDATA: Isabel Maria Soares

ORIENTADORA: Prof.^a Dr.^a Leila Aparecida de Castro Motta

TÍTULO: "Estudo de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de rami para fins de recuperação e reforço estrutural"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

DATA DA DEFESA: 10 de janeiro de 2012

LOCAL: Sala de Projeção Prof. Celso Franco de Gouvea

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 9h - 11h 45 min

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

☒ APROVADA

☐ REPROVADA

OBS: Alteração do título da dissertação para: "Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural." Correções sugeridas pelos membros da banca no texto da Dissertação.

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:


Professora Orientadora: **Prof.^a Dr.^a Leila Aparecida de Castro Motta – FECIV/UFU**


Membro externo: **Prof.^a Dr.^a Lia Lorena Pimentel – PUC-Campinas/SP**


Membro: **Prof. Dr. Jesiel Cunha – FECIV/UFU**

Uberlândia, 10 de janeiro de 2012.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu esposo Darlan, aos meus filhos, Brenior e Pedro Augusto e à toda minha família, em especial ao meu pai João Soares dos Santos (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

À DEUS pela proteção espiritual e bênçãos recebidas na realização deste estudo.

Aos meus pais João Soares e Maria da Conceição, que sempre me apoiaram.

Ao meu esposo Darlan e aos meus filhos Brenior e Pedro Augusto pelo amor e compreensão dedicados a mim.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação, em especial a orientadora Dra. Leila A. de Castro Motta, que não mediram esforços para a realização desta pesquisa.

As alunas de iniciação científica, Karyne Santos pela realização dos ensaios de tração da fibra e ajuda na preparação dos compósitos, e Lorena Campos pelo apoio na preparação inicial do material.

Ao Centro de Fiação e Tecelagem de Uberlândia, pela preparação dos tecidos com os fios de rami.

Ao Laboratório de Construções Rurais e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, pela caracterização das fibras de rami utilizadas neste trabalho.

RESUMO

O advento da tecnologia moderna trouxe consigo um aumento descontrolado nas demandas e no uso das reservas naturais, tornando cada vez mais necessário o desenvolvimento de “tecnologias ecológicas”, onde se buscam novos materiais, ecologicamente mais corretos. Assim, várias pesquisas e trabalhos estão sendo realizados para garantir a preservação ambiental e melhor padrão de vida à sociedade como um todo. Dentre esses estão os que pesquisam o uso de fibras vegetais como reforço de compósitos, tanto no Brasil como em diversas partes do mundo, devido suas inúmeras vantagens sócio-econômicas. Este estudo teve como objetivo principal analisar a viabilidade técnica da produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de rami para aplicação como material de reforço estrutural. As fibras de rami e os compósitos produzidos com diferentes frações de fibras (0%, 30%, 40%, 50% e 60%) e com tecido fio de rami (50%) foram caracterizados quanto às suas propriedades mecânicas, onde foram determinados, módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação máxima de ruptura. Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas das fibras de rami estão abaixo dos encontrados na literatura. Para os compósitos os resultados revelaram que com o aumento do teor de fibras as propriedades mecânicas dos compósitos melhoraram significativamente e que compósitos com tecido fio de rami (50%) apresentaram melhores propriedades mecânicas. Estas propriedades foram de ordem de grandeza próxima a compósitos de matriz epóxi com fibras de carbono, com características geométricas distintas. Pode-se então, concluir que é possível obter um compósito de matriz epóxi reforçada com fibras de rami, com propriedades adequadas para uso como reforço estrutural.

Palavras-chaves: compósitos, fibras vegetais, fibra de rami, resina epóxi, reforço estrutural.

ABSTRACT

The advent of modern technology has caused an increase in the use of natural resources, making it necessary the development of "green technologies", which materials and technologies more environmentally friendly. Thus, various research are being conducted to ensure environmental preservation combined with the comfort and safety for the society. Among these is the use of natural fibers as reinforcement in composites, both in Brazil and in several parts of the world, because of its many social and economic advantages. This research analyze the production of epoxy matrix reinforced with ramie fibers for application as structural reinforcement material. The ramie fibers and composites with different contents (0%, 30%, 40%, 50% and 60%) and with cloth ramie (50%) was characterized for their mechanical properties, which was determined modulus of elasticity, tensile strength and maximum strain rupture. The results obtained for ramie fibers were lower than in the literature. To composites the results showed that with the increase content fibers, the mechanical properties are significant improvement, and that the composites with cloth ramie thread in the same fibers content showed improve mechanical properties. These properties were of magnitude the epoxy matrix composite with carbon fibers, with different geometric characteristics. So than, is possible to obtain a composite of epoxy matrix reinforced with ramie fibers with good performance for use as structural reinforcement.

Key-words: composite, vegetable fibers, ramie fiber, epoxy resin, structural reinforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Proposta de classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais.....	13
Figura 2 – Estrutura celular da fibra vegetal.....	17
Figura 3 – Corte transversal do caule do rami	22
Figura 4 – Fibra de rami.....	27
Figura 5 – Corpos-de-prova para determinação da massa específica da resina.....	28
Figura 6 – a) Corpo-de-prova usado para o ensaio de tração direta das fibras; b) Ensaio de tração em andamento.....	31
Figura 7 – Seção transversal das fibras de rami.....	32
Figura 8 – Micrografia para determinação da dimensão transversal do corpo-de-prova (fibra).....	33
Figura 9 – Tecido com fio de rami.....	33
Figura 10 – Fibras preparadas para produção do compósito: a) antes da prensagem; b) após a prensagem.....	34
Figura 11 – Fôrma metálica utilizada para a preparação dos compósitos.....	34
Figura 12 - Produção dos compósitos: a) aplicação da resina; b) adensamento.....	36
Figura 13 – Prensagem do compósito.....	36
Figura 14 – Fluxograma de produção dos compósitos.....	38
Figura 15 – a) Placa moldada; b) Corpos-de-prova recortados.....	38
Figura 16 – Ensaio de tração dos compósitos.....	39
Figura 17 – Dimensões dos corpos-de-prova dos compósitos (mm).....	39
Figura 18 – Diagrama TensãoxDeformação típico obtido no ensaio de tração das fibras de rami.....	41
Figura 19 – Seção rompida das fibras de rami: a) Seção com desfibrilamento na ruptura; b) Seção sem desfibrilamento na ruptura.....	43
Figura 20 – a) Ensaio dos corpos-de-prova; b) Corpos-de-prova rompidos.....	43
Figura 21 – Propriedades mecânicas dos compósitos com 0%, 30%, 40%, 50% e 60% em volume de fibras de rami: a) módulo de elasticidade; b) deformação máxima; c) resistência à tração.....	45
Figura 22 – Propriedades mecânicas dos compósitos com 50% em volume de fibras de rami e 50% em volume de tecido com o fio de rami: a) módulo de elasticidade; b) deformação máxima; c) resistência à tração.....	48

Figura 23 – Diagramas TensãoxDeformação típicos obtidos para a matriz e diferentes compósitos.....50

Figura 24 – Diagramas TensãoxDeformação típicos obtidos para a matriz e os compósitos com 50% tecido fio de rami e 50% de fibras.....50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades mecânicas de fibras vegetais e de fibras convencionais usadas como reforço.....	16
Tabela 2 – Composição de fibras vegetais.....	19
Tabela 3 – Composição de fibras de vidro utilizadas na manufatura de compósitos.....	23
Tabela 4 – Características dos componentes resina epóxi e endurecedor.....	28
Tabela 5 – Propriedades do sistema não curado.....	28
Tabela 6 – Valores para cálculo da massa específica da resina.....	29
Tabela 7 – Massa da fibra e resina para cada compósito.....	35
Tabela 8 – Carga aplicada na preparação dos compósitos conforme teor de fibras.....	36
Tabela 9 – Propriedades dos compósitos de fibras de rami.....	37
Tabela 10 – Propriedades do compósito de tecido fio de rami.....	37
Tabela 11 – Resultados obtidos para as propriedades mecânicas à tração das fibras de rami.....	42
Tabela 12 – Resultados nos compósitos com fibra de rami em diferentes teores.....	44
Tabela 13 – Resultados nos compósitos com fibras de rami 50% e 50% tecido fio de rami.....	47

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Fibras Vegetais como Reforço Estrutural.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo Principal.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4
1.3 Estrutura do Trabalho.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 Materiais Compósitos na Construção Civil.....	6
2.2 Matrizes.....	10
2.3 Fibras de Reforço.....	13
2.3.1 Fibras Vegetais.....	16
2.3.1.1 Fibra do Rami.....	20
2.3.2 Fibras de Vidro.....	23
2.3.3 Fibras de Carbono.....	24
2.4 Desempenho dos Compósitos.....	24
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1 Materiais.....	27
3.1.1 Fibras.....	27
3.1.2 Resina.....	27
3.2 Caracterização das Fibras de rami.....	29
3.2.1 Massa específica das fibras de rami.....	29
3.2.2 Tração direta das fibras de rami.....	30
3.3 Produção e Caracterização dos Compósitos.....	33
3.3.1 Preparação do tecido com os fios de rami.....	33
3.3.2 Preparação das fibras de rami.....	34
3.3.3 Preparação e produção dos compósitos.....	34
3.3.4 Preparação dos corpos-de-prova e ensaio de tração.....	38
4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO.....	41
4.1 Caracterização das Fibras de rami.....	41
4.2 Caracterização Mecânica dos Compósitos.....	43
5 CONCLUSÕES.....	53
5.1 Conclusões.....	53

5.2 Propostas para trabalhos futuros.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 Fibras Vegetais como Reforço Estrutural

Atualmente na construção civil a utilização de polímeros reforçados com fibras (PRF) destaca-se como uma das técnicas mais comumente utilizada para a recuperação e reforço estrutural. Com a adição das fibras nas matrizes é possível melhorar as propriedades mecânicas do PRF, como a resistência à tração, à flexão e ao impacto. Em alguns casos, o maior benefício obtido por reforçar uma matriz frágil com fibras é alterar-se o seu comportamento após a fissuração. Nesse caso, o compósito, ao invés de romper-se subitamente após o início da fissuração da matriz, pode apresentar uma deformação plástica considerável que pode torná-lo um material adequado para a construção. Em outros casos, ressalta-se a importância no ganho de rigidez e resistência.

Entretanto, os reforços com matriz polimérica geralmente empregados como as fibras de vidro e carbono são de elevado custo: U\$1,40 a U\$17,50 (preço/kg) e U\$20,00 a U\$154,00 (preço/kg), respectivamente, segundo Levy Neto e Pardini (2006), o que tem incentivado pesquisas e estudos para viabilizar o uso de fibras vegetais, que além de apresentarem baixo custo em relação aos então utilizados, são recursos renováveis, biodegradáveis, abundantes, com boas propriedades de resistência mecânica e baixo peso.

O aumento descontrolado nas demandas e no uso das reservas naturais traz consequências deletérias ao planeta. De acordo com estudos realizados por Mattoso e Fragalle (1996), o desenvolvimento de uma “tecnologia ecológica” tem sido uma necessidade para a proteção ambiental em todo o mundo, onde se buscam novos materiais que sejam ecologicamente mais corretos. Nesse sentido, por possuir a maior biomassa e extensão territorial cultivável do mundo e ser um dos maiores produtores mundiais de várias fibras vegetais, o Brasil destaca-se como país com grande potencial à liderança da tecnologia de fabricação de compósitos poliméricos reforçados com fibras vegetais para aplicação em variadas áreas, como por exemplo, a automobilística, agrícola, química, de transformação de plásticos ou construção.

Outro fator que valida o emprego das fibras vegetais em compósitos são as vantagens sócio–econômicas advindas do seu uso, como: 1) geração de empregos rurais, evitando o fluxo populacional do campo para a cidade, verificado principalmente nas regiões norte e nordeste do país; 2) desenvolvimento de áreas do país economicamente deprimidas; 3) novos mercados tanto em nível nacional quanto para exportação; 4) alternativas rentáveis para a fixação de carbono na natureza, reduzindo a emissão de CO₂ na atmosfera durante seu ciclo de produção, processamento e utilização. Estima-se que compósitos de polipropileno contendo 65% de fibras de cânhamo, por exemplo, podem armazenar em média 325 kg de carbono/tonelada durante sua vida útil (MARINELLI *et al.*, 2008).

Dentre as várias fibras vegetais que têm sido estudadas com vistas à aplicação na construção civil, especialmente como reforço de polímeros, a fibra de rami apresenta as melhores propriedades mecânicas, com módulo de elasticidade se aproximando daquele das fibras de vidro.

Nas últimas décadas cresceu também, consideravelmente, o uso de compósitos de matriz polimérica na Engenharia Civil. Alguns deles, com matriz epóxi e reforçados por fibras de grande capacidade de resistência à tração, já estão sendo bastante usados como reforços estruturais.

Polímeros termoplásticos (PVC, polietileno, polipropileno etc.) desenvolvem, durante o endurecimento, ligações secundárias entre cadeias que resultam um material muito flexível. Ultrapassando a temperatura de transição vítrea este material amolece e retorna às suas características originais após a diminuição da temperatura (TITO, 1999).

Por sua vez, os polímeros termorígidos (resinas epóxicas, fenólicas, furânicas), durante a cura, produzem ligações primárias entre cadeias dando lugar a um produto de resistência elevada. As resinas termorígidas são as mais comuns para uso estrutural, sendo a resina epóxi a de maior aplicação como matriz, por ter uma excelente aderência junto à fibra e pequena contração durante o processo de cura (LUCATO, 1991).

Atualmente polímeros reforçados com fibras são usados na construção civil sob diversas formas, como por exemplo: barras redondas para substituir armaduras de

aço; painéis para fachadas; elementos moldados utilizados para coberturas, domos e adornos; laminados pré-fabricados ou preparados *in situ* com mantas ou tecidos para reforço de elementos estruturais; cabos de protensão (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

A aplicação destes polímeros é feita para obtenção de aumento da resistência à flexão de vigas, lajes e colunas, bem como para aumento da resistência à força cortante de vigas, colunas e muros, e da ductilidade de colunas. Entretanto, para que os polímeros reforçados com fibras sejam eficientes é necessária uma escolha apropriada dos seus constituintes, das propriedades, comprimento, orientação, forma e composição das fibras, das propriedades mecânicas da matriz, propriedades mecânicas do adesivo, da adesão entre fibras e matriz, da proporção da mistura e do método de aplicação (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007).

Este trabalho visa trazer contribuição às pesquisas que investigam a viabilização do uso de fibras vegetais como reforço para a produção de componentes para a construção civil, tendo sido selecionada a fibra de rami devido suas melhores propriedades mecânicas, comprimentos adequados (longas) e disponibilidade, e para uso como matriz, a resina epóxi devido ao fato de que além de propiciar a proteção necessária para as fibras vegetais também estabelece base comparativa com as fibras de carbono, que atualmente utilizadas como PRFC (Polímeros reforçados com fibras de carbono) são aplicadas como reforço de estruturas de concreto armado, como lajes, pilares, paredes e outros elementos estruturais. Devido ao elevado custo da fibra de carbono o uso da fibra vegetal como elemento de reforço seria uma opção promissora (SOUZA; CUNHA, 2011).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

Analisar a viabilidade técnica da produção de compósitos de matriz epóxi com fibras/fios de rami para aplicação como material de reforço estrutural. Não serão feitas análises de estruturas reforçadas, ou seja, o objetivo é fabricar e caracterizar o

material e verificar se os resultados são compatíveis com os materiais tradicionalmente usados para reforço de estruturas de concreto.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Caracterizar as fibras de rami quanto às suas propriedades físicas e mecânicas;
2. Definir a urdidura e composição dos tecidos com os fios de rami para uso como reforço dos compósitos;
3. Desenvolver procedimentos de preparação dos compósitos de matriz epóxi reforçada com os tecidos de fios de rami adquiridos e compósitos com fibras finas e alinhadas de rami em uma única direção;
4. Caracterizar os compósitos produzidos quanto às suas propriedades mecânicas à tração;
5. Avaliar a influência do teor de fibras/fios nas propriedades mecânicas dos compósitos produzidos;

1.3 Estrutura do Trabalho

O conteúdo do trabalho inclui no capítulo 1º, uma introdução em relação ao assunto abordado, compósitos reforçados com fibras vegetais e seu uso na construção civil, além dos objetivos, principal e específicos do estudo, e a forma como se estrutura tal conteúdo.

No capítulo 2º é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito do tema, utilizando-se de diversos autores sobre o assunto e seus principais pontos e de diferentes pesquisas realizadas até o momento atual.

Os materiais a serem utilizados e a metodologia aplicada, além de todas as etapas experimentais desta pesquisa, são descritos no capítulo 3º.

