

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Nº 001

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE
COMPÓSITOS DE RESINA POLIURETANA À
BASE DE ÓLEO DE MAMONA E FIBRAS DE
RAMI, SISAL E BUCHA VEGETAL**

LAUREN KAROLINE DE SOUSA

UBERLÂNDIA, 04 DE NOVEMBRO DE 2013



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



Lauren Karoline de Sousa

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE
COMPÓSITOS DE RESINA POLIURETANA À BASE DE ÓLEO
DE MAMONA E FIBRAS DE RAMI, SISAL E BUCHA
VEGETAL**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Civil**.

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

Uberlândia

2013



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: 118/2013

CANDIDATA: Lauren Karoline de Sousa

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

TÍTULO: "Produção e caracterização mecânica de compósitos de resina poliuretana à base de óleo de mamona e fibras de ramí, sisal e bucha vegetal"

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Estruturas e Construção Civil

LINHA DE PESQUISA: Construção Civil

DATA DA DEFESA: 04 de novembro de 2013

LOCAL: Sala de Projeções Prof. Celso Franco de Gouvêa da FECIV

HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA: 14h - 16h 10min

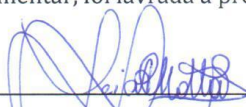
Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que a candidata foi:

☒ APROVADA

☐ REPROVADA

OBS:

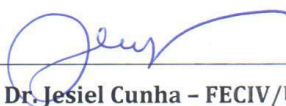
Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:



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



Membro externo: **Prof. Dr. Gustavo Henrique Denzin Tonoli – UFLA**



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

Uberlândia, 04 de 11 de 2013.

Ao meu companheiro, amigo e esposo, Luan, pelo carinho, participação, paciência e apoio sempre, a minha querida orientadora sempre motivadora e presente neste período importante de minha vida, aos meus pais pela educação e incentivo, e as minhas irmãs que são minhas melhores amigas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que permitiu a realização deste trabalho, estando sempre comigo, me iluminando, protegendo e fortalecendo principalmente nos momentos mais difíceis.

Ao amor da minha vida, meu esposo Luan, sempre presente e motivador. Obrigada por ser sempre companheiro, atencioso e compreensivo. Por me incentivar e ajudar durante toda a pesquisa.

A minha querida orientadora, um exemplo para mim, sempre me ensinando e muito atenciosa, compreensiva e amiga principalmente nas horas em que mais precisei. Me motivou e fez com que eu apaixonasse pela pesquisa.

A minha família e amigos, em especial aos meus pais, Celso e Judith, e minhas irmãs, Liriana e Leana, pelo apoio e incentivo. Ao meu pai Celso e a minha irmã Liriana, minha eterna gratidão, vocês são meus melhores amigos, sempre me motivaram a começar e a nunca desistir dos meus sonhos.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Civil que me ensinaram muito, em especial à Maria Cristina, Vanessa, Jesiel, Peruzzi, Dogmar, Francisco e Carlos Eugênio. Aos técnicos do laboratório, Cristiane, Vanderli e Veloso.

Aos meus colegas, Monise, Mohammed e Benício, que sempre de alguma forma ajudaram para alcançar este objetivo.

Agradeço a empresa IMPERVEG Polímeros Indústria e Comércio Ltda. que forneceu a resina poliuretana para a pesquisa e a empresa SALGADALIA Ind. Com. Exportação Ltda. pela fibra de sisal doada. Finalmente, à CAPES, pelo apoio financeiro.

Sousa, L. K. Produção e caracterização mecânica de compósitos de resina poliuretana à base de óleo de mamona e fibras de rami, sisal e bucha vegetal. 93 f. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

RESUMO

Nos últimos anos intensificou-se a busca por novos materiais para aplicação na construção civil, a fim de racionalizar a mão de obra no setor. Uma alternativa viável é a utilização da construção seca, que utiliza painéis de vedação montáveis com função de compartimentação dos ambientes. Com isso inúmeras pesquisas estão sendo realizadas para caracterização de compósitos para a construção civil. A aplicação de compósitos como painéis de vedação torna-se ainda mais sustentável quando os materiais utilizados são biodegradáveis. Assim, o objetivo deste trabalho é produzir e caracterizar compósitos poliméricos utilizando como matriz a resina poliuretana à base de óleo de mamona, reforçada com teores e distribuições variáveis de fibras de rami, sisal e bucha vegetal. Os compósitos foram reforçados com as fibras distribuídas unidirecionalmente e aleatoriamente, com teor de fibra de 25%, 35%, 45% e 55%, em volume. Os compósitos foram produzidos por compressão à temperatura ambiente, intercalando as camadas de fibras com a resina para redução dos vazios e garantir a adesão das fibras a matriz. A partir do ensaio de tração determinou-se a resistência à tração, módulo de elasticidade e a deformação máxima. As melhores propriedades apresentaram-se nos compósitos com 45% de reforço de fibra de sisal contínuo unidirecional. Os compósitos reforçados com fibra de rami também apresentaram módulo de elasticidade elevado (23 GPa). Portanto, pode-se concluir que os compósitos com resina poliuretana com reforço de sisal, rami e bucha vegetal apresentaram propriedades adequadas para usos diversos na construção civil.

Palavras-chave: Compósitos. Resina poliuretana. Fibra de rami. Fibra de sisal. Bucha vegetal.

Sousa, L. K. Production and mechanical characterization of ramie, sisal and sponge gourd fibers reinforced castor oil polyurethane composites. 93 f. MSc Dissertation, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.

ABSTRACT

In recent years the research on new materials for application in construction had intensified in order to rationalize the manpower in the sector. Thereat, many studies are being conducted with the goal of developing composites for use in construction. The use of composites as wall panels is sustainable when the materials used are biodegradable. The objective of this research is produce and characterize polymeric composites using a castor oil polyurethane matrix reinforced with ramie, sisal and sponge gourd fibers. The composites were reinforced with unidirectional and randomly distributed fibers, with volume of 25%, 35%, 45% and 55%. The composites were produced compressed at room temperature, interleaving fiber and resin to secure the void reduction and adhesion of the fiber to the matrix. Through the tensile test the tensile strength, Young's modulus and maximum deformation were determined. The best results were obtained in composites reinforced with 45% unidirectional continuous sisal fibers. The composites reinforced with ramie fiber also showed excellent Young's modulus (23 GPa). Therefore, the study showed that fiber sisal, rami and sponge gourd reinforced castor oil polyurethane composites presented good properties for many uses in civil construction.

Keywords: Composites. Polyurethane resin. Ramie fibers. Sisal fibers. Sponge gourd.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases de um material compósito	10
Figura 2 - Classificação de materiais compósitos.....	11
Figura 3 - Exemplos de compósitos reforçados com:a) partículas aleatórias;b) fibras descontínuas unidirecionais; c) fibras descontínuas aleatórias; d) fibras contínuas unidirecionais	12
Figura 4 - Classificação das fibras	22
Figura 5 - Planta de rami.....	28
Figura 6 - Fibras úmidas saídas da desfibriladora são levadas para secagem	29
Figura 7 - Armazenamento em fardos de 50 kg.....	30
Figura 8 - Processamento do rami: caules de rami; fibras brutas; fibras amaciadas; fibras desgomadas; “tops”; fios de rami; brim de rami.....	31
Figura 9 - Planta de sisal	32
Figura 10 - Secagem em estaleiros de arame.....	34
Figura 11 - Penteamento das fibras em batedeiras.....	34
Figura 12 - Seleção das fibras	35
Figura 13 - Fibras em fardos para transporte	35
Figura 14 - Usos diversos do sisal	37
Figura 15 - Planta Luffa cylindrica	40
Figura 16 - Fruto da luffa cylindrica: a) bucha vegetal verde e b) bucha vegetal madura	41
Figura 17 - Composição da resina poliuretana: a) componente A e b) componente B	44
Figura 18 - Fôrma utilizada: a) vista superior, b) vista lateral.....	45
Figura 19 - Semiesfera	46
Figura 20 - Fibras: a) Rami, b) Sisal e c) bucha vegetal.....	47
Figura 21 - Feixe de fibras cortadas com aproximadamente 21 cm	48
Figura 22 - Preparação das fibras contínuas unidirecionais: a) rami e b) sisal.....	49
Figura 23 - Fibras compactadas: a) rami e b) sisal	49
Figura 24 - Fibras descontínuas aleatórias: a) rami e b) sisal	50
Figura 25 - Fibras descontínuas aleatórias compactadas: a) rami e b) sisal	50
Figura 26 - Fibra de bucha vegetal	51

Figura 27 - Fibra de bucha vegetal compactada	51
Figura 28 - Fôrmas metálicas utilizadas para moldagem dos compósitos.....	52
Figura 29 - Mistura dos componentes A e B	54
Figura 30 - Preparo dos compósitos: a) lançamento de parte da resina; b) adensamento das fibras; c) lançamento da resina restante	54
Figura 31 - Prensagem para produção do compósito: a) prensa hidráulica; b) fôrma prensada ...	55
Figura 32 - Corte dos compósitos a laser.....	56
Figura 33 - Resina poliuretana à base de óleo de mamona: a) placa e b) corpos de prova	57
Figura 34 - Compósito com fibras de rami contínuas dispostas unidirecionalmente: a) placa e b) corpos de prova	57
Figura 35 - Compósito com fibras de sisal contínuas dispostas unidirecionalmente: a) placa e b) corpos de prova	58
Figura 36 - Compósito com fibras de rami descontínuo dispostas aleatoriamente: a) placa e b) corpos de prova	58
Figura 37 - Compósito com fibras de sisal descontínuo dispostas aleatoriamente: a) placa e b) corpos de prova	59
Figura 38 - Compósito com fibras de bucha vegetal: a) placa e b) corpos de prova	59
Figura 39 - Dimensões dos corpos de prova dos compósitos	60
Figura 40 - Ensaio de tração dos compósitos: a) realização do ensaio; b) ruptura do corpo de prova	63
Figura 41 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de rami descontínuas dispostas aleatoriamente: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação máxima	67
Figura 42 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de rami contínuas dispostas unidirecionalmente:a) Módulo de elasticidade;b) Resistência à tração;c) Deformação máxima .	69
Figura 43 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de sisal descontínuas dispostas aleatoriamente: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação máxima	72
Figura 44 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de sisal contínuas dispostas unidirecionalmente:a) Módulo de elasticidade;b) Resistência à tração;c) Deformação máxima .	74
Figura 45 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de bucha vegetal: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação máxima.....	76
Figura 46 - Módulo de elasticidade dos compósitos em estudo	51

Figura 47 - Resistência à tração dos compósitos em estudo	51
Figura 48 - Deformação máxima dos compósitos em estudo	51
Figura 49 – Legenda das Figuras 47, 48 e 49	51
Figura 50 - Corpos de prova ensaiados	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos apresentado pela literatura	16
Tabela 2 - Propriedades características das fibras	21
Tabela 3 - Principais vantagens e desvantagens de fibras sintéticas mais utilizadas.....	23
Tabela 4 - Comparativo entre compósitos com fibras naturais selecionadas e fibra de vidro....	26
Tabela 5 - Características dos componentes	44
Tabela 6 - Propriedades do sistema não curado.....	45
Tabela 7 - Massa de resina e fibra de rami para preparo dos compósitos	52
Tabela 8 - Massa de resina e fibra de sisal para preparo dos compósitos.....	53
Tabela 9 - Massa de resina e fibra de bucha vegetal para preparo dos compósitos.....	53
Tabela 10 - Carga aplicada na preparação dos compósitos	56
Tabela 11 - Exemplo de tratamento estatístico de compósitos com rami aleatório 35% em volume	61
Tabela 12 - Cálculo da massa específica da resina poliuretana curada	64
Tabela 13 - Teores finais de fibras dos compósitos de rami contínuo unidirecional.....	65
Tabela 14 - Teores finais de fibras dos compósitos de rami descontínuo aleatório	65
Tabela 15 - Teores finais de fibras dos compósitos de sisal contínuo unidirecional.....	65
Tabela 16 - Teores finais de fibras dos compósitos de sisal descontínuo aleatório.....	66
Tabela 17 - Teores finais de fibras dos compósitos de bucha vegetal	66
Tabela 18 - Propriedades mecânicas da resina de poliuretana à base de óleo de mamona.....	67
Tabela 19 - Propriedades dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com fibras vegetais encontrados na literatura.....	82
Tabela A1 - Resumo das propriedades mecânicas.....	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
1.1	Justificativa	7
1.2	Objetivos	8
1.2.1	Objetivo principal.....	8
1.2.2	Objetivos específicos	8
1.3	Estrutura do trabalho	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1	Materiais compósitos.....	10
2.1.1	Matriz.....	17
2.1.1.1	<i>Resina poliuretana à base de óleo de mamona</i>	<i>19</i>
2.1.2	Fibras	21
2.1.2.1	<i>Fibra de Rami</i>	<i>27</i>
2.1.2.2	<i>Fibra de sisal</i>	<i>32</i>
2.1.2.3	<i>Fibra de bucha vegetal</i>	<i>39</i>
3	MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	43
3.1	Materiais	43
3.1.1	Resina poliuretana à base de óleo de mamona.....	43
3.1.2	Massa específica da resina poliuretana à base de óleo de mamona	45
3.1.3	Fibras de rami, sisal e bucha vegetal.....	46
3.2	Procedimento experimental	48
3.2.1	Preparação das fibras contínuas unidirecionais.....	48
3.2.2	Preparação das fibras descontínuas aleatórias.....	49
3.2.3	Preparação das fibras de bucha vegetal	50
3.2.4	Preparação e moldagem dos compósitos.....	52
3.2.5	Preparação dos corpos de prova	56
3.2.6	Análise estatística.....	60
3.2.7	Ensaio de tração.....	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	64
4.1	Massa específica da resina poliuretana à base de óleo de mamona.....	64
4.2	Teor de fibras nos compósitos.....	64

4.3	Propriedades mecânicas determinadas pelo ensaio de tração	66
4.3.1	Resina poliuretana	66
4.3.2	Compósitos de fibras de rami descontínuo aleatório	67
4.3.3	Compósitos de fibras de rami contínuo unidirecional	69
4.3.4	Compósitos de fibras de sisal descontínuo aleatório	71
4.3.5	Compósitos de fibras de sisal contínuo unidirecional	73
4.3.6	Compósitos de fibras de bucha vegetal	76
4.3.7	Comparativo entre compósitos	78
4.4	Ruptura dos corpos de prova	80
4.5	Resumo dos compósitos em estudo e da literatura	81
5	CONCLUSÃO	83
5.1	Conclusão	83
5.2	Propostas para trabalhos futuros	84
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A – Resumo das Propriedades mecânicas	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Nos últimos anos, pesquisas de novos materiais, com o intuito de racionalizar a mão de obra, diminuir o desperdício de materiais e reduzir o tempo de execução na construção civil, têm sido cada vez mais intensas. A utilização da tecnologia *drywall* para vedação vertical pode ser apresentada como um grande exemplo. Outro fator de grande importância está relacionado com o desenvolvimento de novos produtos que sejam provenientes de recursos renováveis, a fim de obter materiais mais sustentáveis.

Por muito tempo, os materiais utilizados para executar alvenaria de vedação foram basicamente os blocos cerâmicos e blocos de concreto. Porém, com o desenvolvimento da indústria da construção foi imperativo pesquisar novos materiais e tecnologias que começaram a ser empregadas na construção civil, conhecidas como construção seca. Segundo Taniguti (1999), estes sistemas de vedações verticais são constituídos de painéis montáveis com função de compartimentar os ambientes, auxiliar no controle térmico e acústico, proteger as instalações hidráulicas e elétricas dos edifícios, sem função estrutural. Segundo Sabbatini (1998), estes sistemas caracterizam-se por ser leves, fixos ou desmontáveis, executados por acoplamento mecânico. Além disto, os materiais utilizados nas construções secas geram menos resíduos e permitem execução com maior rapidez.

Utilizar materiais provenientes de recursos renováveis como elementos de vedação favorece a proteção ao meio-ambiente, como é o caso dos compósitos com resina de origem vegetal e fibras naturais. Segundo Joshi *et al.* (2004), estas fibras apresentam-se interessantes quando comparadas a outros materiais poliméricos, principalmente por apresentarem menor custo, serem abundantes, renováveis e favoráveis sob o aspecto da relação resistência/peso. A sua utilização em compósitos possibilita a obtenção de materiais mais eficientes quanto ao consumo de energia, emissão de efluentes e toxicidade aos trabalhadores.

As fibras naturais, também chamadas de fibras vegetais ou celulósicas, utilizadas como elemento de reforço dos compósitos são formadas por microfibras e apresentam importantes vantagens em relação aos materiais inorgânicos, como a baixa densidade, alta deformabilidade, baixa abrasividade aos moldes e aos equipamentos de mistura, baixo custo e são derivados de recursos renováveis. No entanto, apresentam também algumas desvantagens, como a baixa resistência ao impacto, baixa resistência à umidade e baixa durabilidade.

O presente trabalho justifica-se pela motivação em buscar novos materiais que possam ser aplicados na construção civil, que apresentam baixo custo, sejam oriundos de recursos renováveis e biodegradáveis. Para isso foram estudadas as propriedades mecânicas de compósitos produzidos com matriz polimérica biodegradável e fibras vegetais, a fim de desenvolver novos materiais que apresentem desempenho adequado para aplicação em edificações, como vedação, por exemplo. Compósitos com fibras de rami, sisal e bucha vegetal com resina poliuretana ainda foram pouco explorados, principalmente com teores mais elevados de reforço, residindo aí a principal contribuição deste trabalho.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

Produzir e caracterizar os compósitos utilizando resina poliuretana de origem vegetal reforçada com fibras de sisal, rami e bucha vegetal, visando aplicação na construção civil.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo proposto serão produzidos compósitos utilizando resina poliuretana de origem vegetal reforçada com fibras de sisal, rami e bucha vegetal em diferentes teores e distribuição na matriz visando:

1. Avaliar o efeito de diferentes teores de fibras;
2. Avaliar o efeito de diferentes formas de distribuição das fibras na matriz;

3. Identificar o teor crítico de fibras para cada compósito;
4. Avaliar comparativamente o desempenho dos compósitos produzidos.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho tem início com a abordagem de uma introdução que explicita os materiais envolvidos na pesquisa e a motivação em desenvolvê-la. Dentro ainda deste 1º capítulo, são apresentados também os objetivos principais e específicos.

No 2º capítulo é feita a revisão bibliográfica de trabalhos que já foram desenvolvidos. Neste capítulo são abordados conceitos de compósitos e seus constituintes, compósitos reforçados com fibras vegetais, indicados resultados de pesquisas anteriores, sobre os compósitos aplicados na construção civil com matrizes poliméricas e matrizes cimentícias. Também são apresentados conceitos específicos dos materiais que serão utilizados na pesquisa, sendo eles a resina poliuretana à base de óleo de mamona, fibras vegetais de sisal, rami e bucha vegetal.

Após a revisão bibliográfica, o 3º capítulo, denominado de materiais e procedimentos experimentais, engloba a apresentação das características dos materiais que serão utilizados e como foram realizadas todas as etapas do processo de preparação e moldagem dos compósitos. Também apresenta o procedimento de preparação dos corpos de prova e execução dos ensaios para caracterização dos compósitos.

O 4º capítulo aborda os resultados obtidos por meio de ensaios, assim como discussões dos resultados encontrados e comparativo com resultados apresentados em outros trabalhos.

Por fim, no 5º capítulo, são feitas as conclusões finais.

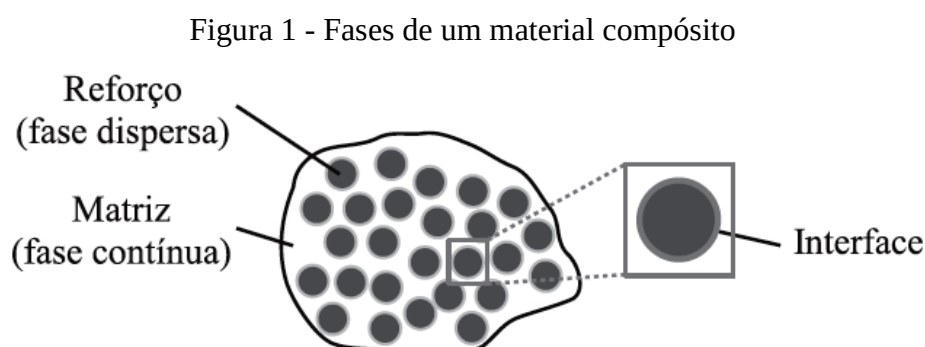
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais compósitos

Materiais compósitos são utilizados há milhares de anos, desde 1200 a.C., na civilização egípcia. A princípio, compósitos eram utilizados a partir da mistura de palha ao barro com o intuito de obter materiais mais adequados para construções de civilizações antigas (ISAIA, 2007). Atualmente, tem-se procurado desenvolver novos sistemas compósitos e é possível observar que estes materiais estão sendo cada vez mais aplicados no setor da construção civil (SHACKELFORD, 2008). De acordo com Isaia (2007), tem aumentado o uso, nas últimas décadas, de compósitos de matriz polimérica na Engenharia Civil, para reforços estruturais, impermeabilização e vedação.

O material é dito compósito quando sua constituição envolve alguma combinação de dois ou mais materiais, tendo como intuito obter um material resultante com propriedades mecânicas superiores a qualquer um deles isoladamente. Estes materiais resultam de combinações entre metais, cerâmicas e polímeros (MAZUMDAR, 2002).