Em seguida, no capítulo 4º, são relatados os resultados obtidos com os experimentos, análises e a discussão em consequência dos mesmos.

Finalmente no capítulo 5º, seguem os comentários finais, conclusões do estudo e, algumas propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais Compósitos na Construção Civil

O termo material compósito tem como significado um material formado de uma fase dispersante e uma fase dispersa. A fase dispersante é chamada de matriz e a fase dispersa de reforço, ambas podem ser compostas de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos, podendo o reforço ser de formato particulado ou fibroso. Os componentes da fase dispersa podem ser aleatoriamente arranjados, ou organizados em algum tipo de padrão. As fibras podem ser contínuas, longas ou curtas. As propriedades do compósito levam consigo uma relação com seus componentes, ainda que os mesmos mantenham sua integridade no interior do compósito (VIEIRA, 2008).

Os materiais compósitos são definidos como uma classe de materiais heterogêneos, tanto na escala microscópica quanto na macroscópica, multifásicos, resultantes de uma combinação racional em que um dos componentes, descontínuo, dá a principal resistência ao esforço, o componente estrutural ou reforço, e o outro, contínuo, dá o meio de transferência desse esforço, o componente matricial ou matriz (FREIRE *et al.*, 1994).

De acordo com Agopyan e Savastano Jr. (2007), o comportamento dos materiais fibrosos distingue-se em duas fases básicas, as fibras e a matriz em que as fibras estão embebidas. A função principal das fibras é a de ser reforço mecânico da própria matriz. No caso da construção civil, as matrizes mais empregadas são as mais frágeis, notadamente pastas, argamassas e concretos de aglomerantes minerais, que com as fibras adquirem melhores propriedades e se tornam mais adequadas ao uso.

Nota-se que o uso de materiais de construção civil reforçados com fibras agrícolas está se ampliando rapidamente, em razão do bom comportamento mecânico que esses materiais possuem em virtude de seu baixo custo. Entretanto, é necessário cada vez mais investimento em pesquisas e estudos que explorem os limites, tanto humanos, como tecnológicos para o uso destas fibras, fazendo-se conhecer suas características físicas, químicas e suas propriedades mecânicas.

Uma vez conhecidas, portanto, é imprescindível prover modificações para que seu uso seja o mais adequado e seu potencial máximo alcançado (ROWELL, 1997).

O emprego de materiais reforçados com fibras na construção civil não é novidade, tendo-se registro deste uso nos primórdios da civilização, no antigo Egito e em Roma, onde tijolos e adobes eram reforçados com raízes, além disso, há conhecimento do uso de amianto de até 2500 a.c. na região da atual Finlândia (SWAMY, 1975).

Na prática, os materiais compósitos vêm sendo utilizados há muito tempo pela humanidade. Já eram gerados, por exemplo, quando se misturava palha ao barro para obter misturas mais adequadas para o uso nas construções de civilizações antigas. Registros históricos mostram que a utilização de fibras como reforço de materiais na construção já ocorria em 1200 a.c., na civilização egípcia.

O cimento-amianto foi o primeiro material de construção civil reforçado com fibras produzido em escala industrial, desde 1900. Na década de 60, com a confirmação dos riscos de saúde que a exposição ao amianto provoca, a Engenharia Civil voltou a estudar e desenvolver compósitos com materiais fibrosos como a fibra de vidro, fibras de polipropileno, fibras metálicas e outras (AGOPYAN, 1991).

Materiais compósitos de matriz polimérica são hoje empregados na fabricação de diferentes elementos usados na construção civil: pisos e revestimentos, móveis e estruturas de madeira, impermeabilizações e vedações. Um importante uso consiste na aplicação de polímeros reforçados com fibras como reforço estrutural, que colados com adesivos à base de resina epóxi em elementos de concreto armado começou a ser utilizada como uma técnica de reforço à flexão em meados da década de 80 do século passado e, desde então, tem sido aplicada com sucesso no reforço de pontes e construções em todo o mundo. Estes compósitos vêm substituindo, com vantagem, os reforços executados em aço e concreto, devido a uma série de fatores, tais como a elevada relação resistência/peso, boa durabilidade em uma diversidade de ambientes, facilidade e velocidade de instalação, flexibilidade de formas e neutralidade eletromagnética (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007).

Nos países em desenvolvimento a utilização de fibras vegetais em materiais compósitos vêm sendo estudada em virtude da disponibilidade destas fibras nestes países. No Brasil, pode-se citar o Centro de Pesquisas e Desenvolvimento – CEPED, localizado em Camaçari, Bahia, como pioneiro no estudo sistemático de fibras, que iniciou seu trabalho em 1980, com a avaliação das fibras de sisal, coco, bambu, piaçava e bagaço de cana de açúcar para produção destes compósitos. Após as avaliações iniciais, concentrou seus trabalhos nas fibras de sisal e coco, estudando e aperfeiçoando compósitos cimentícios com materiais celulósicos por meio do grupo de pesquisadores do Thaba (Programa de Tecnologias de Habitação), desenvolvendo materiais para uso na construção civil mais baratos, populares e ecologicamente corretos (AGOPYAN; SAVASTANO JR., 1998).

Savastano Jr. et al. (1998) caracterizou resíduos de fibras vegetais, utilizando-se os mesmos no reforço de matrizes frágeis à base de cimento de escória e observou que há uma grande potencialidade dos rejeitos estudados, tendo em vista principalmente a grande disponibilidade, baixo valor de mercado e propriedades mecânicas dos compósitos resultantes significativamente superiores às da matriz sem reforço. Outro trabalho dos mesmos autores (SAVASTANO JR *et al.*, 1997), confirma esta potencialidade quando analisados resíduos de maior interesse como a fibra de sisal e polpa celulósica de eucalipto, para reforço de componentes construtivos à base de matrizes frágeis, em comparação a outras fibras substitutas, tais como as fibras plásticas.

Agopyan (1991) destaca algumas fibras nacionais com uso potencial na construção civil, entre elas, as de algodão, bambu, cana de açúcar, cânhamo, coco, celulose, juta, linho, piaçava, sisal e rami, não sendo todas igualmente adequadas como reforço nas construções, apesar de todas apresentarem propriedades físicas e mecânicas compatíveis com as exigências do setor.

Embora as fibras naturais apresentem vantagens em seu uso, principalmente sua abundância e baixo custo, muitas vezes como resíduos, também oferecem limitações, tais como baixo módulo de elasticidade, alta absorção de água, susceptibilidade ao ataque de fungos e insetos, instabilidade dimensional com variação da umidade e variabilidade de propriedades entre fibras do mesmo tipo (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Neste contexto, estudos estão sendo realizados com o intuito de selecionar as fibras naturais mais apropriadas para serem usadas como reforço de materiais compósitos, como o de Munawar *et al.* (2007), que caracterizou as propriedades morfológica, física e mecânica de sete tipos de fibras vegetais, concluindo que de acordo com as propriedades mecânicas destas fibras, as de rami mostraram-se com grande potencial para uso em compósitos de alta performance.

Outro estudo de Angelini *et al.* (2000), analisou as propriedades químicas, físicas e mecânicas das fibras de rami e da vassoura espanhola (giesta) para avaliar a possibilidade do uso destes em materiais compósitos, observando-se que as fibras apresentam resistência à tração de 950 MPa (fibra de rami) e 700 MPa (fibra de giesta), módulo de elasticidade de 65 GPa (fibra de rami) e 20 GPa (fibra de giesta), valores comparáveis aos da fibra de vidro (70 GPa a 90 GPa), e a interface fibra-matriz para as fibras vegetais mostrou-se maior que as de carbono e vidro, confirmando que ambas as fibras apresentam potencial para serem utilizadas em materiais compósitos.

Na última década, muitas pesquisas têm sido realizadas visando o tratamento das fibras vegetais para sua melhoria em aplicação de compósitos. Destes estudos pode-se citar o de Goda *et al.* (2005), com objetivo de verificar o efeito do tratamento químico (álcali-tratamento) nas propriedades mecânicas das fibras de rami; o de Munawar *et al.* (2008), que investigou os efeitos do tratamento de vapor de água leve em diferentes fibras vegetais e a orientação dessas fibras em quadros de fibras; e o de Motta (2006) que estudou os tratamentos termomecânico e impregnação de resinas, para melhorar o desempenho e durabilidade das fibras vegetais quando usadas como reforço de matrizes de cimento Portland.

Outras tentativas de uso das fibras vegetais são vistas também em estudos como o de Lodha e Netravali (2005), onde foram produzidos compósitos “verdes”, com matriz resina de proteína isolada de soja (SPI) e com resina de proteína isolada de soja modificada (MSPI) por ácidos, reforçadas com fibras de rami alinhadas unidirecionalmente. Tendo sido observado que as propriedades mecânicas, térmicas e a resistência à umidade do composto com a MSPI foram significativamente melhores do que as propriedades do composto com a resina SPI. Entretanto, o módulo de elasticidade conseguido para ambos os compósitos possui valores mais

baixos do que os valores calculados teoricamente, concluindo-se que os compósitos rami/MSPI apresentam propriedades adequadas para uso em variadas aplicações comerciais não críticas que requerem intensidade de resistência do material moderada.

2.2 Matrizes

A matriz de um material compósito deve transmitir as tensões e conectar os elementos de reforço, proteger as fibras de ataques químicos, das ações do meio ambiente, dos choques mecânicos e dar suporte contra a instabilidade das fibras quando submetidas à compressão (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007).

Embora as matrizes cimentícias, aquelas à base de cimento, sejam bastante comuns na construção civil, as fibras vegetais como reforço nessas matrizes apresentam problemas de durabilidade, pois acontece a agressão do meio alcalino às fibras naturais, propiciado pela água presente nos poros da matriz e, produtos de hidratação do cimento são carregados para o interior dos poros naturais das fibras, causando a sua fragilização. Como a velocidade de degradação é relativamente baixa e as soluções para essa degradação apresentam custo elevado, compósitos de fibras vegetais e cimento convencional podem ser empregados nas peças em que a resistência a impacto e a ductilidade são necessárias apenas por curto período de tempo (SAVASTANO JR., 2000; TOLÊDO FILHO, 2000).

Devido à facilidade de execução, um dos materiais mais utilizados como matriz são os polímeros, tanto os termoplásticos quanto os termorrígidos. As matrizes termorrígidas são as mais usadas em compósitos estruturais, uma vez que, têm as moléculas quimicamente unidas através de ligações cruzadas, resultando em uma rede rígida tridimensional, o que leva a um produto de resistência elevada e aplicações características geralmente desejáveis (MAZALI, 2003; LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Na Engenharia Civil, as matrizes tradicionalmente mais empregadas atualmente são as cerâmicas, destacando-se as cimentícias, a partir das quais são geradas praticamente todas as argamassas e concretos. No entanto, as matrizes poliméricas

estão sendo cada vez mais estudadas e utilizadas, especialmente quando reforçadas por fibras. Em algumas aplicações especiais, são usadas também as matrizes metálicas. Matrizes alternativas, à base de carbono ou de minerais menos comuns, estão começando a serem estudadas para uso em situações especiais (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007).

As matrizes cerâmicas, em geral, apresentam boa resistência ao calor, sendo aplicadas em situações marcadas pela exposição a altas temperaturas. A matriz cimentícia se caracteriza pela boa resistência à compressão, reduzida resistência à tração, modesto módulo de elasticidade e comportamento frágil. Componentes de reforço particulados são tradicionalmente empregados para estruturar estas matrizes, resultando em compósitos com módulo de elasticidade mais elevado, como o concreto. Para incrementar a resistência à tração e ductilidade, também podem ser usados componentes de reforço em forma de fibras, como as de aço, vidro, polipropileno, aramida e carbono (NOGUEIRA *et al.*, 1999).

Os compósitos para engenharia estrutural são, normalmente, formados a partir da polimerização de soluções de resina com uso de catalisadores e/ou temperatura. As resinas mais utilizadas são do tipo poliéster insaturada, éster vinílico ou epóxi. Em algumas aplicações especiais, são utilizadas resinas fenólicas ou à base de poliimidas (mais resistentes à temperatura), ou de poliuretanos (com alta resistência mecânica). Podem ainda ser usadas resinas tipo silicone, poliamida e polipropileno, entre outras (REZENDE; BOTELHO, 2000).

As resinas poliéster, devido ao seu custo reduzido, são extensivamente utilizadas em conjunto com fibras de vidro e podem ser utilizadas em temperaturas acima de 100°C, entretanto, possuem baixa resistência ao impacto e à degradação e, por isso, não são utilizadas em aplicações que exigem elevado desempenho, mas são largamente usadas na indústria automotiva e na construção civil (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007). São uma família de polímeros formados da reação de ácidos orgânicos dicarboxílicos e glicóis, que, quando reagidos, dão origem a moléculas de cadeias longas lineares e são fornecidas ao moldador na forma de um líquido viscoso que se transforma em um sólido rígido infusível por meio de uma reação química exotérmica de polimerização ou cura (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Resinas do tipo éster vinílicas apresentam custo elevado, se comparadas as do tipo poliéster, assim como as resinas do tipo poliimida. Entretanto, as primeiras, por serem bastante resistentes a ácidos e álcalis, são muito aplicadas na produção de polímeros reforçados com fibras usados como barras de armadura para concreto. Já as resinas fenólicas, são bons isolantes elétricos, apresentam boa resistência a altas temperaturas e ataques químicos, mas possuem desempenho mecânico bem inferior aos outros tipos de resinas (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007).

A resina epóxi, matéria-prima em vários setores industriais, incluindo a construção civil, é o material termorrígido de maior aplicação como matriz nos sistemas de polímeros reforçados com fibras por ter uma excelente aderência junto à fibra e pequena contração durante o processo de cura (LEVY NETO; PARDINI, 2006). Embora seu custo seja elevado, elas apresentam excelentes propriedades mecânicas e elétricas, grande adesividade e, principalmente, possibilidade de cura à temperatura ambiente (SILVA FILHO; GARCEZ, 2007). Contêm duas ou mais cadeias epóxi por molécula através das quais se produz a reação de polimerização e suas propriedades finais dependem do agente catalisador, da temperatura, do grau de conversão alcançado e do entrecruzamento produzido (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

As resinas epóxi mais utilizadas têm como base o diglicidil éter do bisfenol A (DGEBA) e são sintetizadas a partir de uma reação entre a epicloridrina e o bisfenol-A. A relação molar epiclorohidrina/bisfenol A pode variar de 10:1 até 1,2:1, produzindo desde resinas muito líquidas até resinas sólidas na forma de oligômeros ou pré-polímeros. A sua estrutura consiste de grupos epóxi terminais e uma unidade de repetição no meio, que incorporadas à molécula, variam, influenciando nas propriedades da resina (ELLIS, 1993).

No processamento de resinas epóxi, uma enorme variedade de agentes de cura é empregada e estes são adequados aos ciclos de processamento. O tipo de agente determina o tipo de reação de cura que ocorre, e influencia a cinética da cura e o ciclo de processamento (viscosidade em função do tempo) e a gelação, que irão afetar as propriedades do material curado. Após a cura, a relação epóxi/endurecedor afeta a transição vítrea, o módulo de elasticidade e a resistência mecânica. A resistência à tração de sistemas epóxi curados variam de 40 MPa a 90 MPa,

enquanto o módulo de elasticidade varia de 2,5 GPa a 6,0 GPa, com a deformação de ruptura variando na faixa de 1% a 6%. A resistência à compressão é de 100 MPa a 200 MPa (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

2.3 Fibras de reforço

Os reforços para compósitos podem se apresentar numa série de classificações decorrentes dos tipos e arranjos dos reforços existentes. Conforme mostra esquematicamente o diagrama da Figura 1, observa-se que os reforços em um compósito podem consistir de fibras ou partículas.

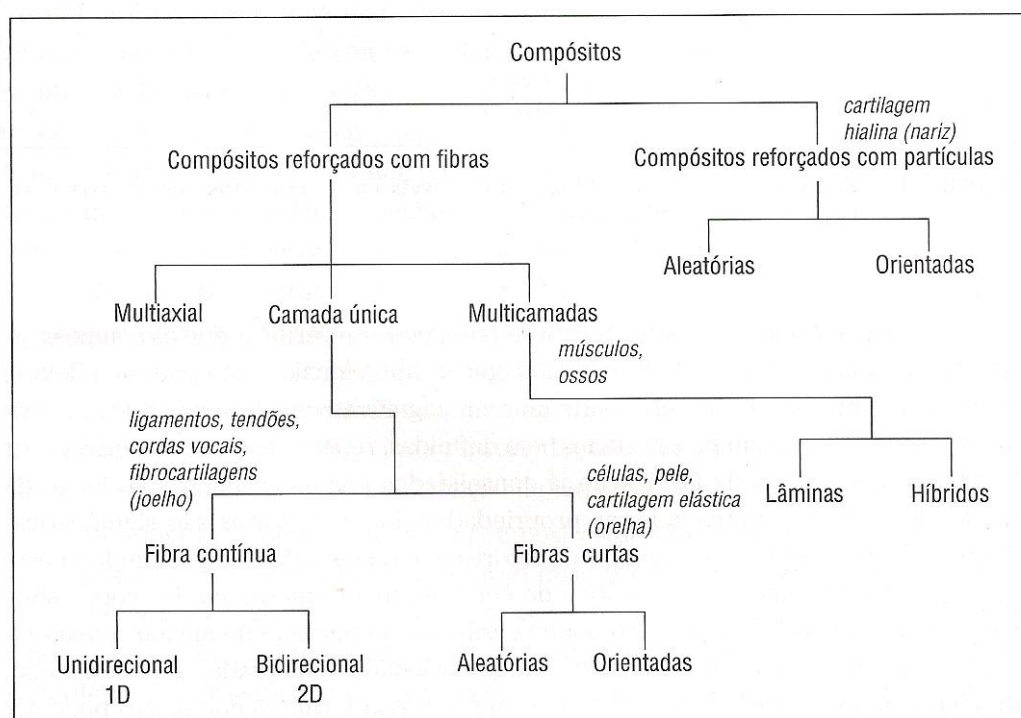


Figura 1: Proposta de classificação hierárquica de compósitos sintéticos e naturais.

Fonte: LEVY NETO; PARDINI, 2006.

No caso do reforço na forma de fibras pode-se dispô-las em feixes paralelos entre si, de modo a formar e orientar o reforço em multidireções, multicamadas ou na forma de camadas isoladas ou lâminas (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Os compósitos obtidos com fibras contínuas podem apresentar geralmente, reforço unidirecional ou bidirecional. Nestes casos, o material é moldado de forma que, em cada camada de compósito, a fase de reforço contínua é dotada de uma orientação preferencial (CALLISTER, 2002).

Paiva Jr. *et al.* (2004) realizaram estudos comparando-se compósitos de matriz poliéster com tecido híbrido rami-algodão, para um volume total de fios de aproximadamente 60,2%, sendo aproximadamente, 16,8% fios de algodão, produzidos em três camadas, para o mesmo volume de fios de rami 43,4% diferentes apenas na posição das fios (i.e. 0/90/0 vs 90/0/90). A direção (0) refere-se a fios de rami alinhados com a direção do teste de tração, enquanto a direção (90) refere-se a fios perpendiculares à direção do teste. O compósito 0/90/0 teve uma resistência à tração de 85,0 MPa com 28,9% de fios de rami alinhados com a direção do teste, enquanto o compósito 90/0/90 teve uma resistência à tração de 51,7 MPa com 14,5% de fios de rami alinhados com a direção do teste de tração, concluindo-se assim que os fios de rami quando dispostos transversalmente na direção do teste de tração não contribuíram significativamente para melhorar o desempenho do compósito. Este comportamento foi também atribuído à fragilidade da interface fibra-matriz.

Outro trabalho em que foi analisado o comportamento mecânico de um compósito moldado com número variável de camadas de fibras vegetais, mostrou uma tendência de melhoria das propriedades do compósito com o uso de tecidos mais finos e com o aumento do número de camadas de fibras, devido principalmente, ao fato do aumento da molhabilidade das fibras pela resina, melhor alinhamento das fibras e diminuição da quantidade de fibras ortogonais à direção do carregamento (SABARIZ *et al.*, 2006). O que indica que o comportamento mecânico dos compósitos produzidos dependem, não só das propriedades da matriz utilizada, mas também do tipo de reforço, suas características físicas, sua manipulação e organização para obtenção do material final.

As fibras são corpos que tem uma elevada razão de aspecto, ou seja, a relação entre o comprimento e as dimensões laterais (diâmetro) é muito desproporcional. São os elementos de reforço dos compósitos estruturais que suportam carregamento

mecânico, podem resistir a variações de temperatura de -50 °C a 150 °C, sem apreciável alteração de suas propriedades mecânicas (MANO; MENDES, 1999).

As fibras se constituem em um meio efetivo de reforço porque apresentam menor número de defeitos que em sua forma mássica. À medida que se tornam mais finos, os materiais tendem a apresentar menor número de defeitos que possam induzir as falhas e, dessa forma, a resistência tende a se aproximar da resistência teórica do material, representada pela resistência coesiva das camadas adjacentes de átomos (CALLISTER, 2002).

Fibras com maiores diâmetros, conseqüentemente, com maior quantidade de filamentos, tendem, estatisticamente a iniciarem ruptura em seus filamentos mais fracos, acarretando um processo não uniforme e prematuro de fraturas a tensões relativamente baixas se comparadas com fibras de menor diâmetro (NETO, J.B. *et al.*, 2010).

Dentre os materiais compósitos, o reforço tipo fibra tem despertado grande interesse em engenheiros da indústria de diversos setores como automotiva, da construção mecânica, metalúrgica, farmacêutica, naval, aeronáutica, aeroespacial, construção civil, entre outras, pois na forma fibrosa um material apresenta elevada resistência à tração e alto módulo de elasticidade, conforme pode ser visto na Tabela 1.

Um critério decisivo para a escolha do tipo adequado de fibra é o seu módulo de elasticidade, uma vez que, as propriedades mecânicas são parâmetros do material que determinam sua resposta a esforços mecânicos sofridos, sendo o módulo de elasticidade a característica mais estudada. As fibras podem atuar como reforço (aumento de rigidez) para o compósito, ou seja, um material de maior módulo, as fibras, substitui o de menor módulo, a matriz, melhorando o comportamento do módulo de elasticidade dos compósitos (FREIRE *et al.*, 1994; SABARIZ *et al.*, 2006).

Uma comparação entre os valores de resistência de diversas fibras convencionais e tropicais com os correspondentes às fibras de vidro, mostrou que, por exemplo, os valores absolutos característicos das fibras tropicais eram de apenas metade do nível correspondente aos valores característicos da fibra de vidro. Contudo, devido ao fato de sua densidade ser aproximadamente 45% menor, as

fibras naturais apresentam níveis de resistência específica comparáveis aos da fibra de vidro (KLEBA; ZABOLD, 2004).

TABELA 1 - Propriedades mecânicas de fibras vegetais e de fibras convencionais usadas como reforço.

Fibra	Densidade (g/cm ³)	Deformação máxima (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)
Coco	1,18 – 1,29	30,0	175	4,0 – 6,0
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
Cânhamo	—	1,6	690	—
Rami	1,51	1,8 – 5,3	400 – 938	25,0 – 128,0
Sisal	1,5	4,0 – 5,4	511 – 635	9,4 – 22,0
Kraft ^a	1,5	—	1000	40,0
Vidro-S ^b	2,55	2,5	2800	86
Carbono (padrão)	1,4	1,4 – 1,8	4000	230,0 – 240,0

FONTE: Bledzki e Gassan, 1999; Motta, 2006; Levy Neto e Pardini, 2006.

a – Kraft de madeira leve

b – Fibra de vidro usada em compósitos de matriz polimérica (S)

2.3.1 Fibras Vegetais

As fibras vegetais podem ser obtidas do caule, da folha e do fruto das plantas, sendo as fibras das folhas geralmente duras, resistentes e de textura mais rugosa do que as fibras dos caules. As condições do ambiente onde crescem as plantas como clima e características do solo interferem nas propriedades mecânicas dos produtos vegetais, além disso, a idade da planta produtora das fibras também é um fator de variação nestas propriedades, onde fibras de madeira mais antiga tendem a

apresentar resistência mais elevada do que aquelas extraídas de plantas mais jovens (COUTTS, 1988).

As fibras vegetais são constituídas por células individuais que, por sua vez, se compõem de microfibrilas dispostas em camadas de diferentes espessuras e ângulos de orientação, como mostra a Figura 2. As microfibrilas são ricas em celulose, polímero vegetal de cadeias longas e estão aglomeradas por hemicelulose amorfa. As células da fibra tem de 10 μm a 25 μm de diâmetro e são compostas por quatro camadas de microfibrilas: 1) camada primária, mais externa, de estrutura reticulada; 2) camada secundária, S_1 , de estrutura também reticulada; 3) camada secundária, intermediária, S_2 , em que as microfibrilas estão orientadas segundo um ângulo θ com relação ao eixo longitudinal da célula, em espiral, e 4) camada secundária S_3 , mais interna, também com as microfibrilas em forma de espiral. A camada S_2 é a de maior espessura e, também, a de maior teor de celulose. No interior da célula há uma cavidade central de seção elíptica com dimensão de 5 μm a 10 μm denominada lúmen (SAVASTANO JR., 2000).

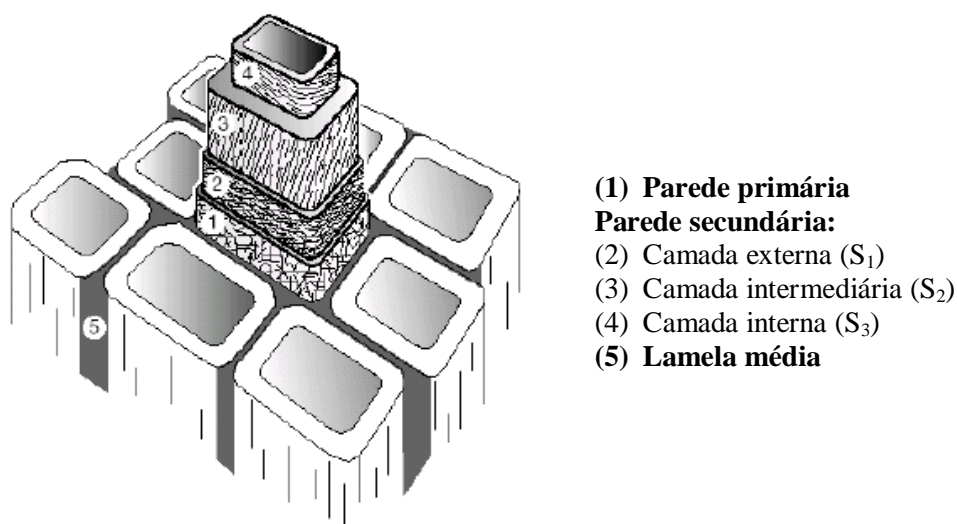


Figura 2: Estrutura celular da fibra vegetal. Fonte: MOTTA, 2006.

As diversas células que compõem a fibra se encontram aglomeradas pela lamela intracelular composta de hemicelulose, pectina e, principalmente, lignina (70%, em média). A região central da fibra também pode apresentar uma cavidade

denominada lacuna. As lacunas e lumens são responsáveis pela grande incidência de poros permeáveis nas fibras, o que acarreta elevada absorção de água e massa específica aparente bastante inferior à real (AGOPYAN; SAVASTANO JR., 1998).

A celulose é a base estrutural das fibras vegetais e está distribuída em todas as plantas, desde árvores desenvolvidas até organismos primitivos. Na fibra, a celulose está associada com outras substâncias como lignina e as hemiceluloses, ambas em quantidades consideráveis (DENCE; REEVE, 1996).

A lignina é um polímero complexo de estrutura amorfa, com constituintes aromáticos e alifáticos, que une as fibras celulósicas, formando a parede celular. Fornece resistência à compressão ao tecido celular e às fibras, enrijecendo a parede celular e protegendo os carboidratos (açúcares) contra danos físicos e químicos. Sua concentração nas fibras influencia a estrutura, as propriedades, a morfologia, a flexibilidade e a taxa de hidrólise. Fibras com alto teor de lignina serão rígidas e fortes (AZUMA *et al.*, 1985).

As hemiceluloses são polissacarídeos com peso molecular variando de 25.000 u.m.a (unidade de massa atômica) a 35.000 u.m.a, formado pela polimerização de vários açúcares, incluindo glucose, xilose, galactose, arabinose e manose, porém com grau de polimerização cerca de um décimo a um centésimo daquele encontrado para a celulose nativa. As hemiceluloses constituem cerca de 20% a 30% das fibras sendo predominantemente encontradas nas paredes celulares primárias e secundárias (LEWIN; GOLDENSTEIN, 1991).

As fibras de juta, linho, rami e sisal são fibras com percentuais altos de celulose, sendo indicadas para uso como material de reforço em compósitos. Os percentuais elevados de lignina nas fibras de juta e sisal habilitam-nas a terem comportamento adicional de rigidez dos compósitos, principalmente daqueles submetidos a processos de aquecimento (BLEDZKI; GASSAN, 1999). A tabela 2 mostra a composição das principais fibras vegetais usadas como reforço em compósitos.

TABELA 2 - Composição de fibras vegetais

Fibra	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Pectina (%)	Cinza (%)	Água (%)
Casca de coco	36 – 43	0,15 – 0,25	20 – 45	3,0	2,7 – 10,2	10 – 12
Algodão	82,7	5,7	-	5,7	NA	10
Juta	64,4	12,0	11,8	0,2	NA	10
Linho	64,1	16,7	2,0	1,8	NA	10
Rami	68,6	13,1	0,6	1,9	NA	10
Sisal	65,8	12,0	9,9	0,8	NA	10

FONTE: Bledzki; Gassan, 1999.

NA: Não avaliado

A presença de substâncias de caráter ácido liberadas pela fibra vegetal em solução aquosa influencia a velocidade de hidratação dos aglomerantes hidráulicos. Essas substâncias não fazem parte da estrutura da fibra, são genericamente chamadas de extrativos e incluem resinas, polifenóis, óleos e graxas. O mesmo efeito pode ser gerado pela presença de açúcares na estrutura vegetal, rapidamente liberados em solução aquosa (SAVASTANO JR., 2000).

Para matrizes frágeis reforçadas com fibras de baixo módulo de elasticidade, em que o arrancamento da fibra predomina sobre a ruptura, tem-se a aderência fibra-matriz como principal fator de influência sobre a tenacidade (energia total absorvida) do compósito (SAVASTANO JR., 2000).

Agopyan (1991) em seu abrangente trabalho a respeito do emprego de fibras vegetais como reforço de matrizes frágeis relacionou 19 fibras potencialmente úteis para a construção civil, destacando-se principalmente as fibras de coco e sisal. Como um produto natural, a extração, o processamento após a colheita e o uso das fibras vegetais em geral estiveram baseadas mais em tradições e estudos empíricos sobre o assunto do que em critérios científicos e técnicos, o que leva a se encontrar na literatura técnico-científica, propriedades físicas e mecânicas com variações significativas nas fibras de uma mesma designação, com coeficientes de variação freqüentemente maiores que 40% (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Adicionado a estes fatores e a algumas limitações das fibras vegetais como, alta sensibilidade a efeitos ambientais, significativas influências referentes ao solo, à época da colheita, ao processamento após a colheita e à localização relativa no corpo da planta, observa-se que em alguns trabalhos publicados não há uma

indicação precisa se os resultados obtidos referem-se aos ensaios de uma fibra individual (ou monofilamento) ou de um feixe de fibras contendo dezenas ou milhares destas, contribuindo assim para aumentar a incerteza sobre a variação nas propriedades de fibras de designação idêntica (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

O interesse nos materiais compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais está crescendo rapidamente em termos de aplicações industriais e pesquisa fundamental. Elas são renováveis, baratas, completa ou parcialmente recicláveis e biodegradáveis (KOZLOWSKI; WLADYKA-PRZYBYLAK, 2003).

2.3.1.1 Fibra do Rami

O rami (*Boehmeria nivea*) é uma planta da família Urticaceae, geralmente herbáceas que crescem a alturas de um a três metros, apresentam folhas em forma de coração e brancas na sua face inferior devido à presença de pêlos longos, muito finos e entrelaçados. As fibras de rami são extraídas do caule da planta após a descorticação do mesmo, logo após o seu corte (BENATTI JR., 1988). O rami é da família das fibras longas, assim como o linho, a juta, o sisal e o cânhamo (SINGH, 1996).

Para a execução do reforço estrutural, pode-se utilizar a fibra do caule do rami. A boa aderência entre a fibra e a matriz irá garantir sua aplicação técnica num compósito. Segundo dados do BNDES (1996), a produção do rami concentra-se no Paraná, especialmente no município de Londrina e apresentou uma queda considerável nos anos 90, substituído por outras culturas.

Do ponto de vista técnico, a fibra do rami é excelente matéria-prima para a confecção de todo e qualquer artigo que seja tecido ou fiado, sendo de alta resistência, considerada três vezes superior à do cânhamo, quatro vezes à do linho e oito vezes à do algodão e ainda mais resistente que o náilon, oferece mais que qualquer outra fibra vegetal, um baixo custo e por suas propriedades físicas é a mais durável e resistente de todas as fibras vegetais conhecidas (BENATTI JR., 1988).