Segundo Isaia (2007), os materiais compósitos são entendidos como materiais heterogêneos, constituídos por duas fases, sendo uma fase contínua representada pela matriz e outra descontínua dada pelo elemento de reforço (Figura 1).



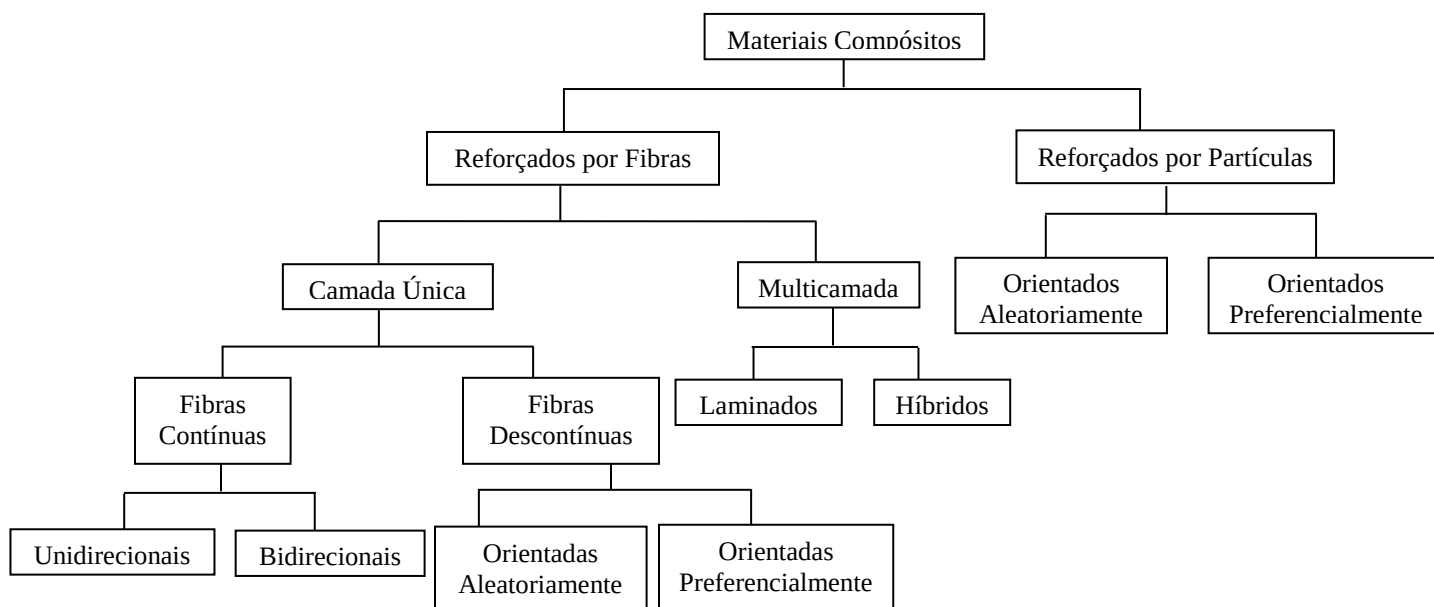
Fonte: Angélico (2009)

A finalidade da matriz é transmitir para o reforço as solicitações aplicadas ao material por meio da aderência e conectar os elementos de reforço. É fundamental observar algumas características dos compósitos, principalmente o módulo de elasticidade que representa uma função sensível do elemento de reforço e a resistência da interface entre a matriz e o reforço.

Angélico (2009) apresenta como vantagens dos materiais compósitos comparados aos materiais tradicionais isotrópicos, as excelentes relações rigidez/peso e resistência/peso, a boa resistência à corrosão, facilidade de manutenção, alta durabilidade, bom comportamento à fadiga e a possibilidade de projetar o reforço em relação à quantidade, geometria e orientação, para atender às solicitações. Porém, estes materiais podem apresentar custos elevados como mão de obra e materiais, natureza anisotrópica resultando em modelagem difícil e baixa resistência ao cisalhamento.

De acordo com Matthews e Rawlings (1999), os compósitos são classificados em função do tipo de matriz, da natureza e geometria do elemento de reforço. Em relação ao componente matricial pode ser classificada como polimérica, cerâmica ou metálica. Em função do elemento de reforço, os compósitos podem ser classificados como reforçados por partículas ou por fibras, conforme Figura 2.

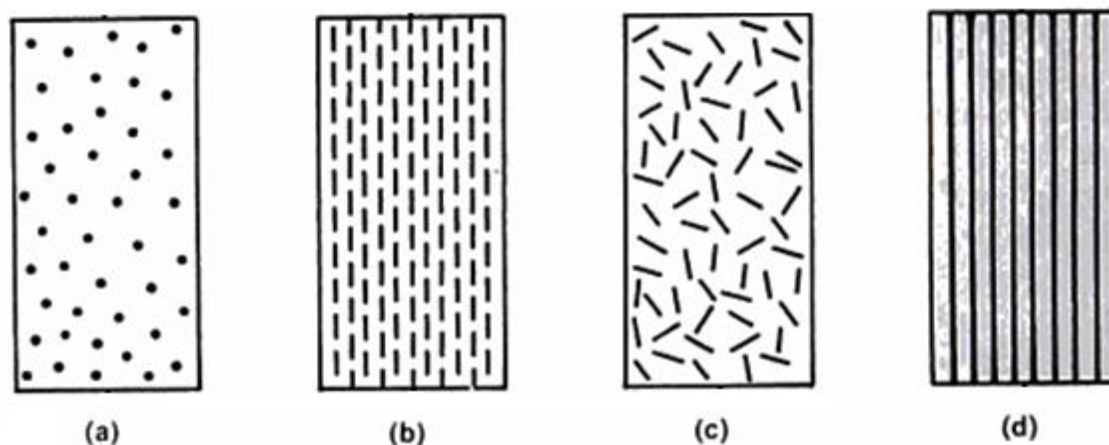
Figura 2 - Classificação de materiais compósitos



Fonte: Matthews e Rawlings (1999)

Segundo Shackelford (2008), a distribuição do reforço pode apresentar configurações diferentes, podendo ser contínuo unidirecional, cortado aleatoriamente ou tramado em um tecido que é laminado com a matriz. A Figura 3 esquematiza alguns exemplos de configurações de compósitos reforçados por partículas e por fibras.

Figura 3 - Exemplos de compósitos reforçados com: a) partículas aleatórias; b) fibras descontínuas unidirecionais; c) fibras descontínuas aleatórias; d) fibras contínuas unidirecionais



Fonte: Matthews e Rawlings (1999)

Dentre os compósitos bastante utilizados atualmente destacam-se aqueles que usam as fibras como elemento de reforço. Estas têm a finalidade de impedir a propagação das fissuras aumentando conseqüentemente a capacidade resistente e retardando a fratura. A maioria dos estudos sobre compósitos com fibras naturais envolvem estudos das propriedades mecânicas como função do comprimento da fibra, teor, extensão de entrelaçamento de ambas, efeitos de vários tratamentos químicos e a utilização de acoplamento de agentes (JAWAID; ABDUL KHALIL, 2011).

No Brasil, pesquisas utilizando fibras como reforço de matrizes cimentícias começaram a ser desenvolvidas nos anos de 1980, na Bahia. Utilizar compósitos produzidos a partir de fibras vegetais, na construção civil, como reforço de matrizes cimentícias é de grande interesse para muitos países. O Brasil possui enorme variedade e abundância de fibras, então utilizar estes

materiais em compósitos pode contribuir para o crescimento do país. Atualmente, vários tipos de fibras estão sendo utilizadas como reforço de matrizes cimentícias (CANTALINO *et al.*, 2006).

A incorporação de fibras de comprimento adequado em matrizes pouco resistentes, como a argamassa e o concreto, torna os materiais mais dúcteis com a distribuição de fissuras, aumentando a sua resistência à tração, flexão e ao impacto. A necessidade de pesquisar a aplicação de fibras vegetais no fibrocimento foi em função de aproveitar o potencial das propriedades físico-mecânicas destas fibras e buscar uma alternativa ao uso do amianto (BANCO NACIONAL DE HABITAÇÃO - BNH, 1982).

Com relação ao desempenho mecânico dos compósitos cimentícios fibrosos, as fibras contribuem principalmente após a fissuração. Segundo Cantalino *et al.* (2006), a função das fibras é aumentar a tenacidade e a resistência ao impacto do material por meio de mecanismos de absorção de energia, relacionados ao escorregamento e arrancamento das fibras. A vantagem dos compósitos submetidos à flexão quando comparados a matriz cimentícia, é a capacidade de absorver mais energia, apresentando maior tenacidade e resistência ao impacto.

De acordo com o BNH (1982) nos compósitos utilizando argamassa ou concreto, as matrizes devem ser armadas por microfibras e acrescidos de fibras maiores, sendo assim possível aumentar a carga de fissuração e garantir a ductilidade após a fissuração da matriz com microfibras. As porcentagens e características das fibras são determinantes para as características do novo composto. As fibras com alto módulo de elasticidade e resistência à tração irão resultar no aumento da resistência à tração da matriz; enquanto que compósitos utilizando fibras de baixo módulo de elasticidade terá maior resistência ao impacto por resistir a grandes deformações.

Segundo o BNH (1982) existe uma faixa de volume de fibras, denominado volume crítico, em que a atuação da fibra é eficiente para o aumento da resistência à tração, à flexão e na distribuição das fissuras na argamassa. Porém, a inclusão de fibras na matriz, argamassa ou concreto, reduz a resistência à compressão dos compósitos.

Além dos materiais produzidos a partir de matriz cimentícia existem os materiais constituídos por resinas, também conhecidos como polímeros reforçados com fibras (PRF), que são compósitos com matriz fabricada a partir de um material polimérico reforçados com fibras e eles estão sendo muito utilizados na indústria aeroespacial, automotiva, naval, equipamentos esportivos e engenharia civil (CARVALHO, 2005). Como todos os compósitos, as propriedades destes também são função das características das fases constituintes do material, da quantidade relativa e geometria das fibras (MILANESE, 2008).

Muitas pesquisas são realizadas para analisar as propriedades de compósitos poliméricos utilizando reforço vegetal, como sisal, curauá, bagaço de cana de açúcar, coco, entre outras. O interesse em pesquisar estes materiais decorre do baixo custo, baixa densidade, boa resistência mecânica e por serem de fontes renováveis. Segundo Askeland e Phulé (2008), a maioria dos compósitos reforçados com fibras apresentam maiores limites de resistência, resistência à fadiga, módulo de elasticidade e resistência específica ao incorporar fibras mecanicamente resistentes.

De acordo com Milanese (2008), os compósitos que utilizam as fibras vegetais como elemento de reforço apresentam baixa massa específica, baixo desgaste superficial, baixo custo, além de ser recurso renovável e biodegradável, são bons isolantes térmico, elétrico e acústico. O teor de umidade destas fibras, normalmente está entre 5% a 20%.

As fibras influenciam diretamente nas propriedades dos compósitos e é esperado que eles tenham alto módulo de elasticidade e resistência. Normalmente elas se apresentam em forma circular pela facilidade do processamento. Em relação ao tamanho das fibras, elas podem apresentar-se longas e curtas, sendo que os compósitos com as fibras longas apresentam vantagens como maior resistência ao impacto e estabilidade dimensional. Quando as fibras estão orientadas em uma única direção também possibilitam maior resistência e rigidez no sentido da orientação.

Os materiais reforçados com fibras contínuas apresentam propriedades mecânicas superiores, quando comparados aos que utilizam fibras descontínuas, que mostram alta resistência e rigidez na direção das fibras, porém desempenho inferior na direção transversal. Apesar de apresentar o

desempenho inferior, compósitos feitos utilizando fibras descontínuas mostram maior facilidade de processamento a um custo menor (CALLISTER JUNIOR, 2008).

Existem muitos compósitos de matriz polimérica reforçada com fibras vegetais que apresentam excelentes propriedades mecânicas, como é o caso da resina de poliéster reforçada com fibra de juta, das resinas poliuretana e epóxi com fibras de sisal. Os compósitos com resina epóxi com fibra de sisal apresentam maior resistência à tração quando comparado aos materiais com resina poliuretana, porém o módulo de elasticidade, a resistência à flexão e ao impacto são inferiores. A Tabela 1 apresenta algumas propriedades mecânicas de compósitos poliméricos com fibras vegetais, sendo que as condições de moldagem para cada tipo de compósito são variáveis, assim como os teores de fibras.

Também existem os chamados híbridos que, segundo Jawaid e Abdul Khalil (2011), são aqueles sistemas em que um tipo de material de reforço é incorporado na mistura de diferentes matrizes, ou dois ou mais materiais de reforço estão presentes em uma única matriz ou ambas abordagens são combinadas.

De acordo com Callister Junior (2008), a inserção de elementos particulados em matrizes constitui os chamados compósitos reforçados com partículas e o bom desempenho deste material depende da adequada interação entre a matriz e as partículas. As partículas são responsáveis por restringir os movimentos da matriz e, normalmente, apresentam resistência e rigidez maior que a matriz. Para melhor desempenho do compósito, as partículas devem apresentar dimensões equivalentes nas três direções e estarem distribuídas uniformemente pela matriz.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos compósitos poliméricos apresentado pela literatura

Compósitos	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento total (%)	Resistência à flexão (MPa)	Módulo em flexão (GPa)	Resistência ao impacto (kJ/m ²)	Absorção d'água (%)
Sisal/PU ¹ (Silva, 2003)	2,5 – 120,0	0,02 – 15,5	1,1 – 16,5	22,9 – 147,0	1,9 – 6,4	9,9 – 30,0	1,7 – 15,6
Coco/PU ¹ (Silva, 2003)	21,0 – 32,0	2,0 – 2,6	1,1 – 2,3	42,5 – 51,0	1,6 – 2,19	5,0 – 11,0	5,6 – 16,9
Sisal/PS ² (Nair <i>et al.</i> , 1996)*	11,0 – 48,3	0,4 – 1,1	2,0 – 9,0				
Sisal/LDPE ³ (Satyanarayana <i>et al.</i> , 1990)*	6,1 – 31,0	0,3 – 3,0	<1,0 – 4,2				
Sisal/Epóxi (Paula, 1996)*	103,0 – 132,0	3,3 – 4,3	3,0 – 3,1	67,0 – 86,0	5,2 – 6,7		
Juta/PP ⁴ (Joseph <i>et al.</i> , 1999)*	18,0 – 37,0	0,03 – 0,46	7,0 – 15,0				0,77 – 6,8
Juta/Poliéster (Gowda <i>et al.</i> , 1999)*	35,0 – 60,0	3,5 – 7,0					
Coco/PF ⁵ (Owolabi, 1985)*				30,5 – 98,0		7,1 – 19,1	
Coco/PVC ⁶ (Owolabi, 1988)*	12,5 – 22,0					3,6 – 67,0	
Coco/PP ⁷ (Rozman, 2000)*	8,0 – 23,5		3,4 – 6,0	11,3 – 36,7	0,95 – 3,9		5,0 – 6,7
Coco/Poliéster (Satyanarayana <i>et al.</i> , 1990)*	18,6	0,004		38,5		3,8	1,4
Bagaço de cana/Fenólica (Paiva/ Frollini, 1999)*						5,7 – 8,6	
Banana/Poliéster (Pothan <i>et al.</i> , 1999)*	23,0 – 55,0	0,2 – 0,68		10,0 – 40,0	2,3 – 5,3	9,0 – 37,0	12,0-29,0

Nota:

¹ Poliuretano (PU)² Poliestireno (PS)³ Poliestileno de baixa densidade (LDPE)⁴ Polipropileno (PP)⁵ Fenol-formaldeído (PF)⁶ Cloreto de polivinila (PVC)

* Autores citados por Silva (2003)

Fonte: Silva (2003)

De acordo com Isaia (2007), na Engenharia Civil existem como exemplo de materiais compósitos largamente usados o concreto e o fibrocimento, produzido pela adição de fibras à matriz cimentícia, além de outros compósitos utilizados em perfis estruturais, painéis, reforços de estruturas, produtos de madeira, piscinas e reservatórios, geossintéticos e tubulações. Segundo Cantalino *et al.* (2006) existem aplicações de compósitos reforçados com lignocelulósicos como têxteis geológicos, filtros, absorventes, compósitos estruturais, compósitos não estruturais, produtos moldados e embalagens.

Os materiais compósitos de matriz polimérica são empregados em pisos e revestimentos, móveis e estruturas de madeira, impermeabilizações e vedações. Como exemplo de compósitos utilizando matrizes poliméricas tem-se matriz poliéster com reforço de fibras de vidro - *fiberglass*, laminados de matriz melamínica com reforço de fibras celulósicas (fórmica), matriz melamina-formaldeído com fibras e particulados de madeira, e tintas com adição de particulados. Atualmente são utilizados vários tipos de compósitos de madeira, como o MDF (*Medium Density Fiberboard*), que usa fibras menores e mais curtas com resinas sintéticas, sem orientação; o OSB (*Oriented Strand Board*), com fibras longas e orientadas; e os aglomerados, composto por partículas de madeira (ISAIA, 2007).

2.1.1 Matriz

A matriz é a parte mais aparente do compósito, e atua como meio de transmissão e distribuição da tensão aplicada para o reforço, sendo apenas uma pequena parcela da carga suportada pela matriz. Também funciona como proteção das fibras ou partículas individuais contra danos superficiais em decorrência da abrasão mecânica ou de reações químicas com o ambiente. Ela separa os elementos de reforço funcionando como uma barreira contra a propagação de trincas. É importante ressaltar que o módulo de elasticidade do reforço deve ser maior do que o apresentado pela matriz (CALLISTER JUNIOR, 2008).

De acordo com Isaia (2007), normalmente a matriz é o componente de menor resistência no compósito, porém existem exceções em que o elemento de reforço, na forma de partículas, é adicionado para redução de custos ou deformabilidade e a matriz neste caso pode ser o elemento

de maior resistência. As matrizes usualmente empregadas são as cerâmicas, com destaque para a matriz cimentícia utilizada para fabricação de argamassas e concretos; as poliméricas estão sendo cada vez mais utilizadas e estudadas, principalmente as reforçadas com fibras; as metálicas formadas por metais leves e resistentes como o alumínio, magnésio e titânio; e as matrizes à base de carbono.

As matrizes poliméricas, também conhecidas como resinas, são constituídas basicamente pelas resinas termorrígidas e as termoplásticas. As termorrígidas são resinas que curam em estado irreversível por terem no estado endurecido uma estrutura molecular tridimensional que não se refunde. Elas sofrem degradação quando submetidas a altas temperaturas. São mais utilizadas para formação de compósitos em função de sua estabilidade em temperaturas de serviço e resistência química. As termoplásticas são constituídas por resinas cujo processo de endurecimento ocorre exclusivamente pela secagem física, ou seja, por evaporação de solventes. Este tipo de resina quando em contato com o solvente se solubiliza. Mesmo após sua fabricação permitem ser curvados com diferentes formatos. A matriz termoplástica apresenta alta viscosidade que pode dificultar a sua aplicação, desalinhamento das fibras e formação de bolhas na matriz (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Quanto à sua origem, as resinas podem ser classificadas em naturais, semi-sintéticas e sintéticas. Classificam-se como naturais as resinas provenientes de fontes animais, vegetais e minerais. As semi-sintéticas são resultantes de produtos naturais que sofreram modificações químicas, como é o caso da poliuretana derivada de óleo de mamona. E as sintéticas são obtidas através de adição e condensação, é o caso da resina poliuretana, epóxi, poliéster e o poliacetato de vinila (MILANESE, 2008).

As resinas utilizadas na engenharia são poliéster insaturada (isoftálica, ortoftálica, tereftálica ou bisfenólica), éster vinílica, epóxi, fenólicas, resinas tipo silicone, poliamida, polipropileno, poliuretano, metacrílico e poliamida. Para a seleção da matriz é importante levar em consideração sua densidade final pós-cura, pois deve ser pequena para minimizar o peso do compósito (ISAIA, 2007).

A resina epóxi é a mais utilizada na construção civil para fabricação de compósitos, apresenta custo elevado, excelentes propriedades mecânicas e elétricas, grande adesividade, elevada rigidez, resistência a ataques químicos e cura a temperatura ambiente. A resina de poliéster também é muito utilizada na construção civil e na indústria automobilística devido ao seu custo reduzido, porém apresentam baixa resistência ao impacto e à degradação. As resinas tipo éster vinílica são utilizadas para fabricação de polímeros reforçados com fibras usados como barras de armadura para concreto, apresentam custo mais elevado, são resistentes a ácidos e álcalis. As poliamidas possuem custo elevado e são utilizadas para fabricação de compósitos de alto desempenho a altas temperaturas. As fenólicas apresentam bom isolamento elétrico, boa resistência a altas temperaturas e ataques químicos (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

A estabilidade térmica dos compósitos poliméricos reforçados com fibras naturais pode influenciar diretamente na degradação destes materiais. No caso de matriz termorrígida, este é um fator limitante para a escolha da temperatura de cura. Enquanto que utilizando matriz termoplástica, a limitação é função da temperatura de extrusão (MONTEIRO, 2012).

2.1.1.1 *Resina poliuretana à base de óleo de mamona*

A resina poliuretana pode ser oriunda do petróleo e de fonte natural (SILVA, 2003). De acordo com Coutinho e Delpech (1999), os poliuretanos podem ser aplicados como revestimentos com excelente desempenho, para proteger e embelezar os substratos de aço, concreto, plástico, metais, papel, couro e madeira. Segundo Silva (2003), a resina poliuretana pode ser obtida do óleo da mamona (*Ricinus Communis*), que é conhecida como Caturra e internacionalmente como “Castor Oil”. A mamona é abundante no Brasil e pode ser encontrada em regiões tropicais e subtropicais, com baixa umidade. De acordo com Milanese (2008), os principais produtores são Brasil, China e Índia.

Os poliuretanos são materiais utilizados em segmentos da ciência e tecnologia. Segundo Coutinho e Delpech (1999), são sintetizados em etapas através de reações de poliadição a partir de compostos hidroxilados (OH) e isocianatos (NCO). Os sistemas poliméricos aquosos podem ser preparados através de dispersão de um polímero pré-formado em água e por polimerização

em emulsão. Estes materiais dispersos em água apresentam propriedades importantes, pois mesmo apresentando partículas inchadas com água, após secagem formam filmes extremamente resistentes a água.

Segundo Merlini *et al.* (2011), os poliuretanos podem ser produzidos através de reações de isocianato e poliol, sintetizado a partir de óleos vegetais como óleo de rícino, de soja e de maracujá. De acordo com Milanese (2008) estas reações são exotérmicas e a velocidade depende da estrutura do isocianato e do poliol utilizado. Para a síntese da resina poliuretana à base de óleo de mamona é utilizado como poliol um poliéster derivado do ácido ricinoléico. O óleo de rícino é extraído por prensagem, a frio ou a quente, de sementes da planta *Ricinus Communis*.

O óleo de mamona é um recurso natural e renovável, utilizado para síntese de poliuretano que cura a frio e é menos agressivo ao ambiente. É um triglicerídeo natural, não alimentar e com forma de líquido viscoso. Pode ser aplicado como matéria-prima para tinta, revestimento e lubrificante (MILANESE, 2008). Segundo Silva (2003), as resinas poliuretanas podem apresentar como elastômero de alta flexibilidade ou de maior dureza, com densidades entre 6 e 1220 kg/m³.

Merlini *et al.* (2011) avaliaram influência dos volumes e comprimento das fibras, do tratamento alcalino sobre as propriedades térmicas e mecânicas das fibras curtas de banana usadas como reforço da matriz poliuretana à base de óleo de mamona. Os autores observaram aumento na resistência à tração e no módulo de elasticidade com o aumento no volume e comprimento das fibras tratadas e não tratadas. Para os compósitos com fibras tratadas, os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade foram maiores do que com as fibras não tratadas. Isto porque ocorreu uma maior interação entre as fibras e a matriz em função das alterações morfológicas e químicas nas superfícies das fibras tratadas.

2.1.2 Fibras

São chamadas de fibras os filamentos que possuem diâmetros variando entre 1 μm e 25 μm ; e são obtidas a partir de materiais naturais ou processados (MILANESE, 2008). Segundo Bentur e Mindess (1990) existem uma variedade de tipos de fibras que podem ser utilizadas em matriz cimentícia ou polimérica, como é o caso das fibras de aço, vidro, amianto, celulose, madeira e sisal. Estas fibras apresentam elevado módulo de elasticidade como é o caso da fibra de aço, vidro, amianto e madeira, boa resistência à tração, como é o caso da fibra de aramida, amianto, madeira e sisal. As características de algumas fibras podem ser observadas na Tabela 2.

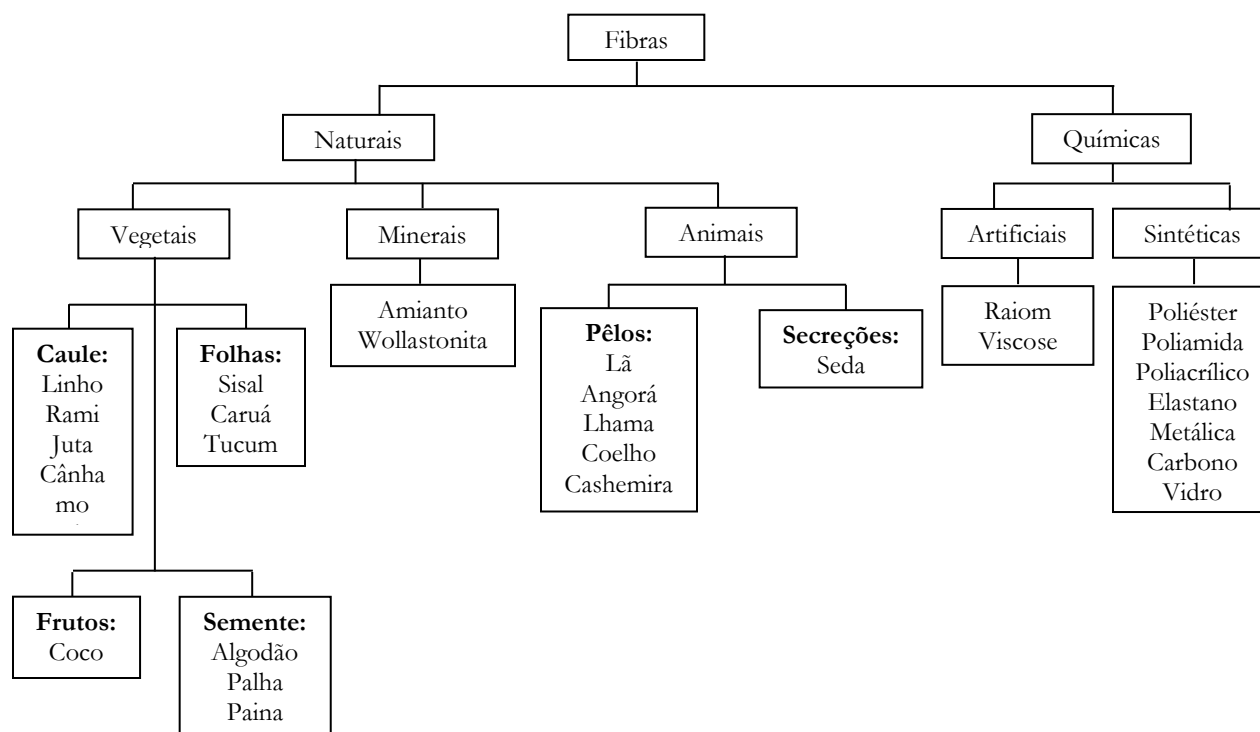
Tabela 2 – Propriedades características das fibras

Fibras		Diâmetro (μm)	Densidade	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (GPa)	Alongamento máximo (%)
Aço		5-500	7,84	200	0,5-2,0	0,5-3,5
Vidro		9-15	2,60	70-80	2-4	2-3,5
Amianto	Crocidolita	0,02-0,4	3,40	196	3,5	2,0-3,0
	Crisolita	0,02-0,4	2,60	164	3,1	2,0-3,0
Fibrilado	Polipropileno	20-200	0,90	5-77	0,5-0,75	8,0
Aramida		10	1,45	65-133	3,6	2,1-4,0
Carbono		9	1,90	230	2,6	1,0
Nylon		-	1,10	4,0	0,9	13,0-15,0
Celulose		-	1,20	10	0,3-0,5	-
Acrílico		18	1,18	14-19,5	0,4-1,0	3
Polietileno		-	0,95	0,3	$0,7 \times 10^{-3}$	10
Madeira		-	1,50	71,0	0,9	-
Sisal		10-50	1,50	-	0,8	3,0

Fonte: Bentur e Mindess (1990)

As fibras são classificadas basicamente como sintéticas e naturais (Figura 4). As principais fibras comerciais são as fibras de vidro, carbono, aramida, boro e fibras vegetais. São vendidas principalmente na forma de fios ou *rovings*, laminados ou *strips*, tecidos, mantas, cabos, cordoalhas e barras (ISAIA, 2007).

Figura 4 - Classificação das fibras



Fonte: Milanese (2008)

Fibras com boas propriedades mecânicas são utilizadas em matrizes poliméricas para reforço estrutural, como é o caso das fibras de carbono, fibras de aramida e fibras de vidro. As denominadas fibras de alto desempenho apresentam elevados valores de módulo de elasticidade e resistência à tração (ISAIA, 2007).

A produção de materiais compósitos utilizando fibras sintéticas como reforço apresentam inúmeras vantagens e desvantagens, considerando o custo, as propriedades mecânicas e disponibilidade. Comparando as fibras de vidro, carbono e boro, observa-se que a fibra de vidro é mais barata, porém apresenta compósitos com baixo módulo, enquanto que a fibra de carbono e a fibra de boro apresentam boas propriedades mecânicas, mas custo elevado. Pinheiro (2010) evidencia as principais vantagens e desvantagens das fibras sintéticas mais utilizadas, que são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais vantagens e desvantagens de fibras sintéticas mais utilizadas

	Fibras de vidro	Fibras de carbono	Fibras aramídicas	Fibras de boro
Vantagens	- Resistente a fungos e umidade; - Boa resistência contra químicos; - Boa elasticidade; - Baixo custo.	- Elevado módulo de elasticidade; - Baixa expansão térmica; - Resistência à fadiga e fluência; - Resistência à temperatura.	- Resistência ao impacto; - Transparência ao radar e sonar; - Fácil de trabalhar.	- Elevado módulo de elasticidade; - Elevada resistência à compressão; - Elevada dureza; - Resistência à temperatura.
Desvantagens	- Fadiga; - Baixo módulo de elasticidade se comparado a outras fibras sintéticas.	- Fraca resistência ao impacto; - Elevado custo.	- Absorção de umidade; - Fraca resistência à compressão e flexão; - Difícil de cortar; - Atacado pela luz UV.	- Formas de materiais limitadas; - Custo elevado; - Poucos fornecedores.

Fonte: Pinheiro (2010)

Para a produção de compósitos, além das fibras sintéticas, as matrizes podem ser reforçadas por fibras de origem vegetal, também chamada de fibras lignocelulósicas ou simplesmente fibra vegetal. As fibras vegetais como reforço de compósitos poliméricos são promissores não para substituição das fibras de carbono, mas como opção de reforço de polímeros. São consideradas fibras lignocelulósicas aquelas originadas de recursos renováveis, que são biodegradáveis e recicláveis. Em países tropicais estas fibras podem ser produzidas em abundância, facilitando o uso delas. As vantagens de utilizar reforços lignocelulósicos são a baixa densidade, alta deformabilidade, baixo custo, baixa abrasividade aos moldes e aos equipamentos de mistura (LEVY NETO; PARDINI, 2006).

Segundo Satyanarayana *et al.* (2007), o estudo de fibras lignocelulósicas revelam que estas podem ser concorrentes ideais para as fibras não renováveis. Muitos países estão tornando-se conscientes com preocupações ecológicas e países europeus estão aprovando leis que irão requerer, até 2015, a utilização de até 95% de materiais recicláveis em veículos. Definitivamente, está se aproximando rapidamente o momento para a utilização de compósitos utilizando estas

fibras como membros estruturais em automóveis. É possível produzir fibras de qualidade, adequadas para aplicações diferentes, por meio de cultivos melhores incluindo engenharia genética e métodos de tratamento para obter propriedades uniformes.

Nos últimos anos, compósitos poliméricos contendo fibras celulósicas tem recebido considerável atenção, tanto pela pesquisa como pela indústria. Segundo Monteiro *et al.* (2009), para muitos países, a venda e exportação de fibras lignocelulósicas contribuem significativamente para a renda e sobrevivência de agricultores pobres e daqueles que trabalham no processamento da fibra e no mercado. Para alguns países em desenvolvimento, estas fibras são de importância vital para a economia, como é o caso do algodão para a África Ocidental, juta em Bangladesh e sisal na Tanzânia. Em outros casos, as fibras são menos significantes a nível nacional e de extrema importância regional, como a juta para a Índia Ocidental e o sisal para o nordeste do Brasil.

As fibras vegetais podem ser obtidas do caule, da folha, da semente, da raiz e do fruto das plantas. Segundo Jawaid e Abdul Khalil (2011) e Motta (2006), as fibras lignocelulósicas têm quatro principais categorias dependendo da parte da planta de que são extraídas. Podem ser extraídas do caule (juta, linho, cânhamo e rami), pseudo-caule (banana), das folhas (sisal e abacaxi) e da semente (algodão e coco). De acordo com Silva (2003), as fibras mais utilizadas como reforço em compósitos poliméricos são as oriundas do caule ou das folhas, que são as chamadas fibras duras.

De acordo com Merlini *et al.* (2011), a capacidade de reforço das fibras lignocelulósicas em matrizes poliméricas é fortemente dependente das propriedades e estruturas das fases constituintes, suas concentrações relativas e parâmetros como o comprimento da fibra, distribuição, diâmetro e orientação. Além disso, a região de interface fibra- matriz desempenha papel fundamental nas propriedades mecânicas do compósito, devido à transferência da carga do polímero para a fibra.

Ao adicionar fibras para reforço de uma matriz, mas com fraca interação entre fibra e matriz, haverá somente uma leve melhoria nas propriedades mecânicas dos compósitos. Para melhorar a compatibilidade fibra-matriz e as propriedades mecânicas dos compósitos, as fibras vegetais às

vezes devem ser modificadas através de métodos químicos e físicos. O método de modificação química comumente utilizado é o tratamento alcalino, que remove a lignina e hemicelulose (MERLINI *et al.*, 2011).

As características das fibras individuais estão relacionadas com as formas, tamanho, orientações e espessura das paredes das células. As vantagens das fibras vegetais ocorrem pelo baixo peso específico que resulta em alta resistência específica e rigidez; a produção a partir de recursos renováveis requer uma menor energia e, conseqüentemente, menos emissão de CO₂; a produção é feita com baixo investimento e com baixo custo; apresentam alta resistência elétrica e boas propriedades de isolamento térmico e acústico; é biodegradável, tem possibilidade de fazer reciclagem térmica, são resistentes e abundantes. Muitas fibras celulósicas, como a fibra da folha de abacaxi, são produtos naturais de resíduos, por isso disponível por um custo mínimo e podem ser utilizadas como material de reforço em matrizes poliméricas tornando-se úteis para compósitos estruturais (JAWAID; ABDUL KHALIL, 2011).

A resistência à tração e o módulo de elasticidade são propriedades das fibras que exercem influência direta no desempenho do compósito. De acordo com Isaia (2007), a elevada resistência das fibras é função da reduzida seção transversal que reduz a possibilidade de ocorrer defeitos de composição; e o elevado módulo de elasticidade das fibras permite que elas atuem como reforço por apresentarem elevado nível de tensão no momento de ruptura da matriz.

Segundo Jawaid e Abdul Khalil (2011), considerando o módulo de elasticidade das fibras lignocelulósicas é possível observar valores comparáveis ou até mesmo melhores do que as fibras de vidro. As fibras lignocelulósicas apresentam na ruptura um alongamento significativamente melhor que irá resultar em um compósito com melhor tolerância a danos. Menor custo e maior tolerância a danos fazem as fibras lignocelulósicas atrativas para construção de habitações com requisitos “baixa carga”. A madeira é a mais abundante fibra celulósica natural utilizada porque é muito usado em celulose e indústria de papel. Contudo, as fibras celulósicas que apresentam melhores resistências e rigidez são as fibras de cânhamo, linho, juta, e sisal, que estão tornando-se cada vez mais importantes na produção de compósitos.

No Brasil os recursos de fibras convencionais incluem banana, coco, algodão, abacaxi, rami e sisal. Destas, o algodão é cultivado tanto em terras permanentes quanto em terras temporárias, enquanto que as de coco, banana e sisal são cultivadas em terras permanentes e o abacaxi e rami são cultivados em terras temporárias. São consideradas terras permanentes e temporárias aquelas utilizadas para a produção de uma mesma cultura por longa duração de tempo e pequena duração de tempo, respectivamente.

De acordo com Soares (2012), compósitos utilizando matriz epóxi com elevado teor de fibras vegetais, no caso rami, apresentaram boas propriedades e promissoras para uso como reforço estrutural. Segundo Ferreira (2012), é possível substituir materiais não biodegradáveis pelos ecologicamente corretos, sendo as fibras naturais alternativas viáveis a serem empregadas como reforço de matrizes poliméricas aplicadas como forro de edificações, por apresentarem excelentes propriedades mecânicas.

O principal motivo para a substituição das fibras de vidro pelas lignocelulósicas ocorre porque elas podem ser obtidas com um custo mais baixo do que as fibras de vidro. A Tabela 4 apresenta comparativo entre compósitos reforçados com algumas fibras naturais selecionadas e fibra de vidro.

Tabela 4 – Comparativo entre compósitos com fibras naturais selecionadas e fibra de vidro.

Fibras	Densidade (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Alongamento máximo (%)
Fibra de vidro	2,6	1750	-	2,1
Linho batido	1,4	195	22,3	1,2
Linho verde	1,4	337	29	1,3
Cânhamo batido	1,4	195	16,3	1,1
Cânhamo verde	1,4	173	7,5	1,9
Sisal	1,3	126	3,8	-
Coco	1,2	149	-	23,8
Rami	1,4	393	7,3	1,8
Banana	1,2	74	2,2	3,2

Fonte: Cantalino *et al.* (2006)

As fibras vegetais apresentam algumas desvantagens que podem influenciar na sua aplicação, como é o caso da baixa resistência ao impacto; qualidade variável em função do tempo e local de cultivo; baixa resistência à umidade, que causa inchamento das fibras; temperatura de processamento máxima limitada; baixa durabilidade; pouco resistente ao fogo; e variação do preço em função dos resultados da colheita e políticas agrícolas (JAWAID; ABDUL KHALIL, 2011).

Li *et al.* (2007) analisou o tratamento químico de fibras naturais usadas em compósitos. Fazer o tratamento químico de fibra tem o objetivo de melhorar não só a adesão entre a superfície da fibra e a matriz, mas também aumentar a resistência das fibras. A absorção de água dos compósitos é reduzida e as propriedades mecânicas melhoradas.

Monteiro *et al.* (2012) analisou o comportamento termogravimétrico de compósitos poliméricos utilizando fibras naturais como alternativas para substituição de fibras sintéticas. A maioria das fibras naturais apresentou uma perda de peso inicial com a temperatura abaixo de 200 °C pela evaporação da água da superfície das fibras. Em temperaturas mais elevadas ocorre a degradação térmica de substâncias resultante de estágios iniciais de decomposição. Para aplicações de engenharia, as temperaturas elevadas não são tão importantes, mas podem ser utilizadas para determinar a energia de ativação, que é outro parâmetro associado com a estabilidade térmica.

Segundo Motta (2006), conseguir utilizar os resíduos provenientes do bagaço de cana, pseudo-caule da bananeira, cascas de coco e fibras de sisal pode resolver problemas de deposição e melhorar a economia agrícola consideravelmente, pois estes materiais não são aproveitados comercialmente e destinados à queima ou usado como combustíveis mesmo com o valor calorífico muito inferior ao do carvão. A indústria da construção civil tem potencial para aproveitar estes resíduos produzindo componentes como painéis, blocos e telhas.

2.1.2.1 *Fibra de Rami*

O rami (Figura 5), também denominado *Boehmeria nivea*, Gaud., é o nome dado à planta e fibra de um vegetal proveniente de regiões temperadas da Ásia Oriental e pertencente à família das

Urticáceas. A planta apresenta como principais características altura de um a três metros, diâmetro de 0,7 a 1,2 centímetros, caules verdes, cilíndricos, raramente ramificados e folhas alternas (BENATTI JUNIOR, 1988).

Figura 5 - Planta de rami



Fonte: Oliveira *et al.* (2009)

O maior produtor mundial de rami é a China, seguida do Brasil e Filipinas (Romanzini *et al.*, 2012). Segundo Satyanarayana *et al.* (2007), o Brasil foi novamente o terceiro produtor mundial de fibras de rami, com cerca de 10.000 toneladas por ano em 1990, mas diminuiu consideravelmente ao longo dos anos.

Dentro do Brasil, o maior produtor é o estado do Paraná, com destaque para as cidades de Uraí, Londrina e Assaí (BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO - BNDES, 1996). No país são cultivadas duas espécies, sendo a principal delas conhecida como rami-branco, ou *Boehmeria nivea*, Gaud., e a outra espécie denominada de rami-verde, ou *Boehmeria utilis*, BI. (BENATTI JUNIOR, 1988).

A plantação de rami pode sofrer variações em função de diversos fatores como o solo, clima, variedade plantada, adubação, idade da plantação, entre outros. Segundo Benatti Junior (1988), é favorável para o desenvolvimento da planta rami o clima subtropical ou temperado para quente e regiões com elevada precipitação anual, entre 1500 a 2000 mm anuais, sendo as chuvas regularmente distribuídas durante o ano. Os melhores solos para o desenvolvimento da planta são os leves, profundos e férteis; sendo o argilo-silicoso, latossolo roxo e terra roxa os mais favoráveis para o plantio. A reprodução da planta pode ocorrer por sementes e por via vegetativa.

A fibra de rami é excelente matéria prima para confecção de artigos de tecidos, cordas e barbantes. Quando comparada a outras fibras, ela recebe destaque por apresentar facilidade de ser lavada, não desbota e é resistente (BNDES, 1996).

De acordo com Benatti Junior (1988) a preparação da fibra bruta se inicia pela extração das fibras dos caules da planta. O processo ocorre a partir da colheita do caule, que após o corte, devem ser levados em até 24 horas para a desfibradora, que é responsável pela quebra da parte lenhosa dos caules e com a raspagem é obtida a fibra bruta. Depois deste processo as fibras úmidas são levadas ao sol para secagem (Figura 6), e após atingir o grau de secagem desejado elas são recolhidas, armazenadas, prensadas e amarradas em fardos de 50 kg (Figura 7).