O processo de beneficiamento do rami é constituído de descorticação e desgoma. A primeira etapa é feita ainda no campo por meio de máquinas

desfibradoras ou descortificadoras, que separam as cascas das hastes, já a desgomagem é feita quimicamente nas indústrias (BENNATTI JR., 1988).

Apesar das vantagens que o rami apresenta, o seu ponto vulnerável reside na dificuldade de se obter a extração mecânica da fibra, que pode ser melhor compreendida através da observação da estrutura do caule do rami em corte transversal mostrada na Figura 3. Notam-se três zonas bem definidas do exterior para o interior: córtex, zona cortical, ou casca C; zona cambial, ou lenho L; e zona medular ou medula M. Na zona cortical se localizam as fibras no sentido paralelo ao eixo do caule, onde pode-se observar, de fora para dentro, uma epiderme *ep*, aderida fortemente, como uma membrana, sobre o colênquima *co*, que é formado por diversas camadas de células de membranas muito espessas. A epiderme se torna, assim, resistente e difícil de ser separada, constituindo, na ocasião da extração da fibra, um obstáculo sério a ser vencido. A seguir aparece uma zona *pa*, constituída de células parenquimatosas distribuídas irregularmente, células estas de paredes finas e possuindo algumas delas, no seu interior, incrustações de cristais de oxalato de cálcio. Logo a seguir, vem uma zona chamada pericíclica ou fibrosa *f*, onde se localizam as fibras liberianas isoladas ou reunidas em grupos de 3, de 4 ou mais e onde as fibras aderem fortemente.

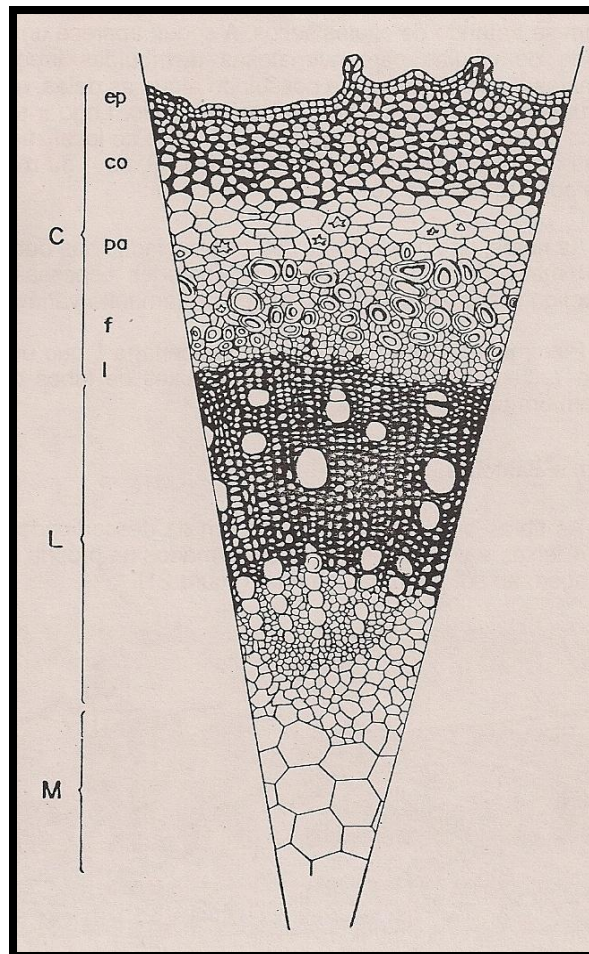


Figura 3: Corte transversal do caule do rami. Fonte: BENATTI JR., 1988.

Apesar das dificuldades em se obter a fibra do rami tem-se máquinas que fazem o trabalho de descorticação com eficiência e segurança aos seus usuários, o que incentiva o uso desta fibra que é a mais longa (50 mm a 300 mm), resistente à ruptura e uma das mais finas entre as fibras vegetais. Além disso, resiste bem aos agentes atmosféricos e bacterianos, graças à sua composição e a seus caracteres químicos (SINGH, 1996).

As fibras vegetais oferecem algumas vantagens sobre as fibras de vidro, carbono, poliméricas, e outras, como a condição de serem matérias-primas renováveis. Além disso, a natureza abrasiva das fibras vegetais é muito menor quando comparada com as fibras de vidro e carbono, que conduz as vantagens com respeito à técnica, a reciclagem do material ou processo de compósito em geral, causando menor efeito abrasivo nos equipamentos de processamento (LEVY NETO; PARDINI, 2006; FREIRE *et al.*, 1994).

2.3.2 Fibras de Vidro

A fibra de vidro possui baixo custo, alta resistência à tração e grande inércia química, o que a torna uma das mais utilizadas em compósitos com matriz polimérica. Entretanto, são associadas ao relativo baixo módulo de elasticidade, auto-abrasividade e à baixa resistência à fadiga quando agregada a compósitos. Composições típicas para fibras de vidro são mostradas na Tabela 3 (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Tabela 3: Composição de fibras de vidro utilizadas na manufatura de compósitos

Constituintes	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O
Vidro E	55,2	14,8	7,3	3,3	18,7	-
Vidro C	65	4	5	3	14	8,5
Vidro S	65	25	-	10	-	-

Fonte: LEVY NETO; PARDINI, 2006.

As fibras de vidro são isotrópicas e, portanto, o módulo de elasticidade nas direções axial e transversal ao filamento é idêntico. Podem ser produzidas tanto na forma de filamentos contínuos quanto na forma de fibras picadas (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Após o processo de fiação, as fibras são recobertas com um material de encimagem. Fibras destinadas a processos de tecelagem, como por exemplo, trançagem, são recobertas com um material lubrificante, que pode ser removido posteriormente por queima. As fibras de vidro podem também ser recobertas com agentes ligantes de forma a promover adesão química entre a matriz polimérica e a superfície da fibra. Estes agentes ligantes são usualmente organosilanos que apresentam uma estrutura do tipo X₃SiR. O grupo R é susceptível de ligação a um grupo na matriz, e os grupos X podem hidrolisar na presença de água para formar um silanol, e condensam na superfície da fibra de vidro formando siloxanos (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

2.3.3 Fibras de Carbono

As fibras de carbono são matérias-primas que provém da pirólise de materiais carbonáceos, ou seja, a decomposição pelo calor de algum material rico em carbono, que produz filamentos de alta resistência mecânica usados para os mais diversos fins. Os materiais carbonáceos podem ser naturais ou sintéticos e são utilizados como “fibra precursora” (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

As fibras precursoras podem ser de uma grande variedade, conferindo diferentes morfologias e diferentes características específicas. Os precursores mais comuns, entretanto, são a poliacrilonitrila (PAN), fibras de celulose (viscose *rayon*, algodão), e piches de petróleo e alcatrão de hulha (LEVY NETO, PARDINI, 2006).

O processo de pirólise consiste basicamente no tratamento térmico do precursor que remove oxigênio, nitrogênio e hidrogênio dando origem às fibras de carbono. As propriedades mecânicas das fibras de carbono são melhoradas pelo aumento da cristalinidade e orientação, e pela redução dos defeitos na fibra. O único meio de se alcançar este objetivo é partir de um precursor altamente orientado e manter essa alta orientação inicial durante o processo de estabilização e carbonização sob estiramento (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

2.4 Desempenho dos Compósitos

Na análise do desempenho dos compósitos, as propriedades mecânicas devem ser avaliadas levando-se em conta a complexidade da interação mecânica entre o reforço e a matriz. As propriedades mecânicas de maior interesse são: resistência à tração, compressão, flexão, impacto, fadiga, e abrasão, além do módulo de elasticidade em tração e flexão, dureza e tenacidade à fratura (SABARIZ *et al.*, 2006).

A resistência à tração é avaliada pela carga aplicada ao material por unidade de área, no momento de ruptura. O alongamento representa o aumento percentual do comprimento da peça sob tração, no momento de ruptura. O módulo de elasticidade é medido pela razão entre a tensão e a deformação, dentro do regime elástico, onde

a deformação é totalmente reversível. O coeficiente de Poisson é definido como a razão negativa entre a deformação transversal e a deformação longitudinal, abaixo do limite de proporcionalidade do material (SABARIZ *et al.*, 2006).

Ao analisar compósitos com fibras de coco como reforço em matriz epóxi, Gonçalves (2010) mostrou que o aumento no teor da fibra influencia diretamente a resistência à tração, assim como a resistência à flexão, ou seja, à medida que há um aumento no teor de reforço (limite superior de 30%) há também um aumento no valor limite dessas resistências, indicando que as tensões são mais bem distribuídas. Porém, os valores das resistências à tração e flexão destes compósitos, embora maiores do que os da resina epóxi sem reforço são inferiores quando comparados com as propriedades de fibras comerciais de vidro ou carbono.

Em estudo de compósitos à base de cimento e reforço de fibras vegetais (coco, sisal e malva), de amianto e de polipropileno, foi observado na análise do ensaio de tração na flexão uma significativa queda da energia específica aos 180 dias de idade, para compósitos com fibras vegetais, em decorrência da degradação dessas fibras. O compósito que absorve a maior quantidade de energia é aquele com fibras de polipropileno, seguido pelos compósitos com fibras de sisal, coco, malva e amianto (SAVASTANO JR., 2000).

Segundo Savastano Jr. (2000), quanto à durabilidade de compósitos formados por matrizes frágeis e fibras vegetais dois fatores são determinantes: o ataque alcalino às fibras e a incompatibilidade física entre fibras e matrizes. A principal fonte de degradação de vegetais no ambiente natural é o ataque biológico através de fungos xilófagos, mas não representa maiores preocupações se as matrizes empregadas apresentam pH alcalino capaz de inibir sua ação.

No entanto, diversos estudos demonstram a viabilidade do uso da fibra de rami como reforço em compósitos de polímeros reforçados com fibras, devido à sua maior resistência à tração: 220 MPa a 938 MPa (Li *et al.*, 2007); 849 MPa \pm 108 MPa (Munawar *et al.*, 2007); 610 MPa (Suizu *et al.*, 2009); 480 MPa em matriz epóxi (Gindl *et al.*, 2006); além de maior módulo de elasticidade: 44 GPa a 128 GPa (Li *et al.*, 2007); 28,4 GPa (Munawar *et al.*, 2007); 5,8 GPa \pm 0,7 GPa em matriz epóxi

(Gindl *et al.*, 2006), e menor variabilidade da seção transversal e propriedades mecânicas (MUNAWAR *et al.*, 2007).

Em estudo realizado por Sabariz *et al.* (2006), onde foram avaliadas as propriedades mecânicas de compósitos formados por matriz epóxi reforçada com fibras vegetais, observou-se que, o compósito com três camadas de tecidos de fibras apresentou o melhor desempenho entre os compósitos testados, verificando-se uma tendência de melhoria das propriedades mecânicas na medida em que o número de camadas de fibras no compósito aumenta. Concluindo-se então, que para compósitos reforçados com tecidos, estes devem ser produzidos com fios da menor espessura possível de modo a conseguir um compósito com maior número de camadas, melhorando-se a adesão fibra-matriz e aumentando a eficiência do reforço.

Neste trabalho serão avaliadas as propriedades de resistência à tração e rigidez (módulo de elasticidade), pois o objetivo é verificar o desempenho do material para fins de reforço estrutural.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

3.1.1 Fibras

A fibra de rami foi selecionada para o trabalho devido às suas melhores propriedades mecânicas, comprimentos adequados (longas) (Figura 4) e disponibilidade. As fibras utilizadas foram adquiridas da empresa Sisalsul Indústria de Fibras, do Estado de São Paulo.



Figura 4: Fibra de rami.

3.1.2 Resina

A resina epóxi foi adotada considerando sua boa compatibilidade com fibras vegetais (CARVALHO, 2005), boas propriedades mecânicas e por ser a resina de maior uso como matriz nos compósitos para reforço estrutural.

Para os compósitos produzidos utilizou-se o sistema de resina epóxi resultante da reação da epicloridrina com o bisfenol A, modificada com extensores reativos alifáticos e o endurecedor foi à base de poliamina modificado, produzidos pela Silaex® Química Ltda.

As características dos componentes, segundo informações do fabricante, estão apresentadas na tabela 4. As propriedades do sistema não curado constam na tabela 5.

Tabela 4: Características dos componentes resina epóxi e endurecedor

Características	Resina epóxi	Endurecedor
Aparência	Líquido incolor viscoso	Líquido âmbar
Viscosidade, 20°C, g/cm ³	500 a 800	3.000 +/- 1000
Peso Específico, 20°C, g/cm ³	1,12 +/- 0,01	1,10 +/- 0,05
Peso epóxi equivalente (EEW)	195 – 215	

Tabela 5: Propriedades do sistema não curado

Proporção de mistura (Resina: Endurecedor)	100:23 partes em peso
Temperatura de manipulação (°C)	18 -30
Tempo de utilização da mistura 100g (gel time) a 25°C	15 a 20 min.
Tempo de endurecimento da mistura (100g, 20°C)	2 a 4 horas
Cura total a 20°C	48 a 72 horas

Neste trabalho foi utilizada uma proporção de mistura (Resina: Endurecedor) de 100:12 partes em peso, diferindo das informações do fabricante, com vistas à aumentar o tempo de trabalho para utilização da mistura.

A massa específica da resina curada foi determinada em laboratório calculando-se a média da massa e volume de três corpos-de-prova cilíndricos moldados (Figura 5) com a resina e o endurecedor na mesma proporção usada na preparação dos compósitos, onde obteve-se o valor médio igual a 1,15 g/cm³. Os valores utilizados para esses cálculos estão apresentados na tabela 6.

**Figura 5:** Corpos-de-prova para determinação da massa específica da resina.

Tabela 6: Valores para cálculo da massa específica da resina.

Corpo-de-prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)
1	29,53	14,44	9,89	11,30	1,14
2	29,45	14,40	9,81	11,25	1,15
3	29,41	14,43	9,80	11,31	1,15
Média	29,46	14,42	9,83	11,29	1,15

Para cálculo do volume e densidade (massa específica) dos corpos-de-prova

cilíndricos foram utilizadas as expressões: $v = \frac{\pi \times d^2}{4} \times h$ e $densidade = \frac{m}{v}$ onde:

v = volume do corpo cilíndrico

d = diâmetro do corpo cilíndrico

h = altura do corpo cilíndrico

m = massa em gramas

3.2 Caracterização das fibras de rami

A caracterização das fibras de rami foi realizada no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, da Universidade de São Paulo, seguindo procedimento adotado por Motta (2006).

3.2.1 Massa específica das fibras de rami

A massa específica das fibras foi determinada por picnometria. O equipamento utilizado foi um multipicnômetro da marca Quantachrome Instruments com gás hélio. As amostras foram previamente secas em estufa a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até constância de massa, em seguida foram resfriadas à temperatura ambiente em dessecador com sílica gel. Foram feitas cinco determinações.

3.2.2 Tração direta das fibras de rami

Os ensaios das fibras vegetais foram executados considerando aspectos importantes como os métodos de fixação dos corpos-de-prova. As garras que fixam as fibras não podem provocar concentração de tensões, e ao mesmo tempo não deixar o material deslocar (escorregar). O ensaio de tração das fibras seguiu as recomendações da ASTM D3822:2007. Os ensaios de tração foram feitos em uma máquina universal marca Instron, modelo 5569, célula de carga de 10 N. Para efeito de comparação de resultados foram feitos ensaios de tração nas fibras em outra máquina marca EMIC, modelo DL30000, célula de carga 1kN.

Para a determinação da resistência à tração, deformação na ruptura e módulo de elasticidade, as fibras foram coladas numa base de papel (Figura 6). Nesta base de papel foi recortada uma janela no centro onde foi colada a fibra. A fita de papel (gramatura 180 g/m²), previamente cortada, tinha as seguintes dimensões:

- base (mm): 65 x 25;
- janela recortada no centro da base (mm): 15 x 15;
- distância entre garras da máquina de ensaio (mm): 15;
- velocidade de ensaio (mm/min): 0,4;
- capacidade da célula de carga (N): 1000;
- número de corpos-de-prova: 40.

Uma vez posicionada a base de papel nas garras da máquina de ensaio, cortaram-se as laterais, ensaiando-se somente a fibra à tração. A distância entre as garras da máquina coincidiu com o comprimento útil do corpo-de-prova (fibra). A velocidade adotada nos ensaios depende do comprimento dos corpos-de-prova e ductilidade do material. Os valores aplicados foram determinados com base nas recomendações da ASTM D3822: 2007.