Figura 6 - Fibras úmidas saídas da desfibriladora são levadas para secagem



Fonte: Oliveira *et al.* (2009)

Figura 7 - Armazenamento em fardos de 50 kg



Fonte: Benatti Junior (1988)

Segundo Castro *et al.* (1948), em relação às propriedades físicas, quando comparada a outras fibras vegetais existentes, o rami apresenta maior durabilidade e resistência. É determinada como a fibra mais longa e uma das mais finas, apresentando comprimento médio de 150 mm e diâmetro aproximadamente de 0,040 mm.

Segundo Neto *et al.* (2010) a heterogeneidade das propriedades e dimensões das fibras são fatores limitantes para a aplicação das fibras de rami em materiais compósitos. O trabalho analisou a variação da resistência à tração em relação ao diâmetro da fibra e observou que as fibras de diâmetros menores apresentam melhores propriedades mecânicas.

Soares (2012) avaliou o desempenho mecânico de compósitos produzidos com resina epóxi e fibras de rami contínuas unidirecionais nos teores de 30%, 40%, 50% e 60% e tecido de rami unidirecional de 50%, em volume. Os compósitos com 50% em volume de fibras e tecido de rami apresentaram resistência à tração de 139,4 MPa e 126,3 MPa, respectivamente, e módulo de elasticidade de 17,1 GPa e 23,7 GPa, respectivamente.

O trabalho de Ferreira (2012) utilizou a matriz poliéster reforçada com fibras contínuas unidirecionais e tecido de rami bidirecional para produção de compósitos para aplicação em

forros como painel sanduíche. Foram avaliadas diferentes frações volumétricas, 30%, 40% e 50% para as fibras e tecidos de rami. Os melhores resultados foram apresentados pelos compósitos com 50% de volume de fibra, com resistência à tração de 127,09 MPa e módulo de elasticidade de 27,06 GPa.

Romanzini *et al.* (2012) estudaram a preparação e caracterização de compósitos híbridos com matriz polimérica reforçada com fibras de vidro e rami. A boa adesão da fibra à matriz foi garantida com a remoção das impurezas da fibra com água destilada, apresentando pequena diferença entre as fibras *in natura* e as fibras lavadas, melhorando a estabilidade térmica e elevando a temperatura de degradação. O trabalho concluiu que a fibra de rami pode ser considerada como uma alternativa para substituir parcialmente as fibras de vidro em compósitos poliméricos.

As fibras são utilizadas para fabricação de muitos produtos e subprodutos, podendo ser tecidos finos, como toalhas, cortinas, fios especiais para as indústrias de sapatos e couro; papel para cigarro; cordoalha em geral; fio dental; papel moeda; papéis finos resistentes; dentre outros. A Figura 8 ilustra as diversas formas do rami levando em consideração as etapas de seu processamento (BENATTI JUNIOR, 1988).

Figura 8 - Processamento do rami: caules de rami; fibras brutas; fibras amaciadas; fibras desgomadas; “tops”; fios de rami; brim de rami



Fonte: Benatti Junior (1988)

2.1.2.2 Fibra de sisal

O sisal pertence à família *Agavaceae*, subfamília *Agavoidea*, é uma planta com alta complexidade morfofisiológica, não tem caule e as folhas são destituídas de pecíolos, podendo atingir o comprimento de quase dois metros (Figura 9). Pertence à classe de monocotiledôneas e o principal produto é a fibra tipo dura, que apresenta elevados teores de celulose e lignina. Considerando a importância econômica recebem destaque a espécie *Agave Sisalana*, em que o maior produtor mundial é a Bahia, e a *Agave fourcroydes*, explorada pelo México e é utilizada para fabricar fios e cordas (CANTALINO *et al.*, 2006).

Figura 9 - Planta de sisal



Fonte: Silva (2006)

De acordo com Cantalino *et al.* (2006), o sistema radicular é fasciculado, fibroso e em forma de tufo, com ausência de raiz principal, sendo as raízes do tipo assimiladora (ou alimentadoras) e transportadoras.

A fibra de sisal é obtida das folhas da planta *Agave sisalana* e é considerada uma fibra vegetal de natureza celulósica. Existem aproximadamente 57 espécies de sisal catalogadas (Milanese, 2008). Segundo BNH (1982) é possível obter da folha do sisal 20% de fibra, sendo 50% é

constituído de suco, 47% é água e apenas 3% podem ser consideradas fibra comercial. A fibra do sisal é composta por microfibras de grande resistência à tração e durabilidade.

O Brasil cultiva esta fibra nos sertões do nordeste brasileiro, na região semi-árida, por ter facilidade em adaptar a regiões secas, com solos rasos, pedregosos e com poucas chuvas (MILANESE, 2008). O cultivo da fibra de sisal é muito importante e representa cerca de 50% do mercado mundial. Atualmente o Brasil é o maior produtor de sisal do mundo e mais de meio milhão de pessoas na região nordeste do país são dependentes dessa cultura, sendo esta cultura difundida em 73 municípios da Bahia e responsável por 95% da produção nacional (ALVES *et al.*, 2005).

Os principais produtores são a Bahia, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Pernambuco. De acordo com IBGE (2012) a produção brasileira de sisal em 2011 foi de 287 mil toneladas. A Bahia foi responsável pela produção de 96,85% deste total, a Paraíba 2,61%, o Ceará 0,35% e o Rio Grande do Norte 0,19%.

Segundo Alves *et al.* (2005) o processo de produção das fibras consiste basicamente no plantio da planta, colheita e transporte. Com o término destas etapas ocorre o desfibramento, este processo consiste na eliminação da polpa das fibras através de raspagem mecânica da folha utilizando rotores raspadores. Após o desfibramento deve ser feita a limpeza das fibras utilizando tanques com água e as deixando em repouso em um intervalo de 8 a 12 horas. Por fim, as mesmas devem ser levadas para secagem em estaleiros de arame (Figura 10), submetidas ao penteamento (Figura 11) em batedeiras para seleção (Figura 12) e classificação da fibra, para posterior acondicionamento em fardos para transporte (Figura 13).

Figura 10 - Secagem em estaleiros de arame



Fonte: Cantalino *et al.* (2006)

Figura 11 - Penteamento das fibras em batedeiras



Fonte: Silva (2006)

Figura 12 - Seleção das fibras



Fonte: Silva (2006)

Figura 13 - Fibras em fardos para transporte



Fonte: Silva (2006)

Na cultura do sisal, o processo de corte das folhas durante a colheita é considerado o mais importante para garantir a melhor qualidade das fibras e mais longas, devendo ser realizado após as primeiras chuvas (BNH, 1982). De acordo com Cantalino *et al.* (2006), as fibras de sisal são classificadas de acordo com a classe e o tipo. Em relação à classe elas podem ser classificadas em longa, quando o comprimento for superior a 0,90 m, média, caso o comprimento seja entre

0,71 m e 0,90 m, e curta, quando entre 0,60 m e 0,70 m. Quanto ao tipo as fibras podem ser classificadas em:

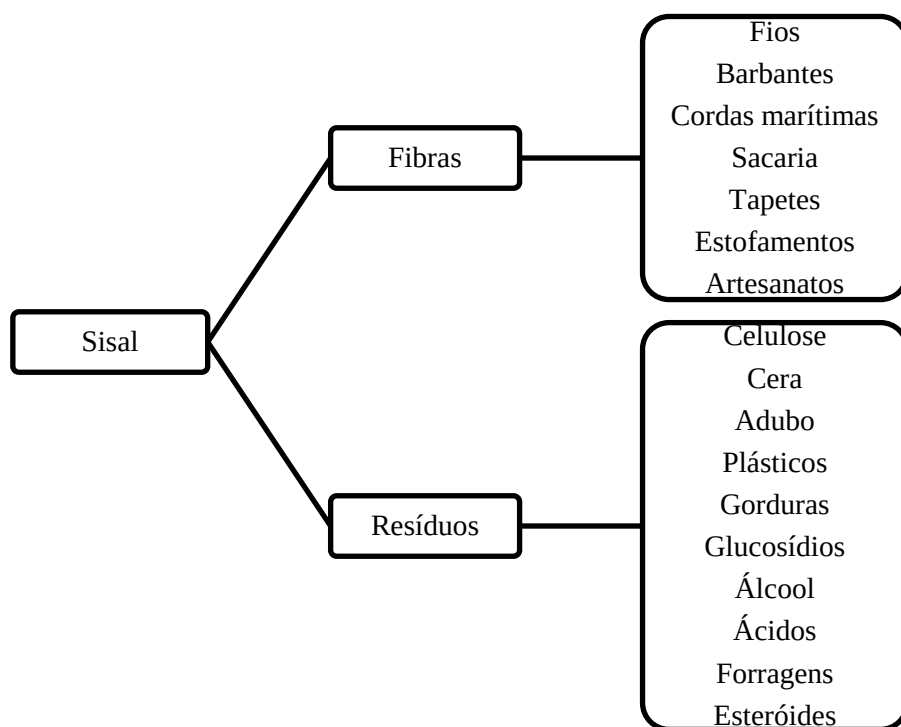
- Tipo superior, quando o material é constituído de fibras limpas, secas e bem escovadas, com coloração creme-claro, em ótimo estado de maturação, com maciez, brilho e boa resistência, umidade máxima de 13,5%, isenta de defeitos (impurezas, entrelaçamentos e nós, fragmentos de folhas e cascas);
- Tipo 1, quando as fibras são secas e bem escovadas, de coloração creme-claro ou amarelada, em ótimo estado de maturação, com maciez, brilho e resistência normais, manchas com pequena variação em relação à cor, umidade máxima de 13,5%, isenta de defeitos (impurezas, entrelaçamento e nós, fragmentos de folhas e cascas);
- Tipo 2, quando o material é constituído de fibras secas e bem escovadas, de coloração amarelada ou pardacenta, com pequenas extensões esverdeadas, bom estado de maturação, com brilho e resistência normais, ligeiramente ásperas, umidade de 13,5%, soltas e desembaraçadas e isentas de impurezas, entrelaçamentos, nós e cascas;
- Tipo 3, quando constituído de fibras secas e bem escovadas, de coloração amarelada, com parte de tonalidade esverdiada, pardacenta ou avermelhada, em bom estado de maturação, brilho e resistência normais, ásperas, manchas com variação bem acentuadas em relação à cor, umidade máxima de 13,5%, soltas e desembaraçadas, isentas de impurezas, entrelaçamento, nós e cascas.

De acordo com Cantalino *et al.* (2006), caso a fibra não apresente o comprimento mínimo, elas deixam de atuar como reforço, funcionando como enchimento ou carga. As propriedades das fibras dependem da microestrutura, da origem e idade da planta.

Segundo Milanese (2008), da planta *Agave sisalana* é utilizado principalmente as fibras das folhas que se destinam à indústria de cordoaria para a confecção de fios, automobilística para revestimentos de paredes traseiras e laterais dos veículos, substituição das fibras de vidro,

material de estofamento, artigos ornamentais como artesanatos etc. A fibra é utilizada principalmente na fabricação de fios agrícolas, principalmente o “Baler Twine” que é utilizado para amarração de fardos de feno de cereais nos EUA, Canadá, Europa e Brasil; mas também é industrializada para ser empregada na fabricação de papéis finos, móveis, eletrodomésticos e na construção civil (CANTALINO *et al.*, 2006). A figura 14 ilustra algumas aplicações do sisal. A utilização da fibra de sisal no fibrocimento é recomendada e apresenta-se viável em termos de produção da fibra (BNH, 1982).

Figura 14 - Usos diversos do sisal



Fonte: BNH (1982)

A literatura apresenta estudos utilizando fibra de sisal como reforço para compósitos. Paiva *et al.* (1999) estudaram compósitos com matriz fenólica reforçada com fibras de sisal, curauá e bagaço de cana de açúcar. O compósito que apresentou melhor resistência ao impacto foi o reforçado com fibras de sisal, com destaque para aqueles com fibras mais longas. Os compósitos reforçados com curauá apresentaram resistência ao impacto superior a resina somente após as fibras receberem tratamento de NaOH 10%. Os reforçados com cana de açúcar apresentaram

uma pequena alteração. Os compósitos foram moldados à compressão, apresentando diminuição gradativa da rigidez com a introdução das fibras.

Carvalho e Cavalcanti (2006) analisaram o desempenho mecânico dos compósitos com matriz poliéster insaturado utilizando tecidos híbridos de sisal e vidro em função do teor de fibras, variando em 30, 40 e 50%, e direção do teste. Os compósitos foram moldados por compressão em camadas contínuas unidirecionais. Os resultados apresentaram aumento na resistência mecânica dos compósitos com o aumento do teor total de fibras, sendo que as melhores propriedades foram obtidas quando testadas na direção da fibra de vidro em compósitos com elevados teores desta fibra. Os melhores valores para resistência à tração e módulo de elasticidade foram 123,80 MPa e 3,83 GPa, respectivamente, para os tecidos com 57% de fibra, em peso, com testes na direção da fibra de vidro.

Milanese (2008) utilizou matrizes poliméricas, poliuretanas à base de óleo de mamona e fenólica, reforçadas com fibras de sisal e vidro para analisar a possibilidade de aplicação do material como reforço nas ligações de estruturas de madeira. O contexto da análise englobou a síntese das resinas, cinética química de cura, análise térmica por meio de técnicas de termogravimetria (TG), calorimetria exploratória diferencial (DSC), difração dos raios X, resistências à tração e flexão, e análise fractográfica com microscópico eletrônico de varredura (MEV). Os compósitos apresentaram resistências à tração variando entre 19,6 MPa e 30,6 MPa, alongamento de 6,8% a 8,6%. A matriz poliuretana apresentou comportamento dúctil com resistência à tração de 2,5 MPa e alongamento correspondente a 29%. O trabalho concluiu que o compósito utilizando a matriz fenólica e reforço de fibra vidro apresentou maior resistência à tração e maior rigidez, seguido pelos laminados de poliuretana com fibra de vidro, fenólica com sisal e poliuretana com sisal. O trabalho concentrou sua análise no comparativo entre a variação de diferentes tipos de matriz e reforço, não evidenciando o teor de fibras utilizado.

Silva (2003) avaliou o comportamento da resina poliuretana com diferentes tipos de reforço, como 10%, 22%, 30% e 35% para as fibras curtas de sisal, e 10% e 20% de fibras curtas de coco, em volume. O trabalho avaliou as propriedades mecânicas de tração, flexão, impacto e tenacidade à fratura, propriedades térmicas e níveis de absorção de água, em relação à influência

da geometria do reforço e do tratamento alcalino aplicado às fibras. Os compósitos foram submetidos ao ensaio de tração apresentando resistência à tração de aproximadamente 60 MPa com as fibras tratadas e 50 MPa com as não tratadas de sisal. Para os compósitos com fibra de coco foram obtidos valores de 20 MPa e 30 MPa para a resistência a tração com fibras não tratadas e tratadas, respectivamente. O módulo de elasticidade com reforço de fibra de sisal foi de aproximadamente 6 GPa para não tratadas e 5,5 GPa para tratadas, e com a fibra de coco com e sem tratamento foi 2,5 GPa. A deformação máxima para compósitos com os dois tipos de reforço foi de aproximadamente 2%.

Silva *et al.* (2006) pesquisou a resistência à fratura de compósitos com matriz poliuretana à base de óleo de mamona com fibras de sisal e coco. O melhor desempenho foi apresentado pelo compósito com tecido de sisal, enquanto que os de fibra de coco apresentaram desempenho inferior quando comparado aos de fibra de sisal e com a matriz poliuretano sem reforço.

O BNH (1982) analisou a aplicação de fibras vegetais no fibrocimento e no concreto. As fibras utilizadas foram sisal, piaçava, coco, cana de açúcar, bambu e bucha. O sisal apresentou-se como a fibra mais viável para reforçar a matriz de cimento, devido suas características físico-mecânicas e por ter o processo de desfibramento já industrializado.

2.1.2.3 *Fibra de bucha vegetal*

A bucha vegetal, também conhecida como *Luffa Cylindrica*, é o nome dado à planta (Figura 15) e fibra de um vegetal proveniente de regiões da Ásia e cultivado no Brasil, pertence à família das Curcubitaceae. As Curcubitáceas estão entre as maiores e mais diversas famílias de plantas, apresentando uma variedade de características de frutos. São cultivadas em todo o mundo por suportar uma variedade de condições ambientais (BISOGNIN, 2002).

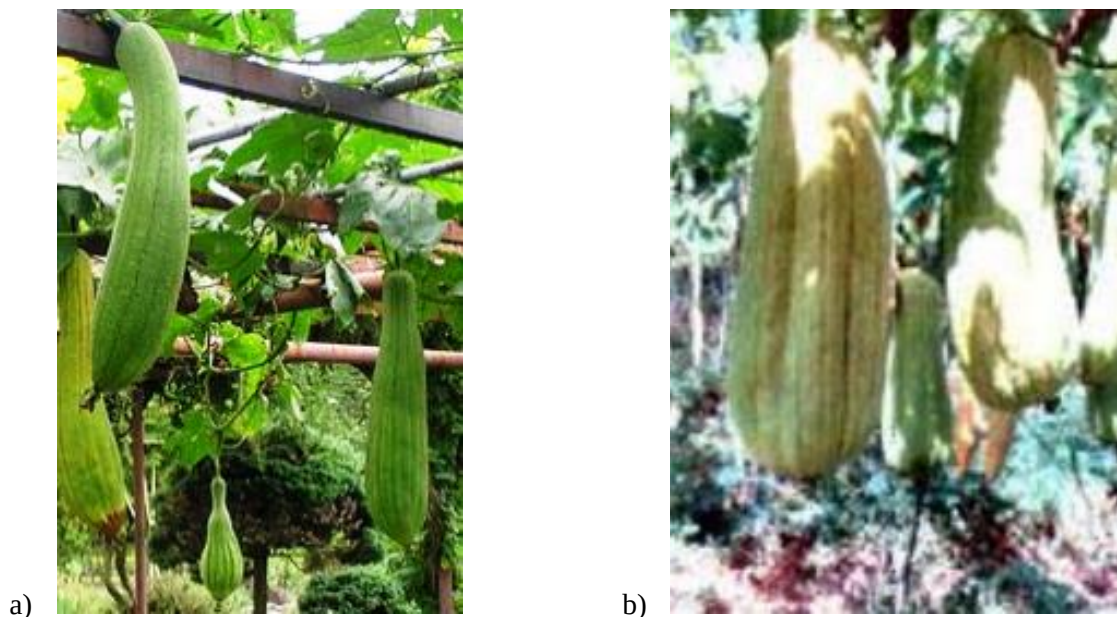
Figura 15 - Planta *Luffa cylindrica*

Fonte: Guimarães *et al.* (2009)

A planta atinge comprimento de aproximadamente 10 metros, conhecida como trepadeira herbácea com caule anguloso. O fruto possui formato cilíndrico com comprimento e diâmetro entre 15 a 100 cm e 8 a 10 cm, respectivamente (ANNUNCIADO, 2005; TANOBE *et al.*, 2002; TANOBE, 2003). O fruto da planta da bucha vegetal (Figura 16) tem um sistema vascular fibroso na qual as fibras estão dispostas em uma matriz multidirecional formando uma manta natural, com comprimento de até 50 cm, cilíndrico, com cor amarela quando maduro e castanho escuro quando seco (D'ALMEIDA *et al.*, 2005; BOYNARD *et al.*, 1999).

A bucha vegetal tem emprego doméstico, em que os frutos verdes podem ser consumidos como saladas e cozidos. Pela indústria são utilizadas para fabricação de palmilhas, chinelos, solados, peneiras, correias e filtros de óleos para automóveis, esponjas de banho e chapéus (ANNUNCIADO, 2005; TANOBE, 2003).

Figura 16 - Fruto da luffa cylindrica: a) bucha vegetal verde e b) bucha vegetal madura



Fonte: Carvalho (2007)

O potencial das fibras de bucha vegetal aplicadas como reforço de matriz polimérica tem sido pouco explorado. Segundo Boynard *et al.* (2003) as fibras de bucha vegetal apresentam-se como material natural que reduz a propagação das fissuras, controlando a fratura e aumentando a tenacidade do compósito. Estas fibras são utilizadas para melhorar o desempenho dos compósitos poliméricos, porém deve-se ter atenção a baixa interação fibra e matriz, como é o caso de compósitos utilizando matriz de poliéster.

Boynard *et al.* (2003) estudaram o efeito do tratamento alcalino das fibras com solução de NaOH em diferentes porcentagens, 0%, 1%, 5%, 10%, 20%, 40% e 60%, em peso. Este estudo observou melhora das propriedades de módulo de elasticidade com 5%, em peso, mostrando a viabilidade de utilização das fibras de bucha vegetal para reforço de compósitos poliméricos.

Demir *et al.* (2006) estudaram o efeito do tratamento da superfície das fibras de bucha aplicadas em compósitos com resina de polipropileno. Os compósitos foram produzidos com 2%, 5%, 7%, 10% e 15%, em peso, de fibras de bucha vegetal. A partir do tratamento das fibras utilizando solução de polipropileno com anidrido maleico, observou melhoria da resistência à tração e

módulo de elasticidade, com consequente redução da absorção de água do compósito devido a melhor adesão entre a fibra e a matriz.

Silva *et al.* (2012) analisaram as propriedades mecânicas dos compósitos de matriz de poliéster reforçada com bucha vegetal em forma de mantas, para aplicação não estrutural. Variou-se o volume de fibras nos compósitos em 20%, 30% e 40%, resultando na maior resistência à tração e módulo de elasticidade com 40% e 30%, em volume, respectivamente. Os valores máximos apresentados para a resistência à tração foi de 26,40 MPa e o módulo de elasticidade de 4,93 GPa.

3 MATERIAIS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental iniciou-se com a seleção dos materiais para a pesquisa, no caso do reforço foram utilizadas as fibras de sisal, rami e bucha vegetal, e como matriz a resina poliuretana à base de óleo de mamona. Neste capítulo é apresentada a metodologia adotada para determinação da massa específica da resina, a preparação das fibras alinhadas unidirecionalmente e distribuídas aleatoriamente, assim como o preparo e ensaio dos compósitos.

3.1 Materiais

Para moldar os compósitos estudados neste trabalho, foi utilizada como matriz a resina poliuretana à base de óleo de mamona e para reforço fibras de rami, sisal e bucha vegetal, descritas a seguir. A resina poliuretana foi adotada por ter boas propriedades mecânicas, ser de origem vegetal e ainda serem recentes pesquisas referentes ao seu uso com fibras vegetais. A fibra de sisal foi selecionada para estudo por ser uma fibra abundante no Brasil, com excelentes propriedades mecânicas, e por ser muito estudada no Brasil e no mundo. No caso da fibra de rami por apresentar excelentes propriedades mecânicas, bom desempenho estrutural e é uma fibra que permite ser utilizada com teores elevados em compósitos esbeltos, por ser uma fibra fina. E finalmente a bucha vegetal apresenta as fibras dispostas de forma estruturada, facilitando a produção dos compósitos, além de ser abundante e pouco pesquisada com a resina poliuretana.

3.1.1 Resina poliuretana à base de óleo de mamona

A resina poliuretana utilizada foi RP 1315 C, doada pela empresa IMPERVEG Polímeros Indústria e Comércio Ltda., localizada na cidade de Aguaí - São Paulo. A resina é caracterizada pelo fabricante como impermeabilizante a base de poliuretano vegetal oriundo do óleo de mamona, bicomponente e isento de solventes.

Segundo o fabricante, a resina apresenta como principais propriedades boa durabilidade e elasticidade, resistência a raios ultravioleta, excelente resistência à ação do intemperismo e águas

contendo substâncias agressivas, não apresenta retração volumétrica após a cura e ótima penetração nos poros das superfícies de materiais garantindo aderência.

A resina apresenta-se fluída, com cor amarela após a cura e não é tóxica. O material foi fornecido em dois componentes, componente A e componente B (Figura 17) devendo ser misturados na proporção de 1:1,2 em massa, respectivamente, conforme especificação do fabricante. O tempo de trabalho da resina após a mistura dos componentes é de aproximadamente 15 minutos.

Figura 17 - Composição da resina poliuretana: a) componente A e b) componente B



Fonte: Autora

As características dos componentes e as propriedades do sistema não curado, segundo o fabricante, estão apresentadas nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 5 – Características dos componentes

Características	Componentes A e B
Consistência	Fluída
Cor após a cura	Cinza, verde, amarelo, vermelho, preto, etc.
Resistência ao calor	Apresenta perda de massa após 210°C
Tensão de ruptura à tração	15 MPa
Resistência à compressão	28 MPa
Alongamento de ruptura	+/- 8%

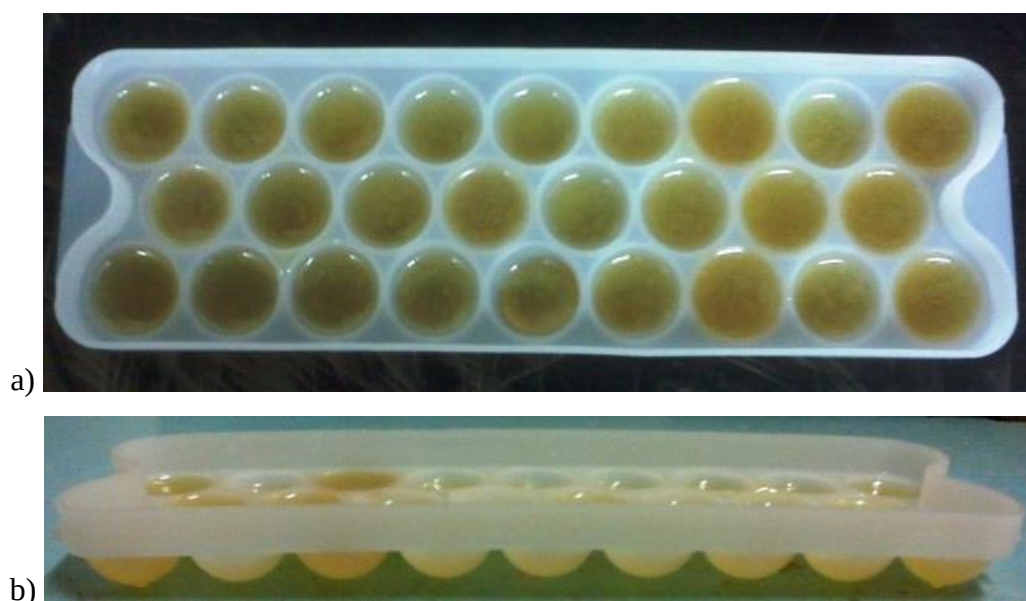
Tabela 6 – Propriedades do sistema não curado

Proporção da mistura (Componente A : Componente B)	1 : 1,2 partes em massa
Temperatura de manipulação (°C)	18 - 30
Tempo de utilização da mistura (gel time) a 25°C	15 minutos
Tempo de endurecimento da mistura	40 a 180 minutos
Cura total	48 a 72 horas

3.1.2 Massa específica da resina poliuretana à base de óleo de mamona

Determinou-se a massa específica da resina curada utilizando como molde a fôrma ilustrada na Figura 18.

Figura 18 - Fôrma utilizada: a) vista superior, b) vista lateral



Fonte: Autora

A fôrma com as amostras foi parcialmente imersa em água e gelo para reduzir o calor de reação durante o tempo de trabalho, que é de aproximadamente 15 minutos. Após este período a amostra entra em estado de gel e foi submetida ao processo de cura em temperatura ambiente.

Foi possível observar que durante o processo de cura da resina, a mesma apresentou vazios provenientes de bolhas. Segundo Silvestre Filho (2001), esta ocorrência é resultado de reações

exotérmicas que resultam em vazios provenientes do aumento da massa molar, em que a água presente na resina e que pode ser produzida durante a reação de cura se torna insolúvel na resina curada, se separando e evaporando logo em seguida (Silvestre Filho, 2001).

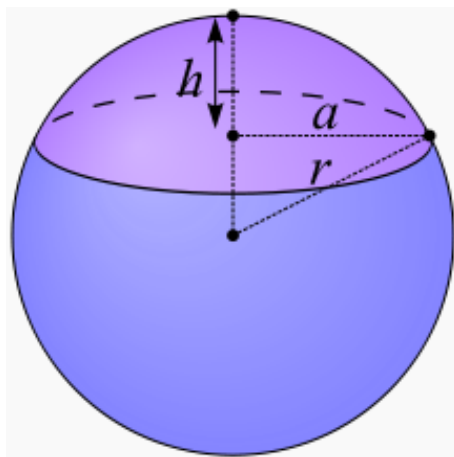
Após a cura foram feitas 6 determinações utilizando as amostras que apresentaram menor quantidade de vazios. Com o uso de balança de precisão e paquímetro, determinaram-se a massa e diâmetro da base das amostras, respectivamente.

Para o cálculo do volume das amostras, foi utilizada a expressão $V = \frac{1}{6} \cdot \pi \cdot h \cdot (3 \cdot a^2 + h^2)$, em função do raio da base e da altura da semiesfera. A Figura 19 ilustra uma calota esférica, onde:

h: altura da semiesfera

a: raio da base da semiesfera

Figura 19 - Semiesfera



Fonte: Autora

3.1.3 Fibras de rami, sisal e bucha vegetal

A fibra de rami foi obtida da empresa Sisalsul Indústria e Comércio Ltda., localizada em São Paulo. A fibra de sisal tipo 2 foi doada pela empresa SALGADALIA Ind. Com. Exportação Ltda., localizada na cidade de Conceição do Coité – Bahia. As fibras de bucha vegetal (*Luffa*

cylindrica) foram adquiridas da empresa Bucha Isa, localizada na cidade de São José dos Campos – São Paulo (Figura 20).

Figura 20 - Fibras: a) Rami, b) Sisal e c) bucha vegetal



b)



c)

Fonte: Autora

As massas específicas das fibras de rami, sisal e bucha vegetal foram determinadas por picnometria, em multipicnômetro com gás Hélio, marca Quantachrome Instruments, 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). As amostras foram previamente secas em estufa, à temperatura de 70 ± 5 °C. Os resultados obtidos

foram de 1,511 g/cm³ para a fibra de sisal, 1,590 g/cm³ para a fibra de rami e 1,490 g/cm³ para a fibra de bucha vegetal.

3.2 Procedimento experimental

3.2.1 Preparação das fibras contínuas unidirecionais

Inicialmente cortaram-se os feixes de fibras com comprimento de aproximadamente 20,5 cm (Figura 21), dimensão das fôrmas utilizadas para a moldagem dos compósitos.

Figura 21 - Feixe de fibras cortadas com aproximadamente 21 cm



Fonte: Autora

Logo após, foram alinhadas unidirecionalmente (Figura 22) e secas em estufa por 24 horas à temperatura de 60°C. O alinhamento foi realizado manualmente para cada feixe de fibras, de modo que cada camada era alinhada e posteriormente sobreposta até conseguir a massa de fibra necessária para cada compósito.

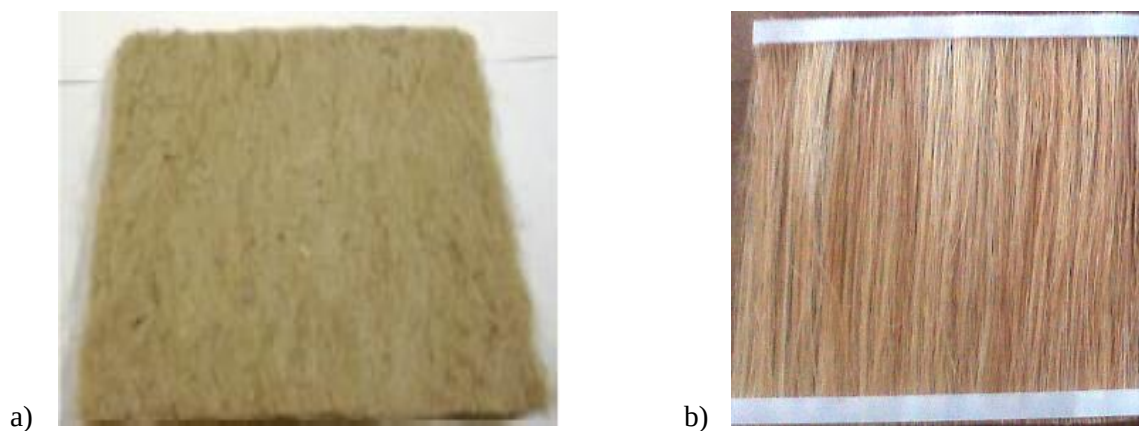
Figura 22 - Preparação das fibras contínuas unidirecionais: a) rami e b) sisal



Fonte: Autora

Mediu-se a massa para garantir a porcentagem de fibras no compósito e compactou-se com carga de 400 kN em uma prensa hidráulica por 24 horas para facilitar a moldagem dos compósitos (Figura 23).

Figura 23 - Fibras compactadas: a) rami e b) sisal



Fonte: Autora

3.2.2 Preparação das fibras descontínuas aleatórias

Para a preparação das fibras descontínuas aleatórias, as fibras de sisal e rami foram cortadas com dimensões de aproximadamente 30 mm (Figura 24).

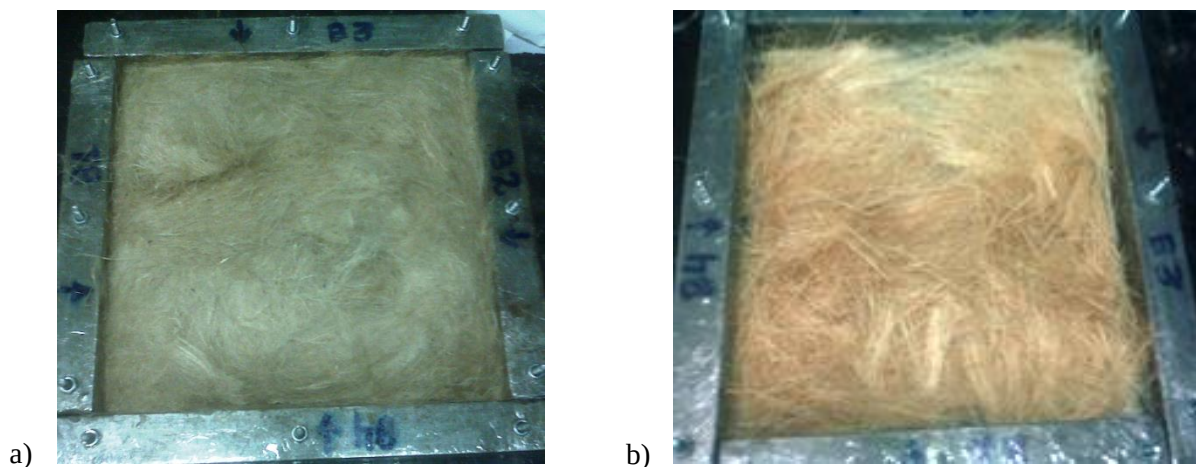
Figura 24 - Fibras descontínuas aleatórias: a) rami e b) sisal



Fonte: Autora

As fibras descontínuas aleatórias foram compactadas com carga de 400kN em uma prensa hidráulica por 24 horas (Figura 25), secas em estufa por 24 horas com temperatura de 60°C e pesadas para verificação da massa e garantir o teor de fibras no compósito.

Figura 25 - Fibras descontínuas aleatórias compactadas: a) rami e b) sisal



Fonte: Autora

3.2.3 Preparação das fibras de bucha vegetal

O processo de preparo constitui em abertura das fibras de bucha vegetal, retirada das sementes presentes em seu interior e corte com comprimento de aproximadamente 20,5 cm (Figura 26).

Figura 26 - Fibra de bucha vegetal



Fonte: Autora

As fibras foram molhadas para facilitar o processo de compactação realizado com aplicação de carga de 400 kN em uma prensa hidráulica por 24 horas (Figura 27), secas em estufa por 24 horas com temperatura de 60°C e pesadas para verificação da massa e garantir o teor de fibras no compósito.

Figura 27 - Fibra de bucha vegetal compactada



Fonte: Autora

3.2.4 Preparação e moldagem dos compósitos

Os compósitos foram preparados por moldagem à compressão em temperatura ambiente utilizando fôrmas metálicas e prensa hidráulica. A fôrma metálica utilizada tem dimensões internas de 20,5 cm x 20,5 cm x 2,5 cm. Estas fôrmas foram protegidas com filme de PVC para facilitar a desmoldagem e limpeza das mesmas (Figura 28).

Figura 28 - Fôrmas metálicas utilizadas para moldagem dos compósitos



Fonte: Autora

As massas necessárias de fibras e resina para garantir o teor de reforço em cada placa de compósito foram determinadas considerando a massa específica das fibras de rami igual a 1,590 g/cm³, da fibra de sisal igual a 1,511 g/cm³, da fibra de bucha vegetal igual a 1,490 g/cm³ e da resina 1,086 g/cm³, conforme apresentado nas tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 – Massa de resina e fibra de rami para preparo dos compósitos

Tipo de Compósito	Teor de fibras em volume (%)	Massa da fibra (g)	Massa de resina (g)
1	25	46,45	188,07
2	35	65,03	212,54
3	45	83,61	237,01
4	55	102,19	261,48

Fonte: Autora

Tabela 8 – Massa de resina e fibra de sisal para preparo dos compósitos

Tipo de Compósito	Teor de fibras em volume (%)	Massa da fibra (g)	Massa de resina (g)
1	25	44,14	183,45
2	35	61,80	206,08
3	45	79,45	228,69
4	55	97,11	251,32

Fonte: Autora

Tabela 9 – Massa de resina e fibra de bucha vegetal para preparo dos compósitos

Tipo de Compósito	Teor de fibras em volume (%)	Massa da fibra (g)	Massa de resina (g)
1	25	43,53	182,23
2	35	60,94	204,36
3	45	78,35	226,49
4	55	95,76	248,62

Fonte: Autora

A espessura do compósito foi fixada em 3,0 mm para o cálculo do volume da placa. Foram adotados teores de 25%, 35%, 45% e 55%, em volume de fibras para cada compósito, por serem valores pouco estudados pela literatura e limitados a 55% em função do processo de moldagem. A massa de resina para garantir a molhabilidade das fibras e baixo teor de vazios nos compósitos foi majorada, sendo que o excesso era eliminado durante a moldagem por compressão.

O processo de preparação dos compósitos com fibras contínuas unidirecionais e descontínuas aleatórias foi realizado em camadas alternadas de resina e fibras para facilitar que a resina ficasse em contato com todas as fibras. O número de camadas adotado foi em função do teor de fibras, sendo 2 camadas para compósitos com 25% e 35%, e 3 camadas para os com 45% e 55% em volume de fibras. Os componentes A e B foram misturados conforme as indicações do fabricante até obter uma mistura homogênea (Figura 29).

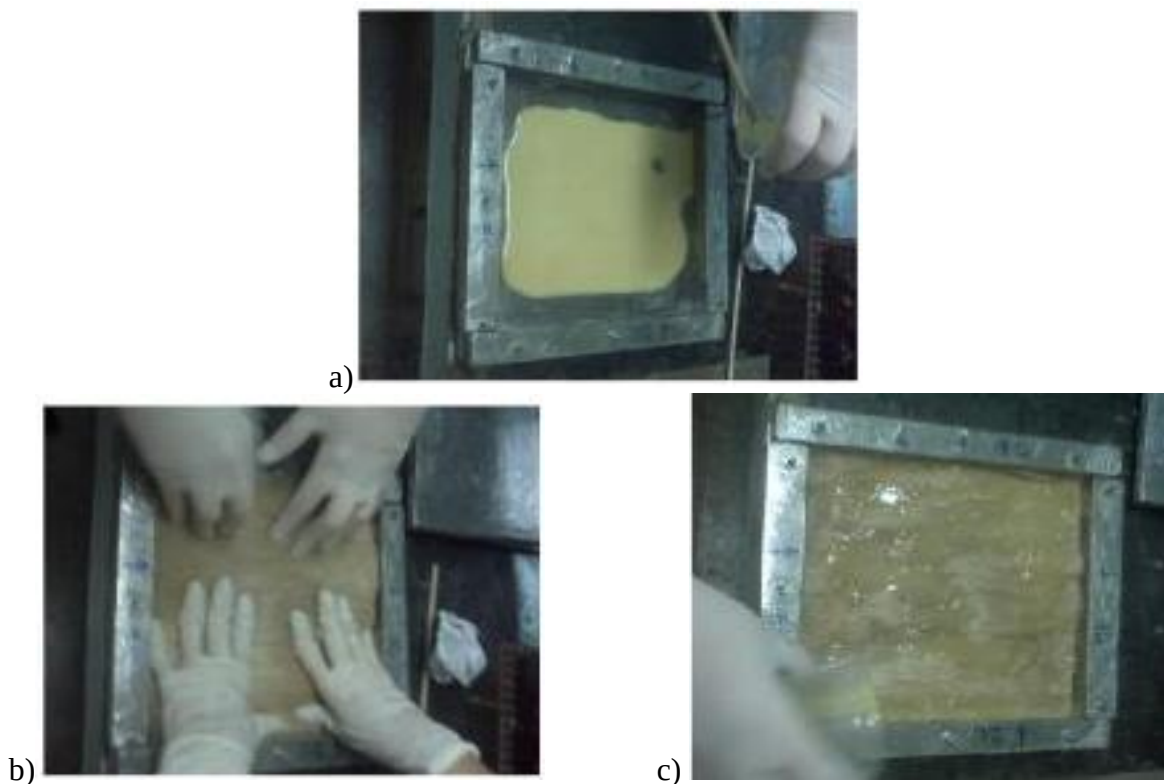
Figura 29 - Mistura dos componentes A e B



Fonte: Autora

Em cada camada colocada era feito o adensamento manual (Figura 30), sendo a variação do número de camadas em função da porcentagem de fibras (25%, 35%, 45% e 55%). O período de preparação variou entre 10 e 15 minutos.

Figura 30 - Preparo dos compósitos: a) lançamento de parte da resina; b) adensamento das fibras; c) lançamento da resina restante



Fonte: Autora

Após o adensamento da última camada de fibras, a fôrma foi fechada com a tampa e colocada em uma prensa hidráulica (Figura 31), marca EMIC, modelo PCN 100/20, capacidade de 1200 kN. Aplicou-se a carga para atingir a espessura fixada e retirou-se o excesso de resina, deixando o compósito permanecer com o carregamento por 24 horas e em processo de cura na fôrma por 48 horas.

Figura 31 - Prensagem para produção do compósito: a) prensa hidráulica; b) fôrma prensada



Fonte: Autora

A preparação dos compósitos com fibras distribuídas aleatoriamente foi mais fácil e prática, comparada aos compósitos com fibras contínuas unidirecionais, por dispensar o alinhamento. Para a produção dos compósitos houve variação da carga aplicada em função dos diferentes teores de fibras, conforme Tabela 10. O compósito com resina poliuretana sem fibras moldado a temperatura ambiente teve o processo dificultado pela quantidade de vazios formados e a solução encontrada foi moldar a vácuo, o que permitiu reduzir boa parte dos vazios.