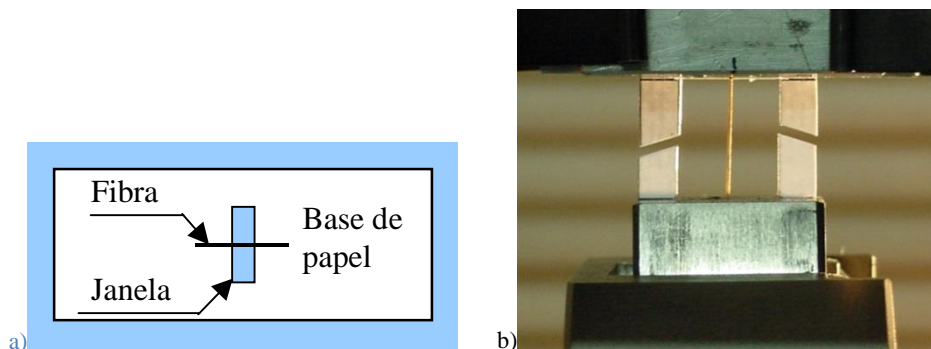


Figura 6: a) Corpo-de-prova usado para o ensaio de tração direta das fibras; b) Ensaio de tração em andamento.

A deformação das fibras foi determinada pela relação entre o alongamento medido e o comprimento livre inicial da fibra. O alongamento da fibra foi medido pelo afastamento das garras. Devido às reduzidas dimensões dos corpos-de-prova não foi possível a utilização de instrumentos de medida de deformação ou deslocamento como extensômetros elétricos ou LVDT. Utilizou-se um deflectômetro e verificou-se que a diferença entre o afastamento da garra e o real deslocamento não apresentou diferença significativa. O comprimento inicial das fibras de rami para efeito de cálculo de deformação foi igual a 15 mm (dimensão da janela da base de papel).

Segundo a norma ASTM D3822: 2007, quando o comprimento do corpo-de-prova diminui, a resistência à tração pode aumentar, pois tem probabilidade menor de ocorrência de defeitos da estrutura para a propagação das fissuras. Mas a precisão das propriedades determinadas pode diminuir, o que pode requerer um número maior de corpos-de-prova ensaiados. Isto é particularmente verdade para aquelas propriedades dependentes de medidas de alongamento, já que em comprimentos menores o efeito relativo de possíveis escorregamentos e acomodações nas garras é maior. Por esta razão foram ensaiados 40 (quarenta) corpos-de-prova (fibras).

A tensão imposta na fibra pela tração foi calculada pela expressão $\sigma = F/A$, onde F é a força aplicada e A é a área da seção transversal inicial da fibra. Optou-se por determinar a área transversal de cada corpo-de-prova (fibra) a ser ensaiado, pois a utilização da área média aumentaria a variabilidade dos resultados, especialmente para as fibras naturais, que apresentam considerável variação de dimensões. O módulo de elasticidade da fibra foi determinado pela inclinação do trecho inicial (elástico) da curva tensão x deformação obtida no ensaio de tração.

Um estudo da seção transversal das fibras foi feito previamente. As fibras foram alinhadas, impregnadas à vácuo com resina epóxi e polidas com pasta de diamante, para a obtenção de micrografias como as da Figura 7, em microscópio óptico.

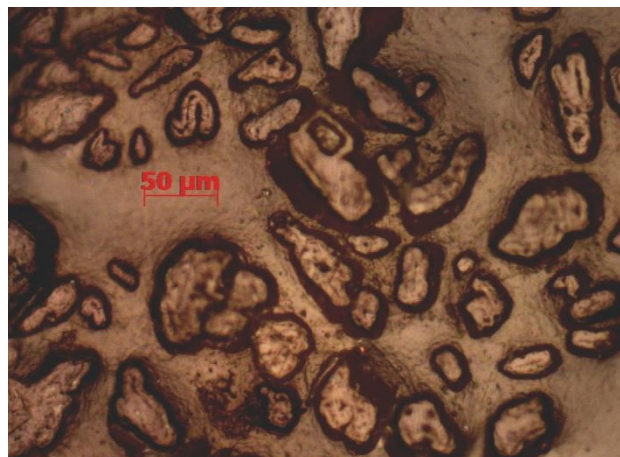


Figura 7: Seção transversal das fibras de rami

Como pode ser observado na Figura 7, as fibras não apresentam seção transversal perfeitamente circular. Desta forma, a área da seção transversal foi determinada considerando a seção da fibra com forma elíptica, utilizando-se duas dimensões da seção perpendiculares entre si. As duas dimensões transversais dos corpos-de-prova das fibras foram determinadas utilizando-se micrômetro para direção normal ao plano da base de papel e micrografias como a da Figura 8 para a outra direção. O micrômetro utilizado é da marca Mitutoyo, resolução de leitura de 0,001 mm e faixa de medida de 0 mm a 25 mm.

As micrografias das seções transversais das fibras e aquelas usadas para determinação das dimensões transversais dos corpos-de-prova foram obtidas em microscópio óptico, marca Zeiss, modelo Axioplan 2 Imaging. Uma câmara de alta resolução foi acoplada ao microscópio para a aquisição das imagens. As análises de imagem foram feitas utilizando o aplicativo Image-pro Plus versão 4.0.

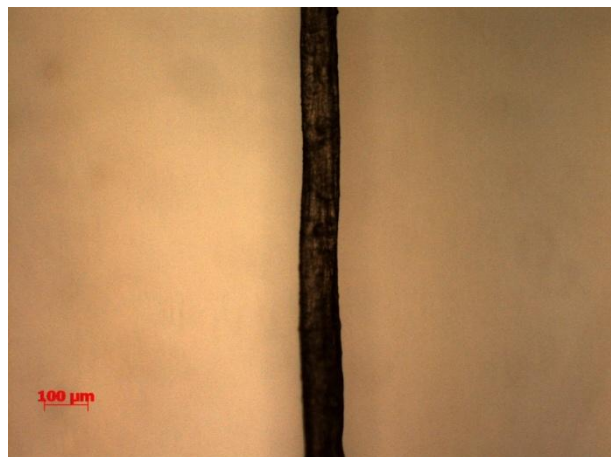


Figura 8: Micrografia para determinação da dimensão transversal do corpo-de-prova (fibra).

3.3 Produção e caracterização dos compósitos

3.3.1 Preparação do tecido com os fios de rami

O tecido com os fios foram preparados pelo Centro de Fiação e Tecelagem de Uberlândia, com urdidura com o fio de algodão e trama com o fio de rami, sendo utilizados fios de rami com diâmetro de 1 mm, e espaçamento entre os fios de 0,5 mm. A distância da urdidura de algodão era de aproximadamente 40 mm, conforme Figura 9.

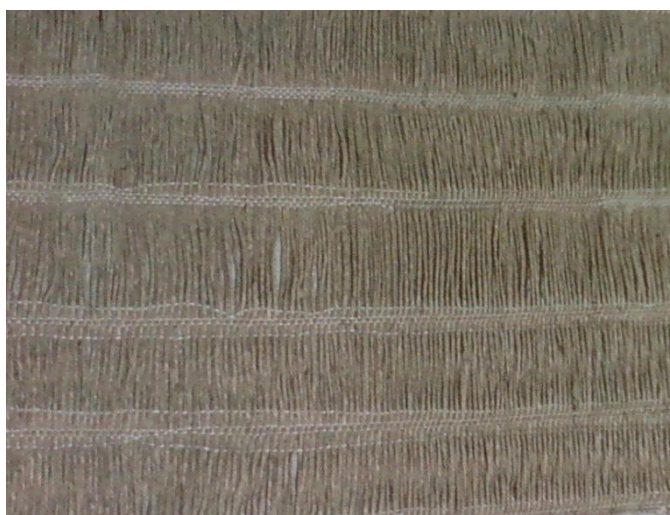


Figura 9: Tecido com fio de rami

3.3.2 Preparação das fibras de rami

Os feixes de fibra foram cortados com tesoura em tamanho aproximado ao necessário (21 cm), alinhados e secos em estufa a 60 °C por 24 horas. Logo após, foram conformadas na prensa hidráulica, aplicando-se uma carga de 400 KN por 24 horas (Figura 10).



Figura 10: Fibras preparadas para produção do compósito: a) antes da prensagem; b) após a prensagem.

3.3.3 Preparação e produção dos compósitos

Para a preparação dos compósitos foi utilizada uma forma metálica com dimensões internas de 21 cm x 21 cm x 2,5 cm, conforme Figura 11.

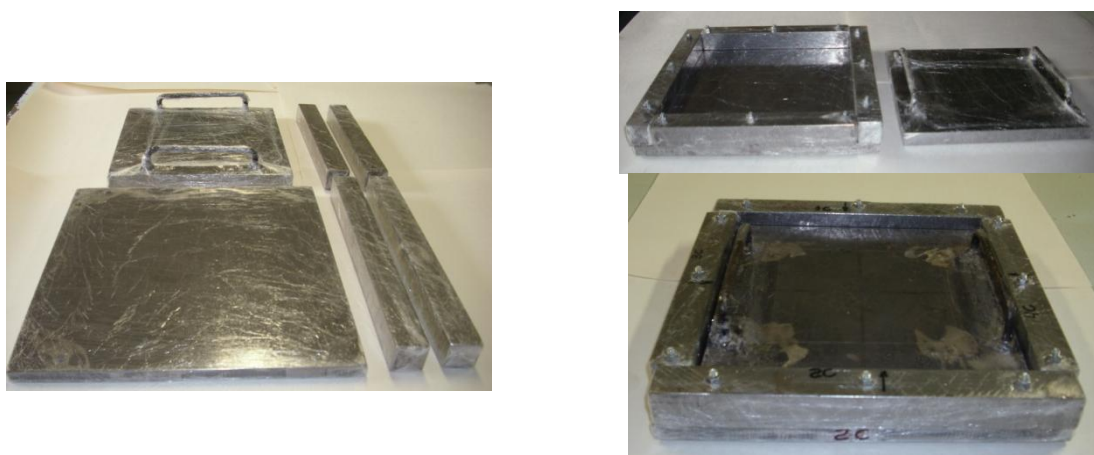


Figura 11: Forma metálica utilizada para a preparação dos compósitos.

O método de preparação dos compósitos foi a moldagem por compressão à frio. Os compósitos com fibras de rami foram preparados sobre a base da forma metálica com a aplicação de camadas alternadas de resina e fibras de rami alinhadas, fazendo-se o adensamento das fibras a cada colocação da camada de fibras, variando-se o número de camadas de acordo com o teor de fibras para cada compósito. O tempo de preparação do compósito variou de 10 min a 20 min, conforme o número de camadas de fibras.

Os compósitos com tecido do fio de rami foram preparados da mesma forma, alternando camadas de tecido e resina. Depois de preparados, a forma foi fechada com uma tampa metálica cujas dimensões são 20,8 cm x 20,8 cm x 1,6 cm.

Para produção dos compósitos, fixou-se a espessura do compósito em 0,3 cm. Calculou-se o volume da placa do compósito a ser produzido nas dimensões: 21 cm x 21 cm x 0,3 cm, obtendo-se o volume $V = 132,30 \text{ cm}^3$.

Em seguida, calculou-se a massa da fibra e a massa da resina para cada teor pretendido conforme tabela 7, considerando-se: massa específica da resina igual a $1,15 \text{ g/cm}^3$; massa específica da fibra igual a $1,59 \text{ g/cm}^3$;

Tabela 7: Massa da fibra e resina para cada compósito.

Tipo de Compósito	Teor de Fibras/Fio de Rami em volume (%)	Massa da fibra (g)	Massa da resina (g)
1	30	63,11	106,50
2	40	84,14	91,29
3	50	105,18	76,07
4	60	126,13	60,92

Logo após, foi realizada a primeira pesagem da fibra de rami (depois de preparada) e do tecido do fio de rami, secagem em estufa, e segunda pesagem, obtendo-se um teor de umidade para esta fibra de aproximadamente 10%, coerente com valores apresentados na literatura para as fibras vegetais (tabela 2-capítulo 2).

Para a produção de cada placa do compósito foi necessário usar uma massa de resina equivalente a três vezes a massa da fibra para garantir a molhabilidade, adensamento e impregnação (Figura 12).

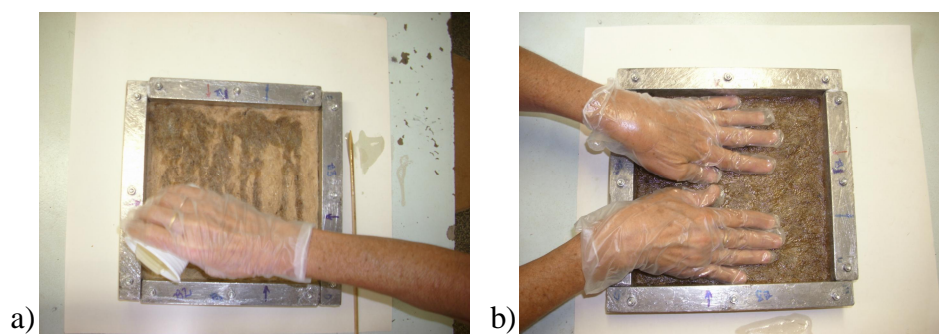


Figura 12: Produção dos compósitos: a) aplicação da resina; b) adensamento.

A forma metálica foi colocada em uma prensa hidráulica (Figura 13), marca EMIC, modelo PCN 100/20, capacidade 1200 kN. Foi aplicada uma carga que variou de 300 kN a 700 kN, conforme a tabela 8, para cada tipo de compósito, com o objetivo de eliminar o máximo de vazios, atingir o teor de fibras pretendido e, conseqüentemente, a espessura fixada em aproximadamente 0,3 cm, sendo o excesso de resina retirado com a aplicação da carga pela folga de 0,1 cm deixada entre a tampa e o molde metálico, tendo como parâmetro a espessura fixada (Figura 13).

Tabela 8: Carga aplicada na preparação dos compósitos conforme teor de fibras.

Tipo de Compósito	Teor de Fibras ou Fio de Rami em volume (%)	Carga aplicada na Prensa Hidráulica (kN)
1	30	300
2	40	500
3	50	600
4	60	700



Figura 13: Prensagem do compósito

O compósito permaneceu na prensa hidráulica sob o efeito da carga aplicada por 24 horas e a cura total no molde sem pressão em temperatura ambiente até completar 48 horas. Depois de desmoldado, retirado os excessos e lixado, foram conferidas as dimensões de cada placa do compósito e o teor de fibras conseguido.

Fez-se a pesagem de cada placa, obtendo-se assim, a massa da resina aproximada. Os valores obtidos para cada compósito estão apresentados na tabela 9 e na tabela 10.

Tabela 9: Propriedades dos compósitos de fibras de rami.

Compósito (Fibras)	Espessura (cm)	Volume (cm)	Massa compósito (g)	Massa fibra seca (g)	Massa resina (g)	Densidade (g/cm ³)	Teor de fibras final em volume (%)
1	0,293	129,10	166,50	65,15	101,35	1,29	31,74
2	0,288	127,24	169,85	85,00	84,85	1,33	42,01
3	0,298	131,40	180,30	105,47	74,83	1,37	50,48
4	0,297	130,98	185,64	126,53	59,11	1,42	60,76

Tabela 10: Propriedades do compósito tecido fio de rami.

Compósito (Tecido)	Espessura (cm)	Volume (cm)	Massa compósito (g)	Massa tecido seco (g)	Massa resina (g)	Densidade (g/cm ³)	Teor de fios final em volume (%)
1	0,257	113,34	156,22	93,50	62,72	1,38	51,88

As características do tecido fio de rami em comparação às fibras de rami tornaram a preparação do compósito com tecido mais fácil e prático do que com as fibras. Pelo fato de ser fabricado, o tecido dispensa a etapa da prensagem e conseqüentemente a necessidade de acomodação das fibras.

Na Figura 14 está apresentado um fluxograma que resume o procedimento de preparação dos compósitos.