Tabela 10 – Carga aplicada na preparação dos compósitos

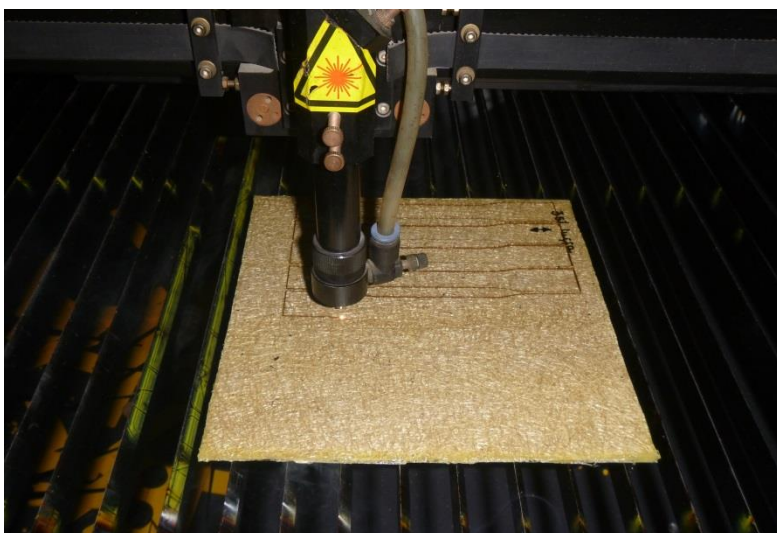
Tipo de compósito	Teor de fibras em volume (%)	Carga (kN)
Rami/Poliuretano	25	500
	35	700
	45	960
	55	1190
Sisal/Poliuretano	25	550
	35	750
	45	960
	55	1180
Bucha vegetal/Poliuretano	25	300
	35	560
	45	900
	55	1180

Fonte: Autora

3.2.5 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram obtidos a partir do corte das placas de compósitos produzidas para realizar o ensaio de tração. O procedimento de corte foi realizado em uma máquina de corte a laser (Figura 32).

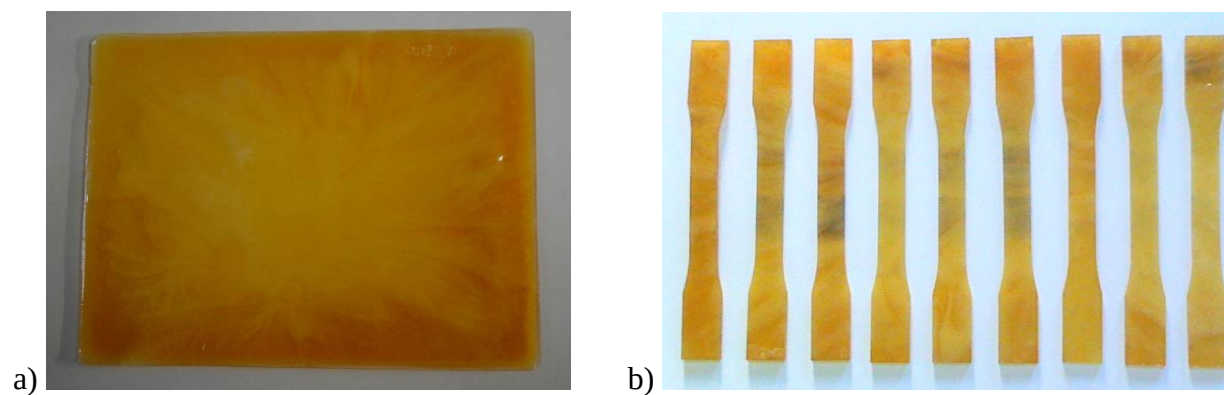
Figura 32 - Corte dos compósitos a laser



Fonte: Autora

Foram obtidos 9 corpos de prova da placa de resina pura e para cada placa de compósito (Figura 33, 34, 35, 36, 37 e 38).

Figura 33 - Resina poliuretana à base de óleo de mamona: a) placa e b) corpos de prova



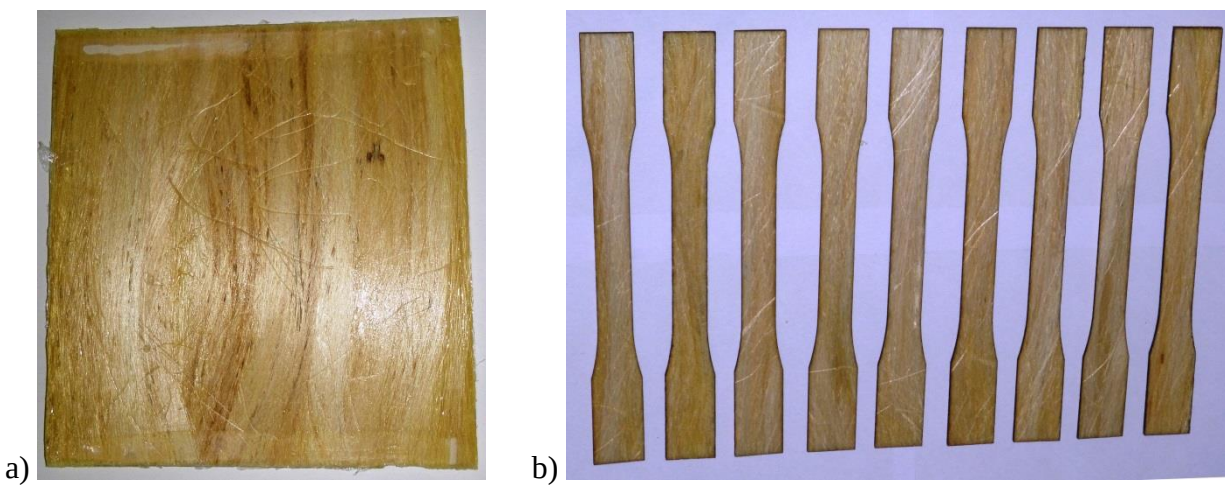
Fonte: Autora

Figura 34 – Compósito com fibras de rami contínuas dispostas unidirecionalmente: a) placa e b) corpos de prova



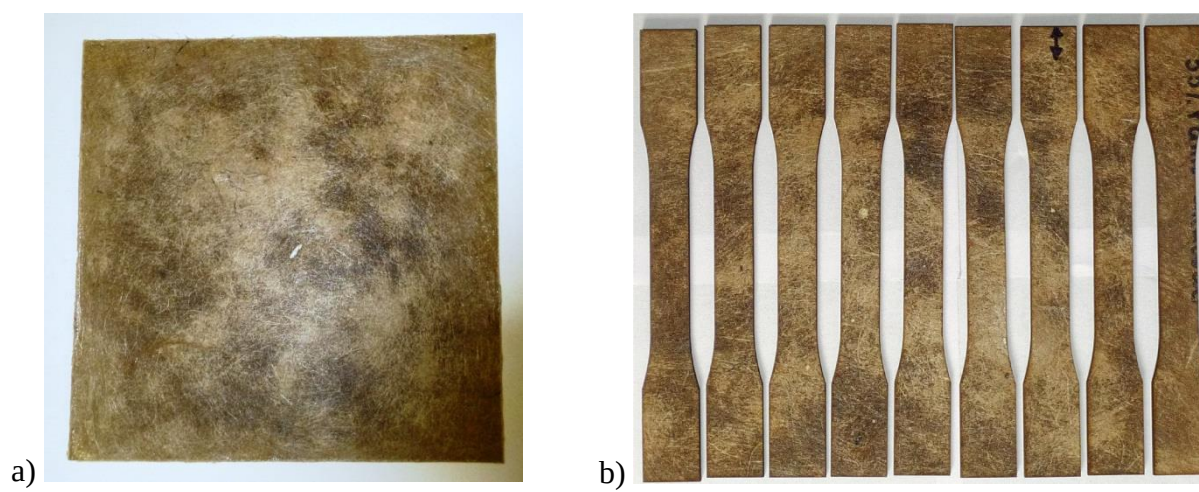
Fonte: Autora

Figura 35 - Compósito com fibras de sisal contínuas dispostas unidirecionalmente: a) placa e b) corpos de prova



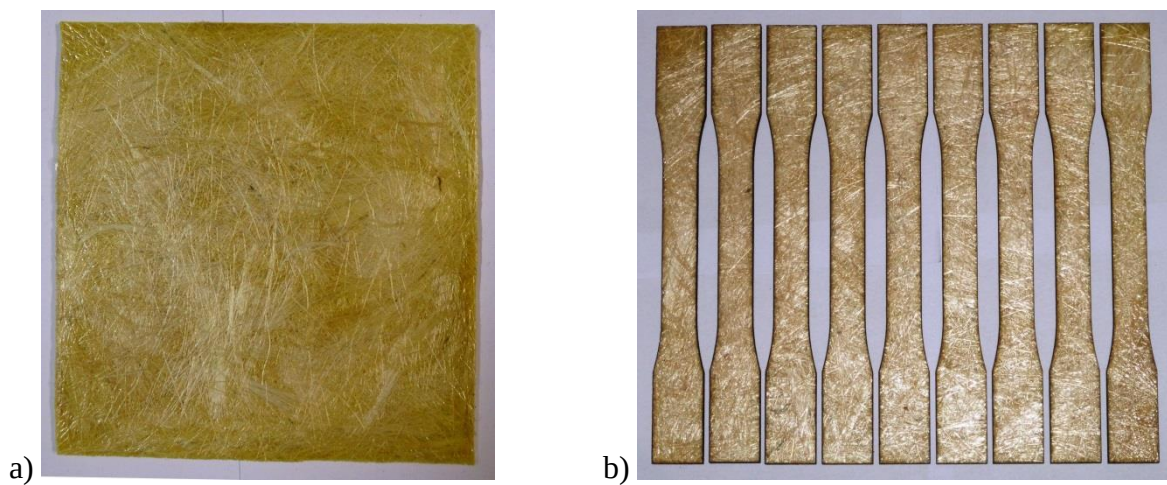
Fonte: Autora

Figura 36 - Compósito com fibras de rami descontínuo dispostas aleatoriamente: a) placa e b) corpos de prova



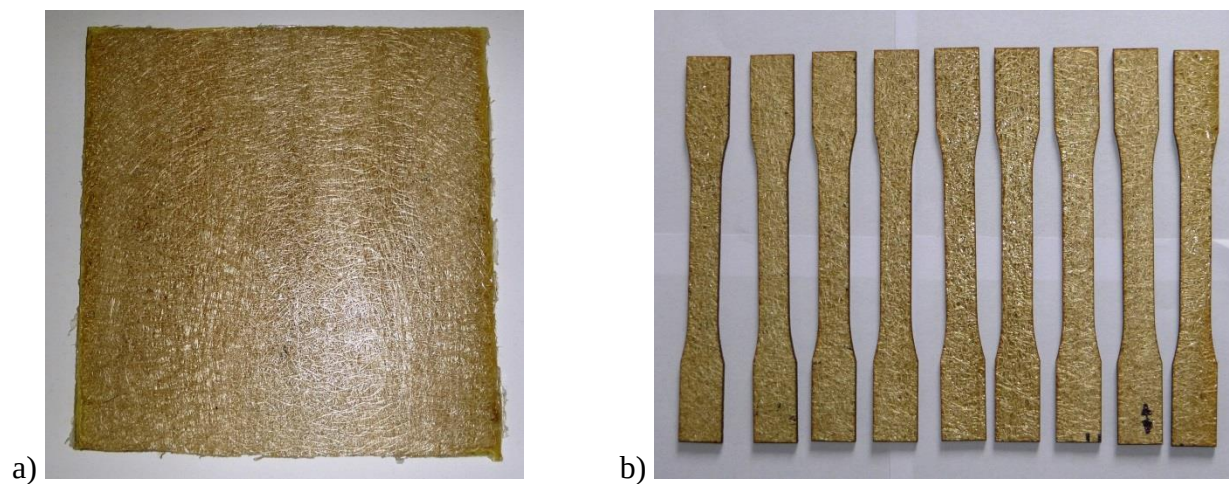
Fonte: Autora

Figura 37 - Compósito com fibras de sisal descontínuo dispostas aleatoriamente: a) placa e b) corpos de prova



Fonte: Autora

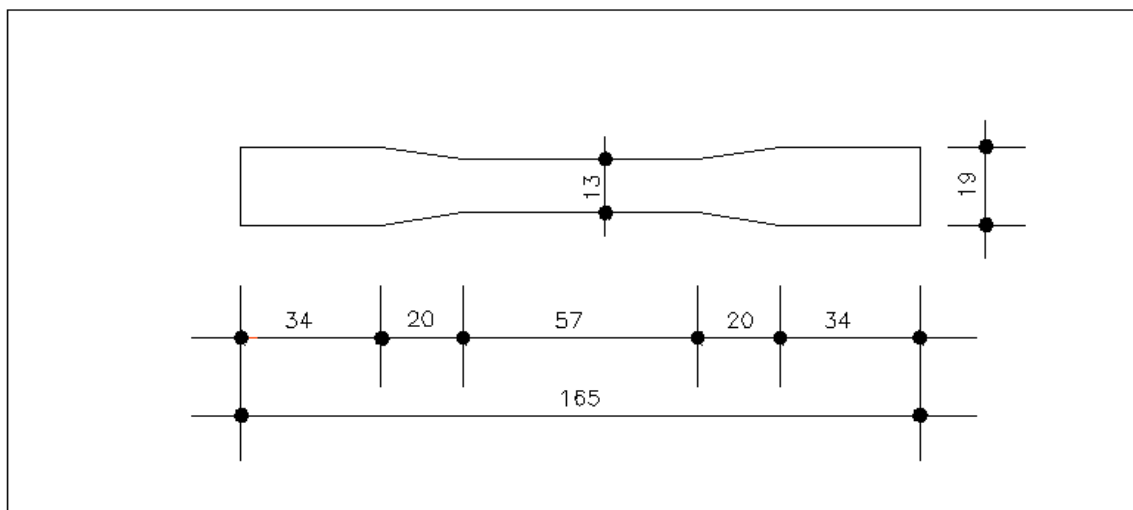
Figura 38 - Compósito com fibras de bucha vegetal: a) placa e b) corpos de prova



Fonte: Autora

A ASTM D638:2012 recomenda as dimensões adotadas conforme Figura 39 para os corpos de prova dos compósitos para ensaio de tração.

Figura 39 - Dimensões dos corpos de prova dos compósitos



Fonte: ASTM D638:2012

3.2.6 Análise estatística

A estatística é importante para organização e tratamento dos resultados experimentais, para obtenção de conclusões plausíveis baseadas em análises. Segundo Meyer (1974) e Spiegel (1985), a análise estatística utilizada é denominada teoria das pequenas amostras, no caso *Student t*, desenvolvida por William Sealy Gosset. É uma distribuição de probabilidade estatística aplicável para amostras pequenas ($N < 30$). Esta distribuição amostral é determinada pela seguinte relação:

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s/\sqrt{n}}$$

Sendo:

- t : distribuição amostral;
- $\bar{X}$: média amostral;
- μ : média da população;
- s : desvio padrão da amostra;
- n : número de amostras.

A distribuição *Student t* varia em função da dimensão da amostra que vai determinar o número de graus de liberdade. A curva tem formato semelhante à apresentada pela distribuição normal, que é forma de sino, onde o parâmetro que define e caracteriza é o grau de liberdade (MEYER, 1974; SPIEGEL, 1985).

O tratamento estatístico foi utilizado a partir da distribuição *Student t* para tratar os resultados obtidos no ensaio de tração dos compósitos, com a finalidade de retirar os resultados discrepantes. O excel foi utilizado para facilitar a aplicação do tratamento estatístico, conforme exemplo apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 - Exemplo de tratamento estatístico de compósito com rami aleatório 35% em volume

DADOS ORIGINAIS			
Corpo de Prova	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação máxima (%)
CP1	4.929,29	37,66	0,02305
CP2	7.963,54	50,12	0,02414
CP3	7.786,09	49,14	0,01926
CP4	15.151,90	57,56	0,02175
CP5	8.431,87	60,77	0,02631
CP6	7.284,28	49,47	0,02152
CP7	6.274,32	44,56	0,01874
CP8	3.793,98	42,61	0,0222
CP 9	5.253,20	45,34	0,0245
Média	7.429,83	48,58	0,02
Desvio padrão	3.290,37	7,19	0,002440246
Coeficiente de variação	44,29	14,81	10,90
TRATAMENTO ESTATÍSTICO			
RESUMO - PROPRIEDADES MECÂNICAS			
Quantidade de CP	9		
Intervalo de Confiança	95%		
t Student	2,306004135		
Módulo de Elasticidade (GPa)			
4900,627439	$< \mu <$		9959,037281
Resistência a tração (MPa)			
43,05136093	$< \mu <$		54,11191907

Deformação máxima (%)			
0,020509816	$< \mu <$	0,024261295	
DADOS SELECIONADOS ESTATISTICAMENTE			
Corpo de Prova	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação máxima (%)
CP1	4.929,29		0,02305
CP2	7.963,54	50,12	0,02414
CP3	7.786,09	49,14	
CP4			0,02175
CP5	8.431,87		
CP6	7.284,28	49,47	0,02152
CP7	6.274,32	44,56	
CP8			0,0222
CP 9	5.253,20	45,34	
Média	6.846,09	47,73	0,022532
Desvio padrão	1.377,03	2,57	0,001072367
Coeficiente de variação	20,11	5,39	4,76

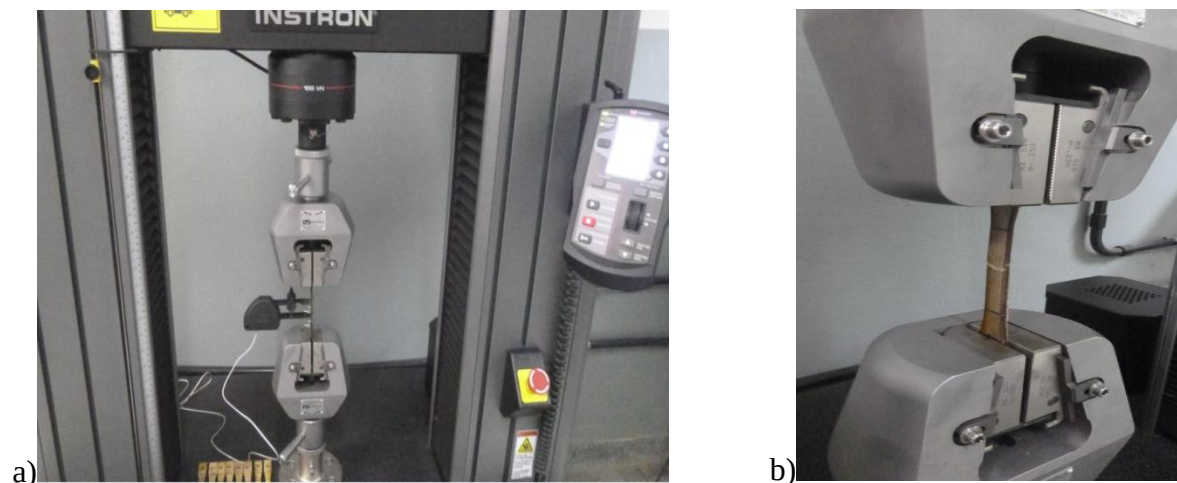
Fonte: Autora

Os valores para a resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação máxima após o tratamento estatístico de cada compósito estão apresentados no apêndice A.

3.2.7 Ensaio de tração

Para realização do ensaio de tração (Figura 40) foram adotados os procedimentos da norma ASTM D3039:2008. O equipamento utilizado foi a máquina universal de ensaios Instron modelo 5982 com célula de carga de 100kN. A velocidade de carregamento foi de 2 mm/min. Para medir o alongamento foi utilizado um extensômetro da marca Instron.

Figura 40 - Ensaio de tração dos compósitos: a) realização do ensaio; b) ruptura do corpo de prova



Fonte: Autora

A partir do ensaio de tração determinou-se para cada compósito, o módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação máxima. O módulo de elasticidade foi determinado na fase elástico linear pela tangente da curva tensão e deformação, para deformação de até 0,3%. Adotou-se este parâmetro para a retirada do extensômetro, pois esta deformação permite determinar o módulo de elasticidade com precisão e reduz o risco de danos ao equipamento, por não atingir a ruptura dos corpos de prova ainda com o mesmo em uso.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Massa específica da resina poliuretana à base de óleo de mamona

A massa específica média da resina poliuretana à base de óleo de mamona, obtida pela relação entre massa e volume, foi de 1,086 g/cm³, conforme apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 – Cálculo da massa específica da resina poliuretana curada

Corpo de prova	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Volume (cm ³)	Massa (g)	Massa específica (g/cm ³)
1	20,210	8,500	1,680	1,830	1,086
2	20,210	8,330	1,639	1,780	1,086
3	19,240	6,990	1,195	1,280	1,071
4	17,690	5,100	0,696	0,760	1,091
5	17,380	5,020	0,662	0,730	1,100
6	17,260	4,800	0,619	0,670	1,081
Média					1,086

Fonte: Autora

4.2 Teor de fibras nos compósitos

Após o processo de cura dos compósitos, a placa foi retirada da fôrma, pesada e medida a espessura real, para calcular a quantidade real de fibras e de resina, conforme apresentado pelas Tabelas 13, 14, 15, 16 e 17. Foram adotados teores nominais de 25%, 35%, 45% e 55% de fibras, em volume, para reforço da matriz nos compósitos, por serem valores pouco estudados pela literatura e limitados pelo processo de moldagem.