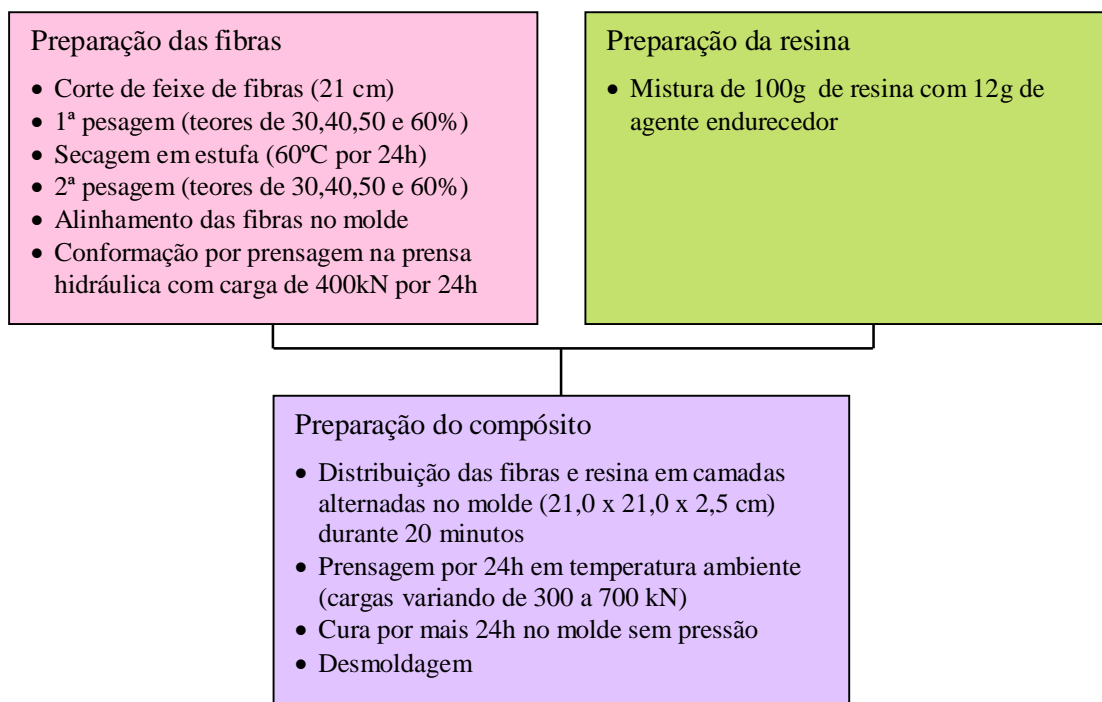


Figura 14: Fluxograma de produção dos compósitos

3.3.4 Preparação dos corpos-de-prova e ensaio de tração

Os corpos-de-prova foram posteriormente recortados nas placas produzidas para o ensaio de tração (Figura 15). O corte foi feito em uma máquina de corte de precisão com fresa, marca ROUTER. Foram preparados um total de 36 corpos-de-prova, sendo 6 de cada compósito: 0% de fibras, 30%, 40%, 50% (fibras), 50% (tecido) e 60% (fibras). O ensaio de tração e as propriedades mecânicas foram determinadas na direção das fibras de reforço do compósito, ou seja, o corte dos corpos-de-prova na placa foi feito para que o alinhamento das fibras de rami ou dos fios do tecido, coincidisse com a direção do eixo do corpo-de-prova.

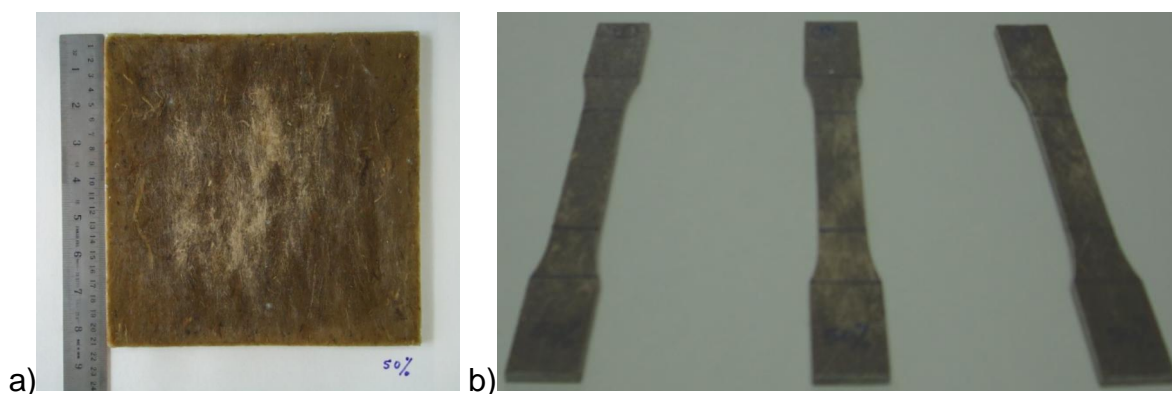


Figura 15: a) placa moldada; b) corpos-de-prova recortados.

A metodologia adotada para a execução do ensaio de tração foi a da norma americana ASTM D3039:2008, que estabelece procedimentos para a realização de ensaios de tração em materiais compósitos. A velocidade de deslocamento das garras da máquina de ensaio foi de 2 mm/min. O equipamento usado no ensaio de tração dos compósitos foi uma máquina universal de ensaios da marca MTS, modelo 810, célula de carga de 25 kN. Para medida do alongamento foi utilizado um extensômetro, marca MTS, com capacidade de alongamento máximo de 25 mm (Figura 16). As dimensões dos corpos-de-prova foram ajustadas em função das características dos compósitos produzidos, observando-se as recomendações da ASTM D638:2010, sendo as dimensões conforme a Figura 17.



Figura 16: Ensaio de tração dos compósitos.

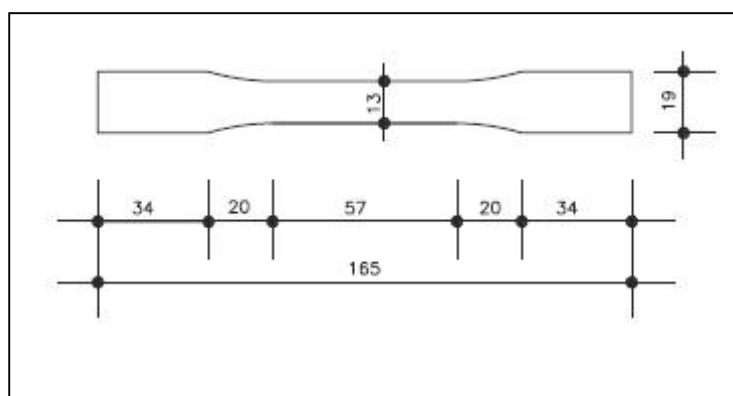


Figura 17: Dimensões dos corpos-de-prova dos compósitos (mm).

No ensaio de tração foram determinadas as seguintes propriedades:

- módulo de elasticidade longitudinal;
- limite de resistência à tração longitudinal;
- limite de deformação à tração longitudinal.

4 RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das fibras de rami

A massa específica média das fibras de rami, obtida por picnometria com gás hélio, foi de $1,59 \text{ g/cm}^3$.

Apresenta-se na Figura 18 o gráfico com a curva Tensão x Deformação típica obtida dos ensaios de tração direta das fibras de rami estudadas. Pode ser observado que as fibras de rami apresentam diagrama tensão-deformação típico de polímeros semicristalinos frágeis, rompendo-se enquanto se deformam elasticamente (CALLISTER, 2002).

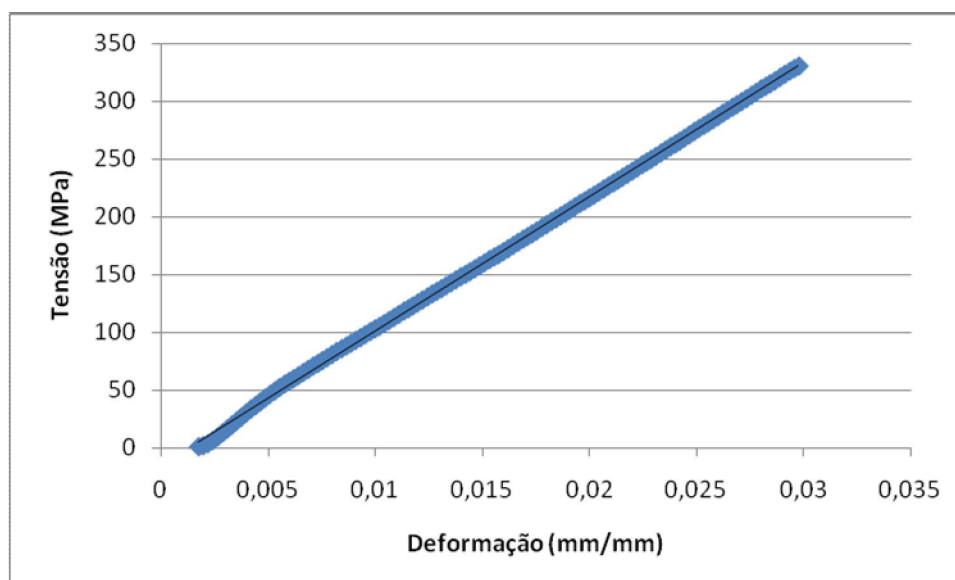


Figura 18: Diagrama TensãoxDeformação típico obtido no ensaio de tração das fibras de rami

Na Tabela 12 estão apresentados as propriedades mecânicas das fibras de rami obtidas nos ensaios de tração. Nota-se que o módulo de elasticidade e a resistência à tração obtidos encontram-se muito abaixo daqueles mencionados na literatura. Ressalta-se que estes ensaios foram refeitos em duas máquinas de ensaios diferentes, onde os resultados não se diferiram muito.

Considerando os resultados obtidos para o módulo de elasticidade dos compósitos com fibras de rami (apresentados no item 4.2) e a expressão da eq 1

(Lei das Misturas), o módulo de elasticidade das fibras de reforço deveriam ser acima de 30 GPa.

$$E_{comp} = E_{matriz} \times V_{matriz} + E_{fibra} \times V_{fibra} \quad \text{eq.1}$$

Onde: E_{comp} = módulo de elasticidade do composto

E_{matriz} = módulo de elasticidade da matriz

V_{matriz} = volume da matriz

E_{fibra} = módulo de elasticidade da fibra

V_{fibra} = volume de fibras

Tabela 11: Resultados obtidos para as propriedades mecânicas à tração das fibras de rami

	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação Máxima (%)	Resistência à tração (MPa)
Média	14,25	2,52	241,87
Desvio Padrão	3,04	0,88	69,02

Esta inconsistência nos resultados obtidos poderia ser atribuída à imprecisão na medida do alongamento da fibra no ensaio de tração. Como a medida do alongamento nos ensaios de tração dos compósitos utilizando o extensômetro é muito mais precisa do que o alongamento medido das fibras pelo afastamento entre as garras, pondera-se que o módulo de elasticidade das fibras de rami estimado pela eq.1 estaria mais próximo do módulo real das fibras.

No entanto, a metodologia adotada no ensaio das fibras neste trabalho foi proposta e adotada por Motta (2006) para caracterização de várias fibras vegetais e sintéticas, onde os resultados obtidos foram totalmente coerentes com aqueles já disponíveis na literatura. Considerando que a resistência à tração das fibras de rami obtida foi também abaixo dos valores encontrados na literatura, o problema não é somente na forma de medida do alongamento. Observando o comportamento das fibras durante o ensaio e as seções rompidas (Figura 19a), notou-se que muitas

fibras desfibrilavam durante o ensaio. Isto causou então uma redução da seção resistente considerada inicialmente e também maior deformação durante o ensaio, fato não observado por Motta (2006) nas fibras vegetais de sisal, bagaço de cana de açúcar e coco ensaiadas. Apesar destas, outras fibras mantinham-se sem desfibrilamento, como mostra a Figura 19b.

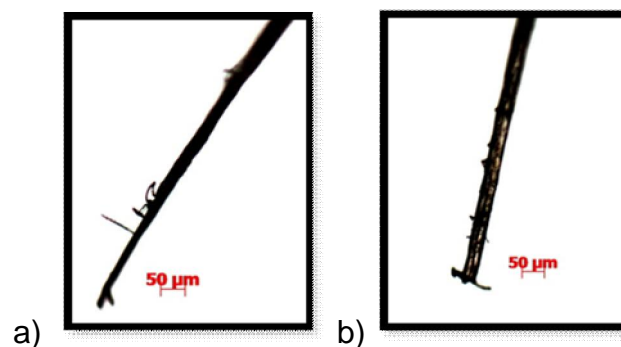


Figura 19: Micrografias da seção rompida das fibras de rami: a) seção com desfibrilamento na ruptura; b) seção sem desfibrilamento na ruptura.

Uma alternativa para evitar ou minimizar o desfibrilamento da fibra durante o ensaio seria utilizar comprimento menor, testes que serão feitos em etapas seguintes da pesquisa.

4.2 Caracterização mecânica dos compósitos

Para a caracterização mecânica dos compósitos, os corpos-de-prova foram ensaiados e conseqüentemente rompidos, conforme mostrado na Figura 20.

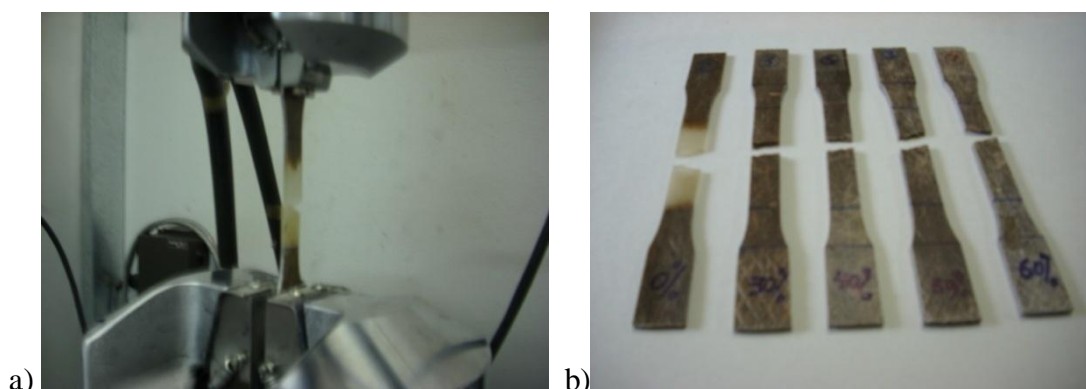


Figura 20: a) Ensaio dos corpos-de-prova; b) Corpos-de-prova rompidos.

Observando-se macroscopicamente a ruptura nos corpos-de-prova, percebe-se homogeneidade na interface fibra-matriz, sem arrancamento das fibras, o que leva a pensar que houve grande aderência entre fibras e resina, com boa eliminação dos vazios.

Os resultados obtidos do ensaio de tração dos compósitos produzidos de matriz epóxi reforçada com fibras de rami finas alinhadas unidirecionalmente, estão apresentados na tabela 12, onde estão descritos os valores médios com respectivos desvios padrões para o módulo de elasticidade, deformação máxima na ruptura e resistência à tração.

Tabela 12: Resultados nos compósitos com fibra de rami em diferentes teores.

Compósitos com fibras	Módulo de Elasticidade (GPa)		Deformação Máxima (%)		Resistência à tração (MPa)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0%	3,1	0,1	0,8	0,3	23,2	3,2
30%	9,7	1,1	4,3	1,8	91,3	14,5
40%	13,7	2,5	3,1	0,3	138,4	12,2
50%	17,1	0,8	2,1	0,3	139,4	15,0
60%	20,2	3,2	1,7	0,4	139,2	15,1

Os gráficos da Figura 21 ilustram mais claramente a evolução das propriedades mecânicas à tração dos compósitos com a variação do teor em volume de fibras alinhadas de rami.

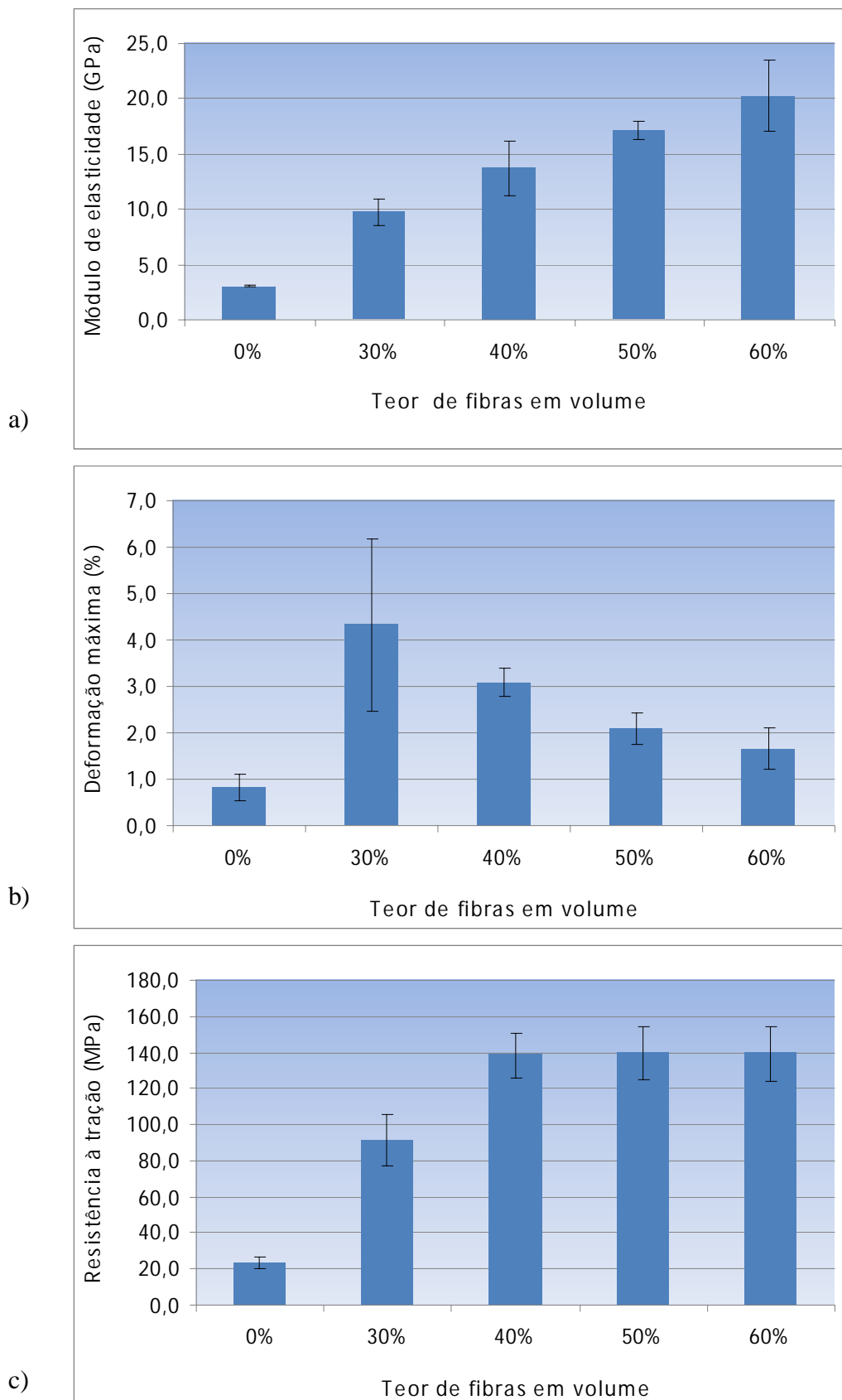


Figura 21: Propriedades mecânicas dos compósitos com 0%, 30%, 40%, 50% e 60% em volume de fibras de rami: a) módulo de elasticidade; b) deformação máxima; c) resistência à tração.

Observa-se pelos dados da tabela 12 e Figura 21, como esperado, que o módulo de elasticidade dos compósitos com fibras de rami alinhadas aumenta significativamente e a deformação máxima diminui com a fração volumétrica de fibras. A resistência à tração aumenta do teor 0% até 40%, estabilizando-se a partir deste até 60% em volume de fibras.

Observou-se para o compósito com 60% de fibras, módulo de elasticidade de 20 GPa, deformação máxima de 1,7% e resistência à tração de 139,4 MPa. As fibras finas de rami reforçaram a matriz epóxi, ou seja, houve aumento tanto na resistência à tração quanto na rigidez com a incorporação das mesmas. O aumento na resistência à tração atingiu 500% e no módulo de elasticidade 552%, com a incorporação de 60% em volume de fibras alinhadas, comparado à matriz sem reforço.

A deformação máxima na ruptura, com a incorporação das fibras aumentou em relação à matriz sem fibras, o que era esperado, considerando a natureza frágil da matriz. No entanto, à medida que o teor de fibras aumenta, a deformação máxima diminui e o módulo de elasticidade aumenta, comprovando homogeneidade do compósito e boa interação entre matriz e fibras, mesmo para elevados teores de reforço. Em outros trabalhos consultados (BRAVO NETO, J. *et al.*, 2010), a deformação aumenta e o módulo permanece estatisticamente constante com o crescimento do teor de fibras, demonstrando problemas de preparação dos compósitos, onde com o acréscimo no teor de fibras o compósito fica com mais vazios e a interação entre fibra e matriz é prejudicada.

Na tabela 13 são apresentados os valores médios com respectivos desvios padrões para o módulo de elasticidade, deformação máxima na ruptura e resistência à tração da matriz e compósitos com 50% em volume de fibras de rami e tecido com o fio de rami.

Tabela 13: Resultados nos compósitos com 50% fibra de rami e 50% tecido fio de rami.

Compósitos com fibras e tecidos	Módulo de Elasticidade (GPa)		Deformação Máxima (%)		Resistência à tração (MPa)	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0%	3,1	0,1	0,8	0,3	23,2	3,2
50% fibra	17,1	0,8	2,1	0,3	139,4	15,0
50% tecido	23,7	2,6	1,3	0,3	126,3	33,4

Quando comparados compósitos com fibras de rami e compósitos com tecido do fio de rami para a mesma fração de reforço de 50% em volume, observou-se que o módulo de elasticidade aumentou, a resistência à tração permaneceu praticamente a mesma e a deformação máxima diminuiu, para o compósito com tecido (Tabela 13).

Nos gráficos da Figura 22 fica visível a variação das propriedades mecânicas à tração dos compósitos com a variação do tipo de reforço, mantendo o mesmo teor em volume. Considerando o desvio padrão da resistência à tração do compósito com o tecido de rami, pode-se dizer que as resistências são estatisticamente iguais para os dois compósitos (fibra e tecido). Portanto, se a deformação máxima do compósito com tecido diminuiu, o módulo realmente deveria aumentar.

As melhores propriedades do compósito com tecido fio de rami em comparação ao compósito com fibras de rami observadas neste trabalho, podem ser explicadas pelo fato de que o tecido fabricado garante uma distribuição homogênea e um melhor alinhamento dos fios no compósito, enquanto com as fibras de rami não foi possível garantir a perfeita homogeneidade na distribuição e alinhamento das fibras quando preparadas, uma vez que estas foram adquiridas em feixes como mostrado na Figura 4 (Capítulo 3). Além disso, não houve nenhum tipo de seleção de fibras com relação ao comprimento ou diâmetro, o que não aconteceu com o tecido fio de rami, que já possuía diâmetro praticamente constante, distribuição também uniforme, contribuindo para melhor desempenho do compósito.

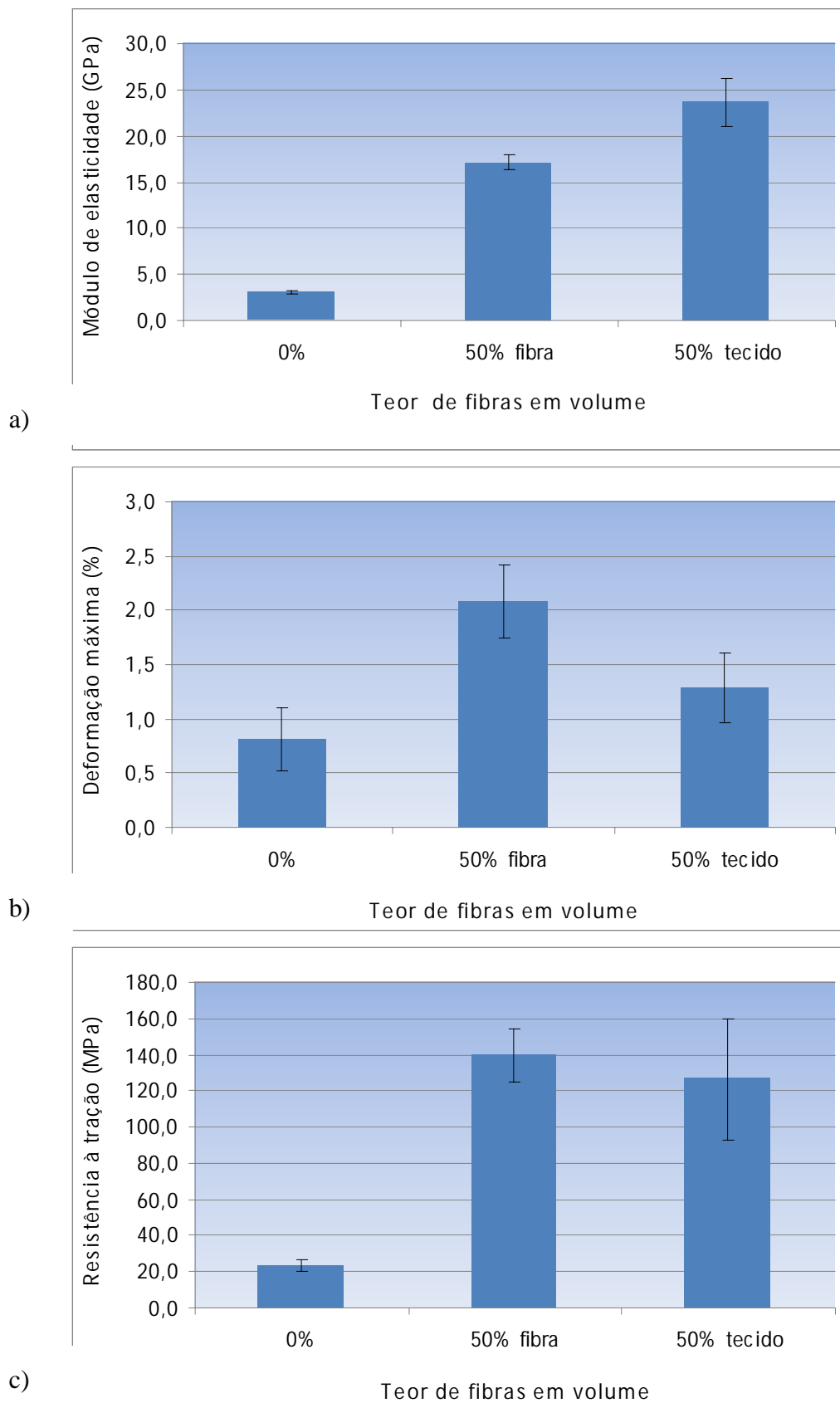


Figura 22: Propriedades mecânicas dos compósitos com 50% em volume de fibras de rami e 50% em volume de tecido com o fio de rami: a) módulo de elasticidade; b) deformação máxima; c) resistência à tração.

Os resultados obtidos nos ensaios de tração neste trabalho, tanto para os compósitos de matriz epóxi reforçada com diferentes teores em volume de fibras finas e alinhadas de rami, quanto para os compósitos de matriz epóxi reforçada com 50% de tecido com fio em uma única direção, quando comparados aos resultados de trabalhos similares na literatura revelaram melhor desempenho.

Segundo Bravo Neto et al (2010), em estudo analisando-se o comportamento em tração de compósitos de matriz poliéster reforçados com fibras finas alinhadas de rami, para o compósito reforçado com 30% de fibras, obteve-se módulo de elasticidade de 2,79 GPa e tensão máxima de 67,30 MPa. No presente trabalho para o compósito matriz epóxi reforçado com 30% de fibras, os valores obtidos foram de 9,7 GPa (módulo de elasticidade) e 91,30 MPa (resistência à tração ou tensão máxima).

Em outro estudo de compósitos de matriz poliéster e tecido híbrido de rami e algodão (PAIVA JR. *et al.*, 2004), verificou-se que o compósito com 45% de fios de rami e 12% de fios de algodão, totalizando 57% de fios no compósito foi o que apresentou maior resistência à tração (118 MPa), valor inferior ao obtido neste trabalho para os compósitos com 50% de fibras de rami (139,4 MPa) ou 50% tecido de fio de rami (126,3 MPa).

É importante notar que as propriedades obtidas neste trabalho para a resina epóxi estão próximas de valores mencionados na literatura. Segundo Pardini e Levy Neto (2006), a resistência à tração de sistemas epóxi curados variam de 40 MPa a 90 MPa, enquanto o módulo de elasticidade varia de 2,5 GPa a 6,0 GPa, com a deformação de ruptura variando na faixa de 1% a 6%.

Os diagramas tensão x deformação típicos obtidos no ensaio de tração da matriz epóxi e dos diferentes compósitos estão apresentados na Figura 23. Nesta figura é possível visualizar também a variação do desempenho mecânico dos compósitos. Ou seja, analisando-se a resistência à tração e deformação, observou-se que o compósito com 60% de fibras foi o que obteve o melhor desempenho para o limite de resistência à tração (139,2 MPa) e menor deformação (1,7%), mostrando que houve boa aderência das fibras à matriz, impedindo o arrancamento das fibras da matriz epóxi. Para os compósitos com 40% e 50% de fibras o valor da resistência à

tração foram bem próximos ao de 60% de fibras (138,4 MPa e 139,4 MPa, respectivamente), logo a resistência à tração parece tender a se estabilizar a partir do acréscimo de 40% de fibras no compósito enquanto a deformação parece diminuir com o aumento da fração de fibras (Figura 23).

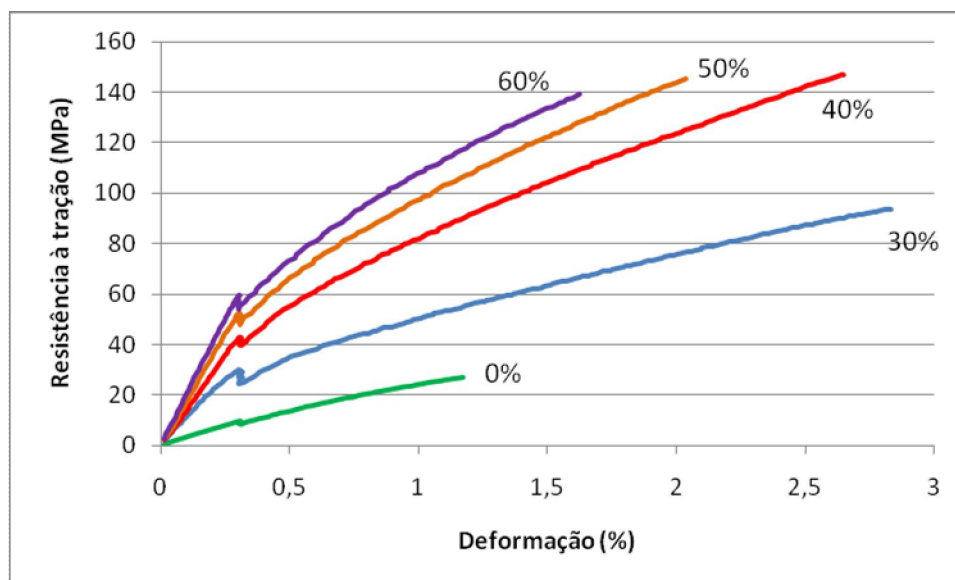


Figura 23: Diagramas tensão x deformação típicos obtidos para a matriz e diferentes compósitos.

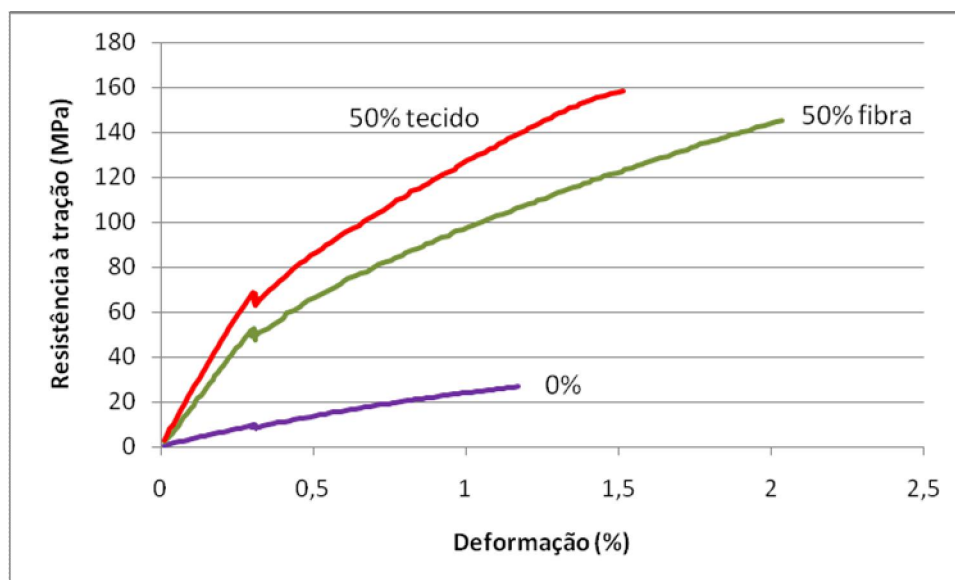


Figura 24: Diagramas tensão x deformação típicos obtidos para a matriz e os compósitos com 50% tecido fio de rami e 50% de fibras.

Ao se comparar o compósito com 50% tecido fio de rami ao compósito com 50% de fibras, verificou-se que o compósito com 50% tecido fio de rami foi o que apresentou menor deformação (1,3% x 2,1%) e conseqüentemente maior módulo de

elasticidade, com comportamento promissor para uso como reforço estrutural (Figura 24).

Souza e Cunha (2011) analisaram teórica e numericamente o comportamento mecânico de compostos epóxi/fibras de rami para uso como reforço estrutural, através do Método dos Elementos Finitos e modelo micromecânico. Os autores concluíram que os compósitos com 70% de fibra de rami teriam um módulo de elasticidade de 30 GPa (Método dos Elementos Finitos) e 36 GPa (modelo micromecânico). Os autores verificaram que, com este módulo, os compósitos são viáveis para uso como reforço de vigas de concreto armado.