Tabela 13 - Teores finais de fibras dos compósitos de rami contínuo unidirecional

Compósito (%)	Espessura (cm)	Volume compósito (cm ³)	Massa compósito (g)	Massa seca fibras (g)	Massa resina (g)	Densidade (g/cm ³)	Teor final de fibras (%)
25	0,447	187,64	163,61	81,71	81,90	0,872	27,38
35	0,246	103,38	113,10	60,21	52,89	1,094	36,62
45	0,314	126,16	140,85	89,13	51,72	1,116	44,44
55	0,298	125,23	145,21	100,41	44,80	1,159	50,43

Fonte: Autora

Tabela 14 – Teores finais de fibras dos compósitos de rami descontínuo aleatório

Compósito (%)	Espessura (cm)	Volume compósito (cm ³)	Massa compósito (g)	Massa seca fibras (g)	Massa resina (g)	Densidade (g/cm ³)	Teor final de fibras (%)
25	0,347	142,88	150,61	51,63	98,98	1,054	22,70
35	0,300	116,85	130,20	65,13	65,07	1,114	35,05
45	0,331	132,82	156,17	89,72	66,45	1,154	43,77
55	0,267	112,21	122,77	93,85	28,92	1,094	52,60

Fonte: Autora

Tabela 15 – Teores finais de fibras dos compósitos de sisal contínuo unidirecional

Compósito (%)	Espessura (cm)	Volume compósito (cm ³)	Massa compósito (g)	Massa seca fibras (g)	Massa resina (g)	Densidade (g/cm ³)	Teor final de fibras (%)
25	0,305	118,80	78,92	48,48	30,44	0,664	27,01
35	0,235	98,76	98,75	57,96	40,79	1,000	38,84
45	0,191	80,27	85,20	58,44	26,76	1,061	48,19
55	0,220	92,45	106,39	78,18	28,21	1,151	55,97

Fonte: Autora

Tabela 16 – Teores finais de fibras dos compósitos de sisal descontínuo aleatório

Compósito (%)	Espessura (cm)	Volume compósito (cm ³)	Massa compósito (g)	Massa seca fibras (g)	Massa resina (g)	Densidade (g/cm ³)	Teor final de fibras (%)
25	0,361	151,29	115,06	56,78	58,28	0,760	24,84
35	0,311	121,13	100,84	61,84	39,00	0,832	33,79
45	0,366	142,56	150,59	97,33	53,26	1,056	45,18
55	0,350	136,32	150,71	104,02	46,69	1,106	50,50

Fonte: Autora

Tabela 17 – Teores finais de fibras dos compósitos de bucha vegetal

Compósito (%)	Espessura (cm)	Volume compósito (cm ³)	Massa compósito (g)	Massa seca fibras (g)	Massa resina (g)	Densidade (g/cm ³)	Teor final de fibras (%)
25	0,316	123,08	87,28	47,81	39,47	0,709	26,07
35	0,249	96,98	75,53	47,86	27,67	0,779	33,12
45	0,321	125,03	116,73	83,31	33,42	0,934	44,72
55	0,330	128,53	134,30	102,89	31,41	1,045	53,73

Fonte: Autora

4.3 Propriedades mecânicas determinadas pelo ensaio de tração

Os corpos de prova referentes a cada volume de fibra dos compósitos foram ensaiados à tração até a ruptura. As propriedades mecânicas obtidas para a resina poliuretana, compósitos reforçados com fibras de rami descontínuo aleatório, rami contínuo unidirecional, sisal descontínuo aleatório, sisal contínuo unidirecional e bucha vegetal são apresentados a seguir.

4.3.1 Resina poliuretana

Os resultados obtidos na caracterização da resina poliuretana à base de óleo de mamona estão apresentados na Tabela 18. É possível observar que os valores obtidos para o módulo de elasticidade, resistência à tração e deformação máxima estão discrepantes dos citados pela literatura, mas a resistência está próximo ao indicado pelo fabricante. Esta variação pode ser

devido à grande gama de rigidez em que a resina poliuretana pode ser produzida (SILVA, 2003), resultando em propriedades distintas para diferentes fabricantes.

Tabela 18 – Propriedades mecânicas da resina de poliuretana à base de óleo de mamona

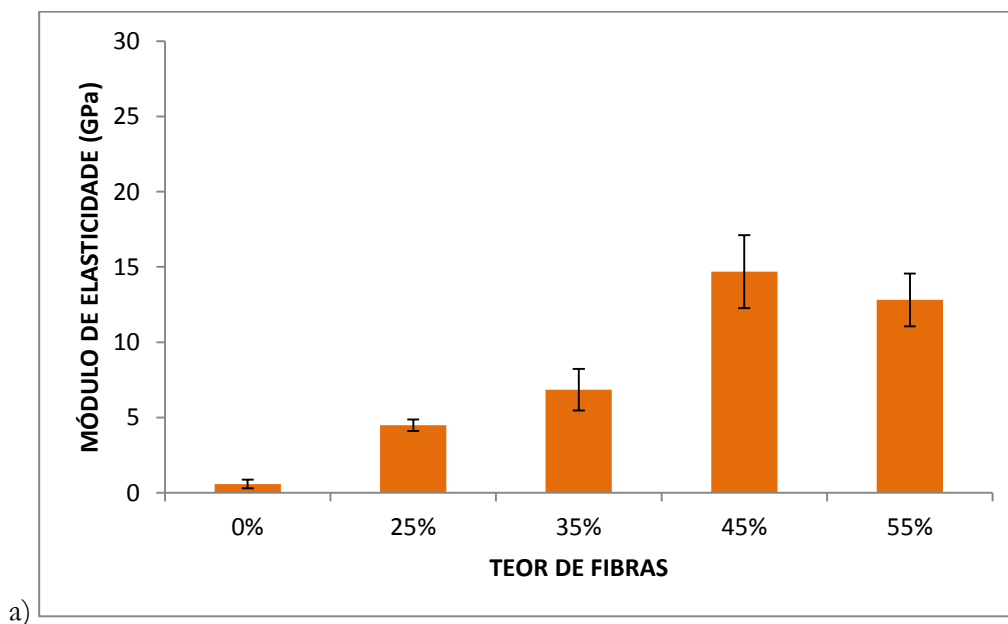
Poliuretano	Massa específica (g/cm³)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Deformação máxima (%)
Autora	1,086	9,99	0,58	6,30
Silva (2003)	1,17 ^A e 0,98 ^B	40,00	2,00	9,80
Carvalho (2003)	-	1,23	0,00625	120,79

Fonte: Autora

4.3.2 Compósitos de fibras de rami descontínuo aleatório

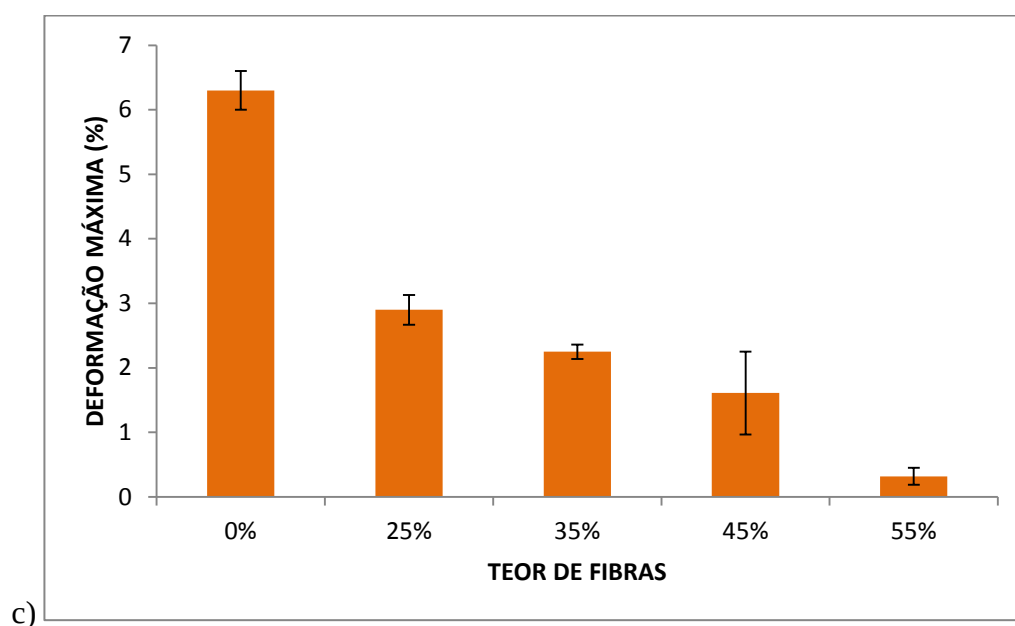
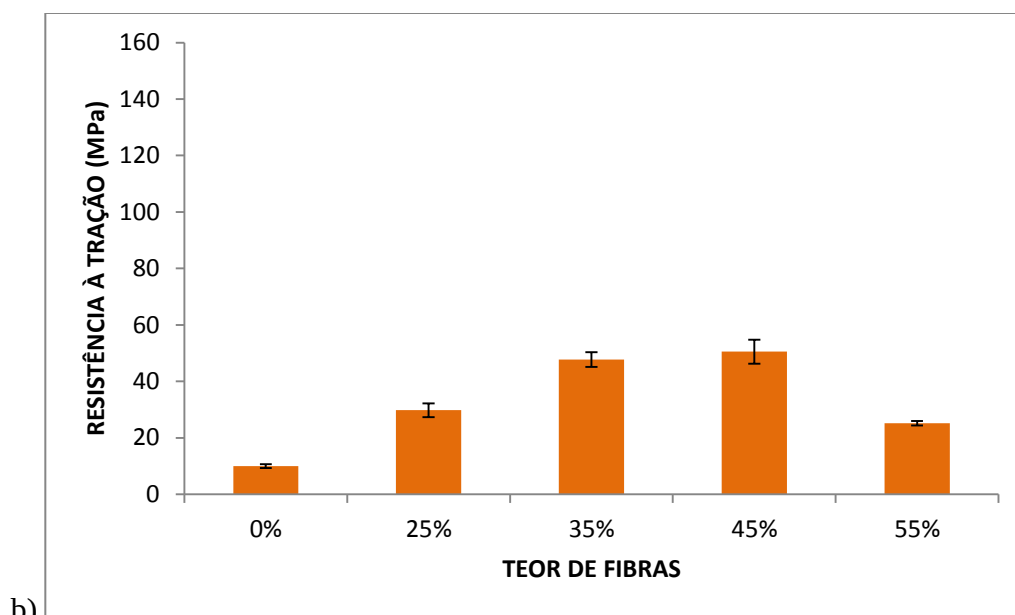
Com a variação dos teores de fibras de rami descontínuo aleatório em 25%, 35%, 45% e 55%, em volume, foram obtidos os resultados apresentados na Figura 41.

Figura 41 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de rami descontínuas dispostas aleatoriamente: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação máxima



^A Pré-polímero

^B Poliol



Fonte: Autora

A partir da variação do teor de fibras de 0% para 25%, 35%, 45% e 55% em volume, os resultados mostram que com a incorporação de fibras na matriz a resistência à tração e o módulo de elasticidade apresentaram melhora expressiva. Analisando os gráficos é possível observar que o máximo valor do módulo de elasticidade e da resistência à tração ocorreu para o compósito com 45% de fibras em volume, valor de 14,69 GPa para o módulo e 50,51 MPa para a

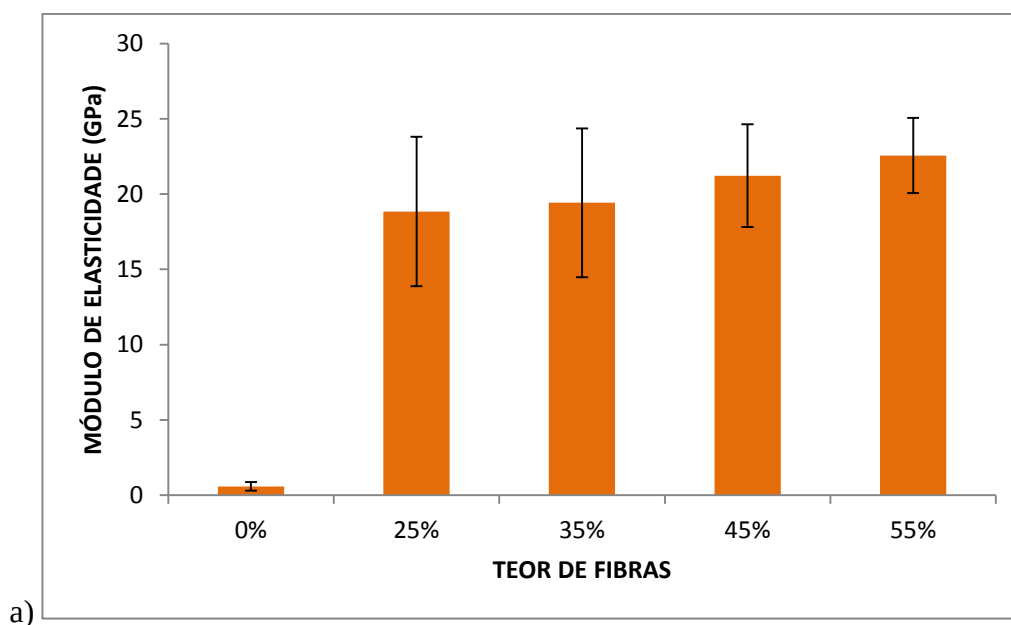
resistência, volume este considerado como crítico. A deformação máxima apresentada pelos corpos de prova diminuiu consideravelmente à medida que foi se acrescentando fibra na matriz, comportamento esperado, considerando a natureza da matriz e das fibras de reforço, matriz flexível, com grande deformação e fibras com alto módulo.

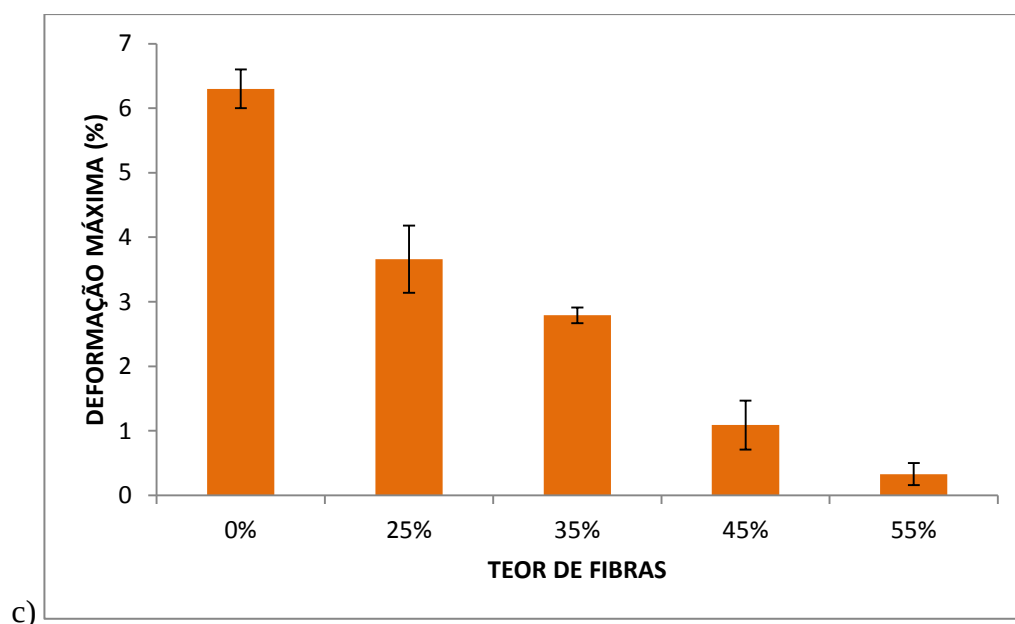
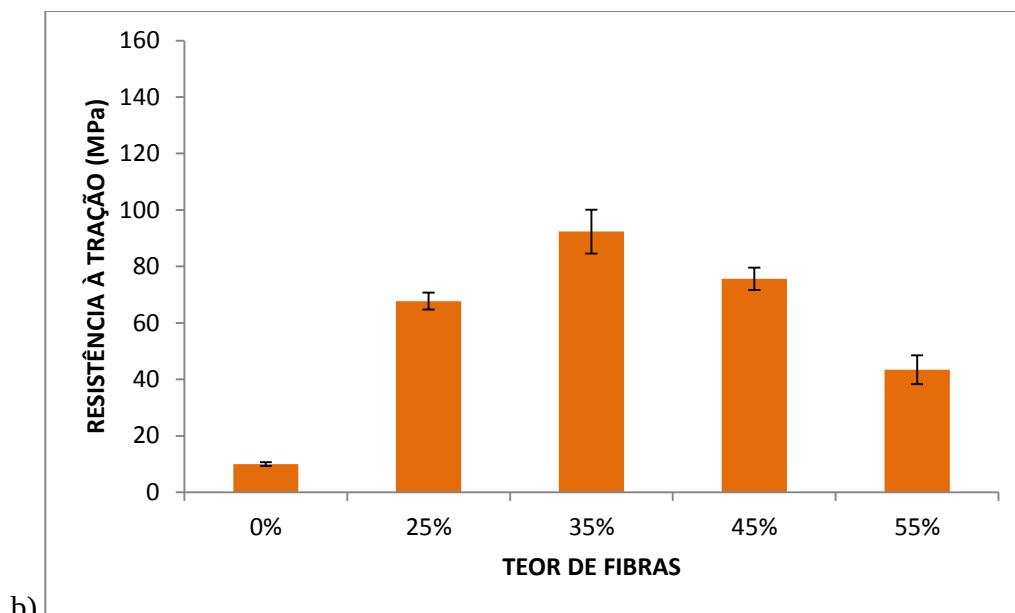
Nos resultados dos compósitos com 55% de rami distribuído aleatoriamente observou-se que ocorreu redução do módulo e da resistência. Isto pode estar relacionado com as dificuldades de processamento para os elevados teores de fibras, resultando em aprisionamento de bolhas em maior número e quantidade de resina insuficiente para garantir boa interface entre as fibras e matriz.

4.3.3 Compósitos de fibras de rami contínuo unidirecional

Com a variação dos teores de fibras de rami contínuo unidirecional em 25%, 35%, 45% e 55%, em volume, foram obtidos os resultados das propriedades mecânicas dos compósitos, apresentadas na Figura 42.

Figura 42 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de rami contínuas dispostas unidirecionalmente: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação máxima





Fonte: Autora

Os resultados mostraram que o módulo de elasticidade e a resistência à tração os compósitos aumentaram significativamente com a incorporação de fibras na matriz. Conforme ocorreu a variação do teor de fibras de 0% para 25%, em volume, houve aumento de 3148% e 578% no módulo de elasticidade e resistência à tração, respectivamente. Os valores máximos para o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos compósitos foram obtidos para o teor de 55% e 35% de volume de fibra, 22,56 GPa e 92,36 MPa, respectivamente, atingindo um aumento

percentual de 3789,65% no módulo e 824,52% na resistência, em relação à matriz, e de 36,42% no módulo e 14,40% na resistência, em relação ao volume de 25% de fibra. O volume crítico foi de 55% e 35%, de teores de fibras dos compósitos com rami contínuo unidirecional, para o módulo de elasticidade e resistência à tração, respectivamente, devendo o teor ser selecionado em função da necessidade para aplicação.

A deformação máxima na ruptura, com a incorporação de fibras apresentou diminuição em relação à matriz sem fibras. A melhora do módulo de elasticidade com o incremento do teor de fibras é expressiva para o teor de 55% em volume, sendo importante ressaltar que o bom resultado do módulo é devido às boas propriedades da fibra de rami e pelo tipo de orientação utilizada.