Analisando-se o módulo de elasticidade obtido no ensaio de tração para os compósitos de matriz epóxi com 60% de fibras de rami, aproximadamente 20 GPa, e para o compósito com 50% de tecido fio de rami, aproximadamente 24 GPa, observa-se que pode-se conseguir um módulo de elasticidade para um compósito com 70% de tecido fio de rami ou fibras próximo ao determinado pela modelagem numérica, viabilizando o uso destes compósitos como reforço estrutural.

Os valores médios encontrados na literatura para as propriedades elásticas, de resistência e físicas para os compósitos de matriz epóxi com fibra de vidro e compósitos de matriz epóxi com fibras de carbono, com volume de 60% de fibras em camadas unidirecionais, foram respectivamente, para o módulo de elasticidade 55 GPa e 150 GPa, para a resistência à tração, 1500 MPa e 2300 MPa, e para a densidade, $1,99 \text{ g/cm}^3$ e $1,58 \text{ g/cm}^3$.

Para o compósito matriz epóxi com 60% de fibras de rami alinhadas unidirecionalmente encontrou-se o valor de $1,42 \text{ g/cm}^3$ para a densidade, mostrando que esse compósito é mais leve que os convencionais, sendo esta uma de suas vantagens.

No trabalho desenvolvido por Souza e Cunha (2011), após obtenção do módulo de elasticidade do compósito foi feito a modelagem numérica para análise das diversas possibilidades de distribuição do reforço em uma viga de concreto armado com características pré-determinadas. Para análise do desempenho do compósito foram aplicadas cargas verticais na estrutura reforçada com polímeros reforçados com fibra vegetal (PRFVeg), o qual sofreu variações na espessura. Os resultados

obtidos foram comparados com os da viga sem reforço e com os da viga reforçada com polímeros reforçados com carbono (PRFC) e mostraram que a aplicação do PRFVeg apresenta bom desempenho como reforço estrutural, no combate à flexão (momento fletor) e no combate ao esforço cortante em vigas de concreto armado, mesmo que numa magnitude inferior quando comparados com o PRFC. Ainda neste mesmo estudo, verificou-se que, com o incremento da espessura do reforço, o desempenho do compósito também é crescente, ou seja, quanto maior a espessura do PRFveg, maior é a sua eficiência no combate às tensões atuantes.

Os resultados dos ensaios experimentais realizados nesta pesquisa, analisando-se os compósitos de matriz epóxi reforçada com fibras de rami mostraram-se coerentes com os dados obtidos teoricamente com o trabalho de Souza e Cunha (2011). Assim, com base nos resultados obtidos via modelagem numérica da viga reforçada com o PRFVeg, pode-se concluir que o compósito de matriz epóxi reforçada com fibras de rami tem aplicação promissora. Vale ressaltar que para a produção deste compósito, com este desempenho, foi necessário a aplicação de carga na prensa hidráulica não inferior a 300 kN, o que leva a pensar em um material que deverá ser industrializado para posterior aplicação como reforço em estruturas de concreto armado.

Observa-se que uma das principais aplicações dos materiais compósitos na construção civil é o reforço de estruturas de concreto armado utilizando PRFC (polímero reforçado com fibra de carbono), que aumentam a capacidade de carga das peças reforçadas. No entanto, devido ao elevado custo da fibra de carbono, pesquisadores do mundo inteiro tem buscado alternativas mais econômicas e que apresentem vantagens ambientais. Os polímeros reforçados por fibras vegetais são então, uma alternativa viável, não com o objetivo de substituir os reforços com fibras de carbono, já consagrados no mercado e que vêm sendo utilizados há muito tempo com eficiência e sucesso, mas como outra opção de reforço em polímeros, a ser estudada, analisada e aplicada.

5 CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

- O procedimento para a preparação dos compósitos matriz epóxi reforçado com fibras/fios de rami alinhadas em uma única direção mostrou-se adequado para obtenção de um compósito viável para uso como reforço estrutural.
- As fibras/fios de rami alinhadas em uma única direção possuem grande potencial como reforço em compósito de matriz epóxi;
- As propriedades mecânicas encontradas para as fibras foram muito abaixo das registradas na literatura. Esta inconsistência poderia ser atribuída à imprecisão na medida do alongamento da fibra e ao desfibrilamento durante o ensaio de tração;
- Os maiores valores de módulo de elasticidade e o menor valor de deformação máxima obtidos foram determinados pelo maior volume de fibras/fios de rami alinhadas com a direção do teste de tração;
- Compósitos com 60% de fibras apresentaram um aumento de 52% na resistência à tração e um aumento de 108% no módulo de elasticidade quando comparados com compósitos com 30% de reforço e um incremento de 500% quando comparado com o compósito com 0% de fibras;
- O compósito matriz epóxi com tecido fio de rami apresentou um aumento no módulo de elasticidade de 665% quando comparado com o compósito com 0% de fibras, sendo, portanto, o compósito com melhor desempenho obtido neste trabalho;
- Os compósitos produzidos com tecidos fios de rami quando comparados com compósitos produzidos com fibras para a mesma fração em volume, apresentaram melhor desempenho mecânico em relação ao módulo de elasticidade;

- Os compósitos matriz epóxi com 60% de fibras rami e 50% tecido fio de rami apresentaram resultados de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação, promissores para investigações futuras como reforço estrutural.
- Os polímeros reforçados por fibras de rami são uma alternativa promissora, não como substituta dos polímeros reforçados com fibras de carbono, mas como outra opção de reforço em polímeros, a ser estudada, analisada e aplicada.
- Os tecidos produzidos com fios de rami e urdidura de algodão apresentaram melhor desempenho que os tecidos com urdidura de rami, devido ao fato da espessura do fio de algodão ser inferior ao do rami, permitindo a execução de tecidos mais finos, que facilitaram a preparação dos compósitos em camadas e a obtenção de pequenas espessuras.

5.2 Propostas para trabalhos futuros

Os resultados encontrados neste trabalho somados aos dos estudos realizados até o momento, que incidem fundamentalmente no comportamento mecânico, deixam claro que há várias questões relacionadas aos materiais compósitos reforçados com fibras vegetais que necessitam ainda ser investigadas. Com base nisto, sugere-se estudos futuros com vista à utilização de compósitos matriz epóxi e fibras vegetais como reforço estrutural, tais como:

- Produção de compósitos matriz epóxi com tecido fibra de vidro ou tecido fibra de carbono nas mesmas condições e materiais para comparar o desempenho mecânico com o encontrado para os compósitos matriz epóxi com tecido fio de rami;
- Verificação do limite de fração de fibra/fio de rami (até que volume de fibra seria viável) para produção de um compósito com propriedades mecânicas compatíveis para aplicação na construção civil;
- Investigação da aplicação do material compósito produzido como reforço em vigas, lajes, pilares e outras estruturas de concreto armado e também em

estruturas de madeira e alvenaria estrutural, com aplicação de cargas monotônicas até o colapso, verificando a resistência do compósito;

- Análise de micrografias no microscópio eletrônico de varredura (MEV) dos compósitos rompidos, para verificar a interface fibra – matriz da ruptura do compósito;
- Estudos da viabilidade de utilização dos compósitos de matriz epóxi reforçados com fibras vegetais em virtude da sua durabilidade;
- Investigações sobre os métodos de controle de qualidade, nas diversas etapas de preparação do compósito, que possam minimizar a dispersão das propriedades das fibras, seja seu uso na forma natural ou em tecido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: Informação e documentação – trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for tensile properties of single textile fibers** – ASTM D3822. Philadelphia, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials** – ASTM D3039. Philadelphia, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Standard test method for tensile properties of plastics** – ASTM D638. Philadelphia, 2010.

AGOPYAN, Vahan. **Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais**. 204p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1991.

AGOPYAN, Vahan; SAVASTANO JR., Holmer. Fibras Vegetais na Construção Civil. Experiência Brasileira. **Téchne. Revista de Tecnologia da Construção**. São Paulo, v.5, n.32, p.38-43, 1998.

AGOPYAN, Vahan; SAVASTANO JR., Holmer. Fibras Vegetais como Material de Construção. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. p.1539-1558.

ANGELINI, L.G. *et al.* Ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gaud.) and Spanish Broom (*Spartium junceum* L.) fibres for composite materials: agronomical aspects, morphology and mechanical properties. **Industrial Crops and Products**, Itália, v.11, p.145-161, 2000.

AZUMA, J. *et al.* Lignin-carbohydrate complexes containing phenolic acids isolated from the culm of bamboo. **Agricola Biology Chemical**. [S.l.], v. 49, p. 2661-2669, 1985.

BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J. Composite Reinforced with Celulose Based Fibers. **Prog. Polymer Science**, Elsevier: Oxford, v.24, p.200-272, 1999.

BENATTI JR., Romeu. **Rami: Planta Têxtil e Forrageira**. 1ª ed.: São Paulo. Ed. Nobel, 1988.

BNDES. **Rami, uma cultura em extinção**. Rio de Janeiro, 1996. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/publicacoes/consulta_expressa> Acesso em: 28 dez. 2011.

BRAVO NETO, J. *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas de fibras de rami, utilizando análise de Weibull. In : **19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Campos do Jordão/SP, 21 a 25 de novembro de 2010.

CALLISTER Jr., W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 5ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CARVALHO, Ricardo Fernandes. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforço de estruturas de Madeira**. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

COUTTS, R.S.P. Wood fibre reinforced cement composites. **Concrete and Technology and Design**. Glasgow: Blackie, n.5, p.1-62, 1988.

DENCE, C. W.; REEVE, D.W. **Pulping bleaching: Principles and Praticce**. Atlanta: Tappi, 1996.

ELLIS, B. Introduction to the chemistry, synthesis, manufacture and characterization of epoxy resins. In: ELLIS, B. (Ed.), **Chemistry and technology of epoxy resins**. Glasgow: Blakie Academic, p. 1-35, 1993.

FREIRE, E. *et al.* Propriedades Mecânicas de Compósitos de Polipropileno com Fibra de Vidro. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos/SP, Jul/Set, p.25-32, 1994.

GINDL, W. *et al.* Structure and properties of a pulp fibre-reinforced composite with regenerated cellulose matrix. **Applied Physics A- Materials Science & Processing**, Áustria, v. 83, p. 19-22, 2006.

GODA, K. *et al.* Improvement of plant based natural fibers for toughening green composites – effect of load application during mercerization of ramie fibers. **Composites**. Part A, Japão, n.37, p.2213-2220, 2006.

GONÇALVES, Jorge Antônio Vieira. **Compósitos à base de resina epóxi reforçados com fibra de coco**. 60p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2010.

KLEBA, I.; ZABOLD, J. Poliuretano com fibras naturais ganha espaço na indústria automotiva. **Revista Plástico Industrial**, São Paulo, n.75, p. 88-99, nov. 2004.

KOZLOWSKI, R.; WLADYKA-PRZYBYLAK, M. **Recent developments in composites from natural fibers and polymers** , 2003.

LEVY NETO, Flaminio; PARDINI, Luiz Claudio. **Compósitos Estruturais. Ciência e Tecnologia**. 1ª ed.: São Paulo. Ed. Edgard Blücher, 2006.

LEWIN, M.; GOLDENSTEIN, I. Wood structure and composition. **International fiber science and technology series**. USA: Marcel Dekker, v.11, 1991.

LI, X. *et al.* Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review. **Journal of Polymers and the Environment**, [S.l.], v. 33, p. 15-25, 2007.

LODHA, Preeti; NETRAVALI, Anil N. Characterization of stearic acid modified soy protein isolate resin and ramie fiber reinforced “green” composites. **Composites Science and Technology**, [S.l.], v. 65, p. 1211-1225, 2005.

LUCATO, D. Contribuição ao projeto e validação do trem de pouso, tipo Wittman, em lâmina ortotrópica transversa de material compósito vidro e epóxi, para aeronaves enquadradas no F.A.R. PART-23. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Brasil. 1991.

MANO, E.B; MENDES, L.C. **Introdução à Polímeros**. 2ed. Revista e Ampliada. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.

MARINELLI, A.L. *et al.* Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras Vegetais Naturais da Biodiversidade : Uma Contribuição para a Sustentabilidade Amazônica. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos/SP, v.18, n.2, p.92-99, 2008.

MATTOSO, L.H.C.; FRAGALLE, E.P. Uso de fibras vegetais na indústria automobilística: necessidade ecológica, oportunidade para o Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos/SP, jan/mar, 1996.

MAZALI, C.A.I. **Compósitos de resina éster vinílicas e aditivos a base de sílica**. 71p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2003.

MOTTA, Leila A. de Castro. **Melhoria do desempenho de fibras de coco e sisal para reforço de matrizes cimentícias através de tratamento termomecânico e impregnação de resinas**. 133p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

MUNAWAR, S.S. *et al.* Characterization of the morphological, physical, and mechanical properties of seven nonwood plant fiber bundles. **Journal Wood Science**. Japão, v.53, p.108-113, 2007.

MUNAWAR, S.S. *et al.* Manufacture of oriented board using mild steam of plant fiber bundles. **Journal Wood Science**. Japão, v.54, p.369-376, 2008.

NOGUEIRA, C. L. *et al.* Processo de obtenção de pré-impregnados poliméricos termoplásticos via moldagem por compressão a quente. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos/SP, v.9, p.18-27, 1999.

PAIVA JR., C. Z. *et al.* Analysis of tensile strength of polyester/hybrid ramie-cotton fabric composites. **Polymer Testing**, [S.l.], v.23, p.131-135, 2004.

REDDY, N.; YANG, Y. Biofibers from agricultural byproducts for applications. **Trends in Biotechnology**, [S.l.], v.23, n.1, p. 22-27, jan. 2005.

REZENDE, M. C.; BOTELHO, E. C. O uso de compósitos estruturais na indústria aeroespacial. **Polímeros**, [S.l.], v.10, n.2, p. 4-10, 2000.

ROWELL, R.M. Agro-fiber based composites : exploring the limits. In: **Proceedings of the 18th Riso Internacional Symposium on Materials Science: Polymeric Composites – Expanding the Limits**. Dinamarca. 1997.

SABARIZ, A. *et al.* Propriedades mecânicas de compósitos formados por matriz epoxídica reforçada com fibras vegetais. In: **17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Foz do Iguaçu/PR, 15 a 19 de novembro de 2006.

SAVASTANO JR, H. **Materiais à base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo**. 144p. Tese (Livre-Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

SAVASTANO JR, H. *et al.* Seleção de resíduos de alguns tipos de fibra vegetal, para reforço de componentes de construção. In: **I Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**. Canela/RS, 18 a 21 de novembro de 1997.

SAVASTANO JR, H. *et al.* Identificação e caracterização de resíduos agroindustriais, para uso na construção civil. In: **VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído: Qualidade no Processo Construtivo**. Florianópolis/SC, 27 a 30 de abril de 1998.

SILVA, A.M. *et al.* **Guia para normalização de trabalhos técnico-científicos: projetos de pesquisa, trabalhos acadêmicos, dissertações e teses**. 5 ed., Uberlândia: EDUFU, 2008.

SILVA FILHO, L.C.P. da; GARCEZ, M.R. Compósitos de Engenharia de Matriz Polimérica. In: ISAIA, G.C. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. p.1423-1464.

SINGH, D. P. *Ramie (Boehmeria nivea)*, Central Research Institute for Jute and Allied Fibres, Kolkata, 1996.

SOUZA, Camila Rodrigues de; CUNHA, Jesiel. Análise teórica e numérica do comportamento mecânico de compostos epóxi/fibras vegetais, visando reforço estrutural. **Revista Horizonte Científico**, [S.l.], v.5, n.2, 2011.

SUIZU, N. *et al.* Tensile and impact properties of fully green composites reinforced with mercerized ramie fibers. **Journal Materials Science**, [S.l.], v. 44, p. 2477-2482, 2009.

SWAMY, R.N. Fibre reinforcement of cement and concrete. **Materials and Structures**, [S.l.], v.8, n.45, p.235-254, 1975.

TITO, V. **Análise dinâmica teórica e experimental de vigas fabricadas a partir de materiais compósitos poliméricos reforçados**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos. Brasil. 1999.

TOLÊDO FILHO, R.D. *et al.* Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. **Cement & Concrete Composites**. [S.l.], v.22, p.127-143, 2000.

VIEIRA, Cristiane Aurélia Borges. **Avaliação de métodos de fabricação de mantas híbridas de fibras curtas de vidro e sisal em compósitos poliméricos**. Dissertação (Mestrado). Universidade de Caxias do Sul. Brasil. 2008.