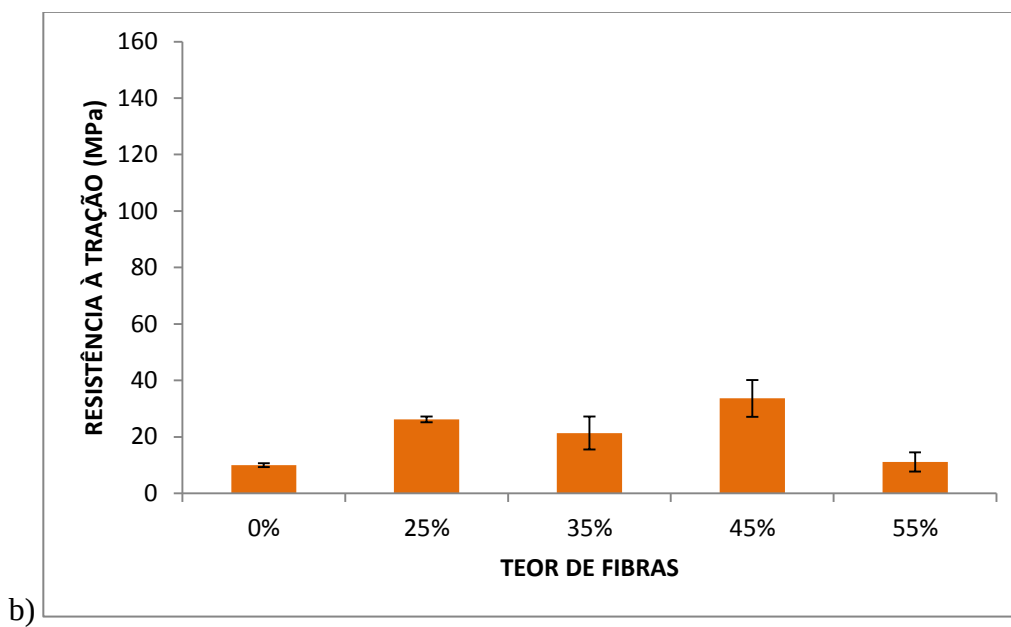
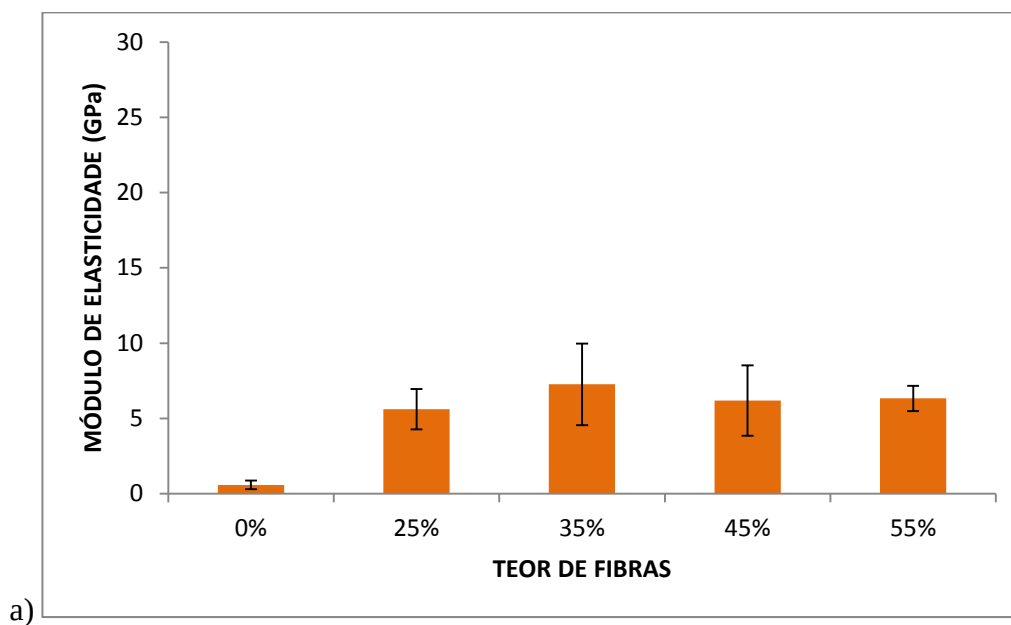
4.3.4 Compósitos de fibras de sisal descontínuo aleatório

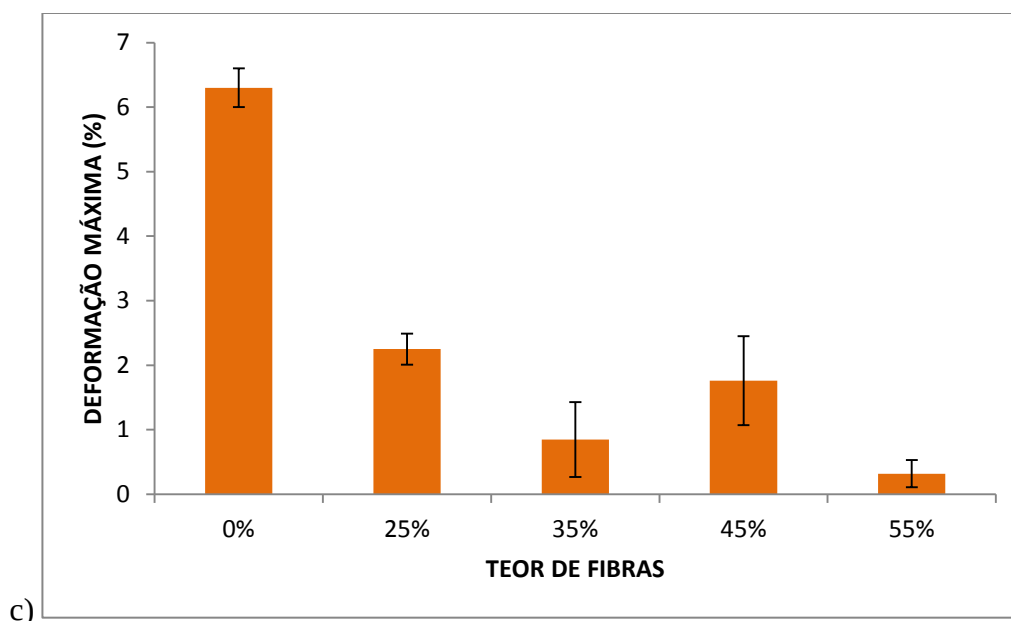
Com os diferentes teores de fibras de sisal descontínuo aleatório de 25%, 35%, 45% e 55%, em volume, foram obtidos os resultados das propriedades mecânicas dos compósitos, apresentadas na Figura 43.

Com a incorporação de fibras à matriz, ocorreu melhora dos resultados para o módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos. Conforme ocorreu a variação do teor de fibras de 0% para 25%, em volume, houve aumento de 868,96% e 162,56% no módulo de elasticidade e resistência à tração, respectivamente. Os valores máximos para o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos compósitos foram obtidos para teores considerados como críticos de 35% e 45% de volume de fibra, 7,27GPa e 33,65MPa, respectivamente, atingindo um aumento percentual de 1153,45% no módulo e 236,84% na resistência, em relação à matriz, e de 29,36% no módulo e 28,29% na resistência, em relação ao volume de 25% de fibra.

A deformação máxima na ruptura foi semelhante aos compósitos de rami ao incorporar fibras à matriz, resultando na redução significativa comparada à matriz sem fibras.

Figura 43 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de sisal descontínuas dispostas aleatoriamente: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação máxima





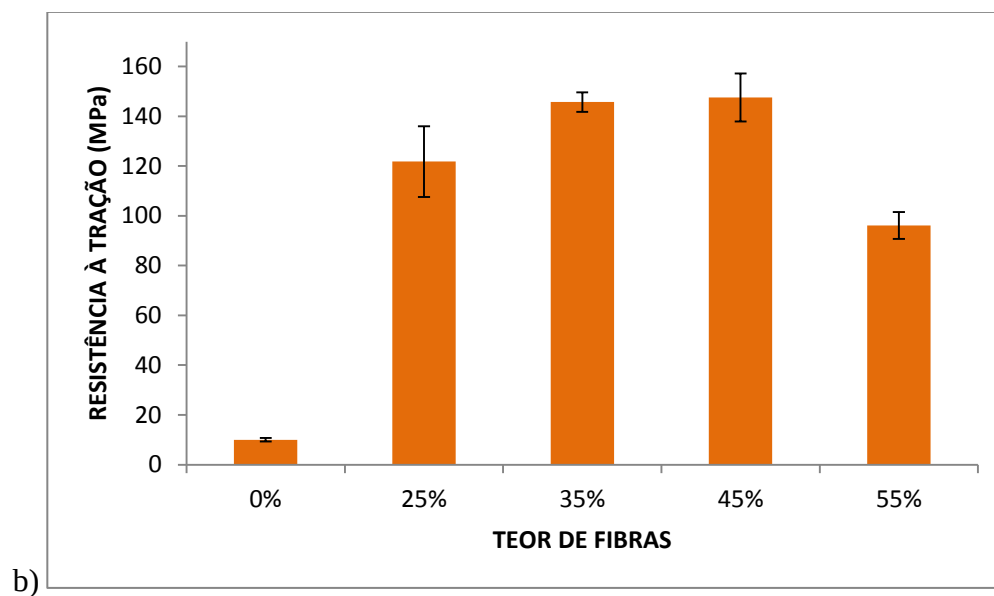
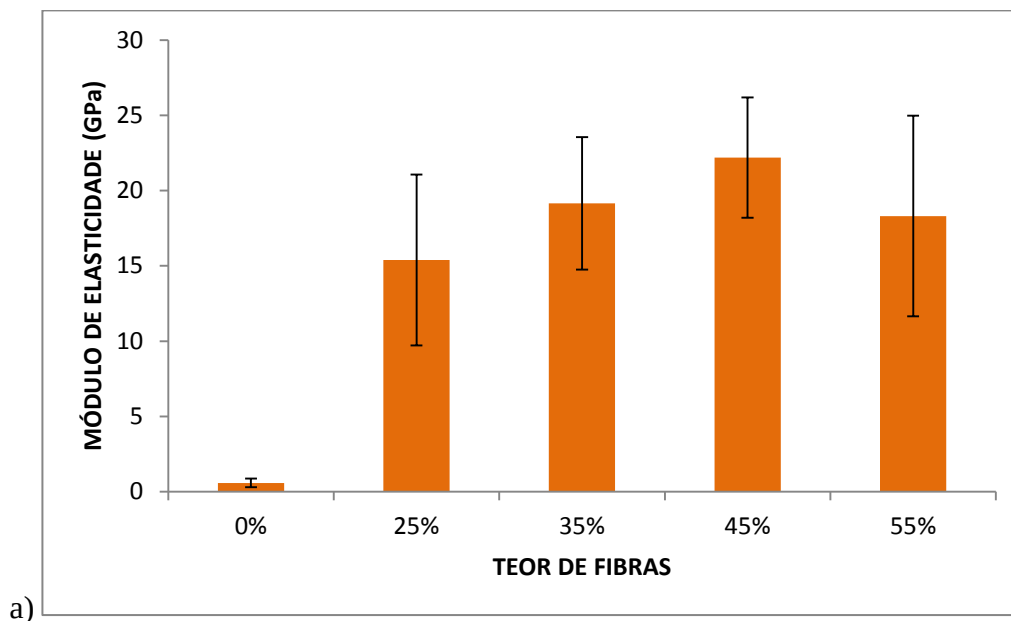
Fonte: Autora

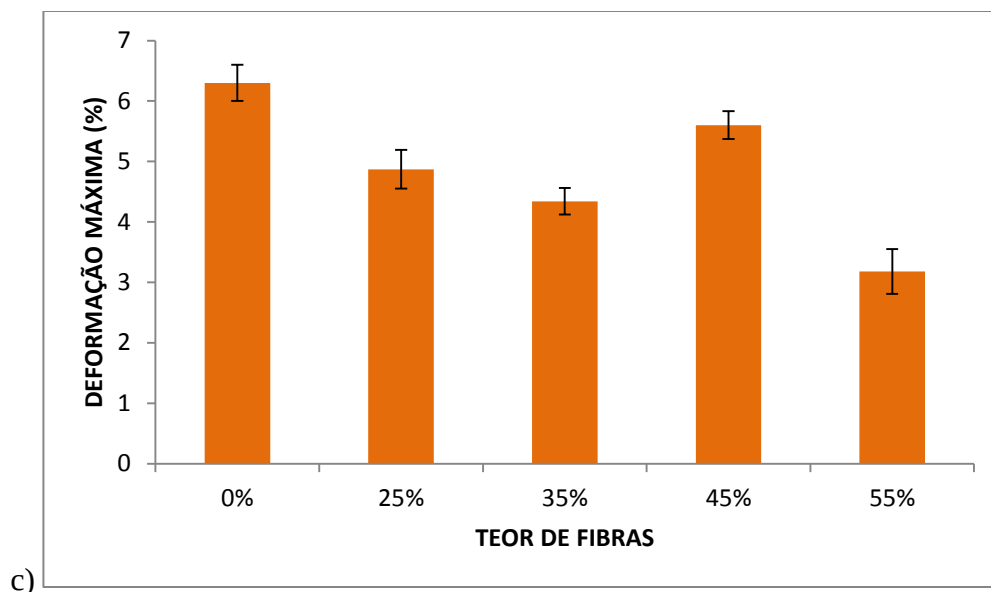
Ao incrementar fibras distribuídas aleatoriamente na matriz poliuretana obteve-se o desempenho dos compósitos com sisal inferior àqueles com rami, provavelmente em função do diâmetro e do tipo de orientação adotada para as fibras. Isto pode ter sido mais influente nos compósitos com fibras de sisal do que com fibras de rami devido às maiores dimensões da seção transversal do sisal, ou seja, para o mesmo volume de fibras na matriz, os compósitos com rami tem maior área de contato entre fibra e matriz, pois a fibra de rami é muito mais fina do que a de sisal e apresenta maior número de fibras por unidade de massa. Como a resina poliuretana tem boa compatibilidade com as fibras vegetais, quanto maior a área de contato, melhor será a redistribuição das tensões entre matriz e fibra, especialmente se a solicitação não coincide com a direção longitudinal das fibras, como é o caso do compósito com fibras distribuídas aleatoriamente.

4.3.5 Compósitos de fibras de sisal contínuo unidirecional

Os resultados obtidos para os compósitos com as fibras de sisal contínuo unidirecional nos teores 25%, 35%, 45% e 55%, em volume, são apresentados na Figura 44.

Figura 44 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de sisal contínuas dispostas unidirecionalmente: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação máxima





Fonte: Autora

A incorporação de fibras de sisal à matriz implicou em aumento significativo nos valores do módulo de elasticidade e da resistência à tração dos compósitos. Conforme ocorreu a variação do teor de fibras de 0% para 25%, em volume, houve aumento de 2553,45% no módulo de elasticidade e 1119,12% na resistência à tração. Os valores máximos para o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos compósitos foram obtidos para o teor de 45% de volume de fibra, 22,19 GPa e 147,55 MPa, respectivamente, sendo, portanto, este o volume crítico de fibras para os compósitos reforçados com fibras de sisal contínuas unidirecional.

A deformação máxima na ruptura, com a incorporação de fibras, apresentou uma diminuição em relação à matriz sem fibras, no entanto foi menor do que nos compósitos com sisal distribuídos aleatoriamente e com fibras de rami.

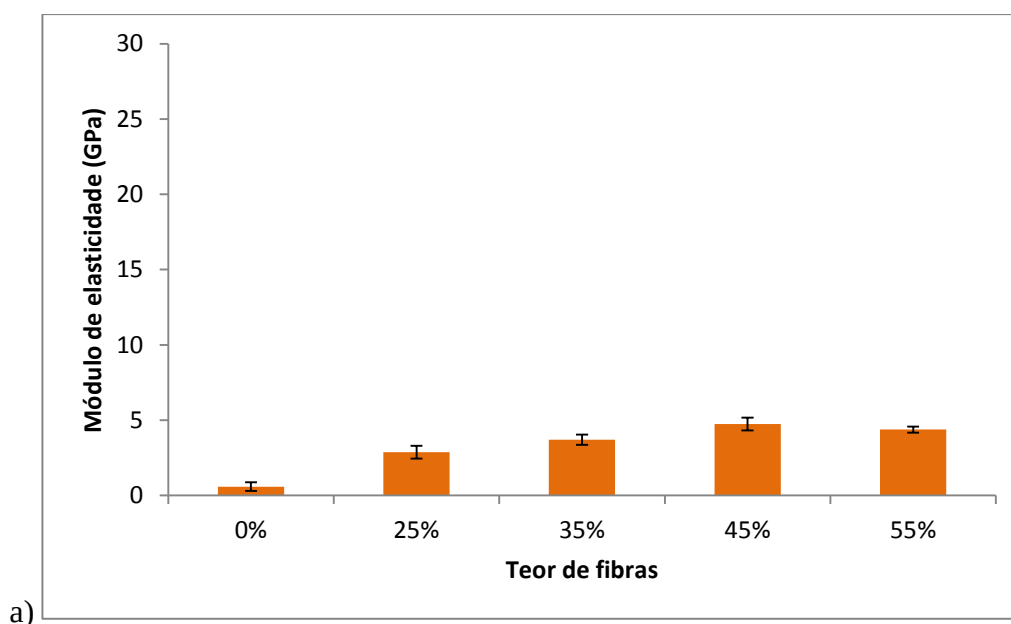
A melhora das propriedades mecânicas com o incremento do teor de fibras é expressiva até o teor de 45% em volume. É importante ressaltar que o bom resultado do módulo e resistência é devido às boas propriedades da fibra de sisal, da orientação longitudinal das fibras no sentido do carregamento e pela boa interface fibra e matriz.

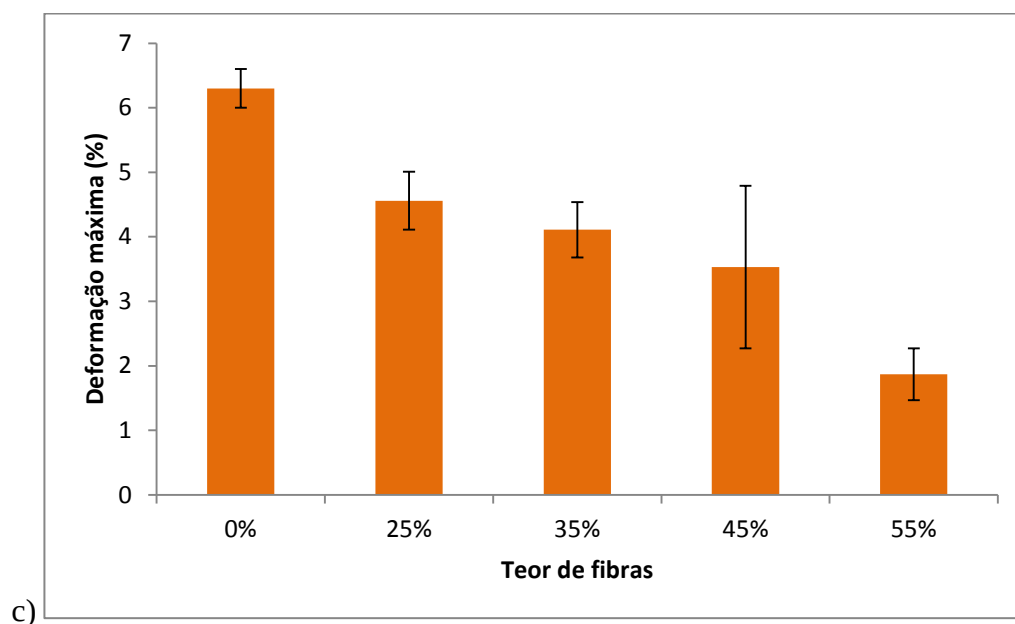
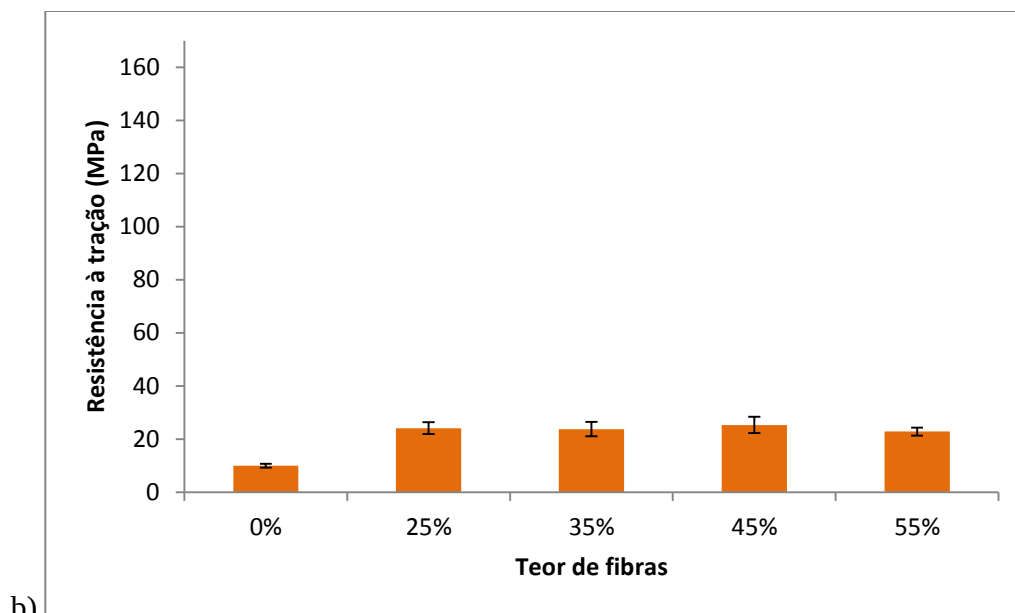
Observou-se redução do módulo de elasticidade e da resistência à tração nos compósitos com 55% de sisal alinhado unidirecionalmente. Esta redução pode ser relacionada com as dificuldades de processamento para os elevados teores de fibras, o que pode ter resultando no aprisionamento de vazios em maior número. Outro fator relevante é a seção transversal grande da fibra de sisal e a quantidade de resina insuficiente para garantir boa interface fibra e matriz, o que dificulta a redistribuição das tensões da matriz para as fibras em função da menor área de contato.

4.3.6 Compósitos de fibras de bucha vegetal

A Figura 45 apresenta os valores obtidos para as propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras de bucha vegetal em 25%, 35%, 45% e 55%, em volume.

Figura 45 - Propriedades mecânicas dos compósitos com fibras de bucha vegetal: a) Módulo de elasticidade; b) Resistência à tração; c) Deformação máxima





Fonte: Autora

Os resultados mostraram que o módulo de elasticidade e a resistência à tração dos compósitos não tiveram aumento tão expressivo com a incorporação das fibras de bucha na matriz, comparados aos compósitos com fibras de rami e sisal alinhados. Conforme ocorreu a variação do teor de fibras de 0% para 25%, em volume, houve aumento de 394,83% e 141,64% no módulo de elasticidade e resistência à tração, respectivamente. Os valores máximos para o

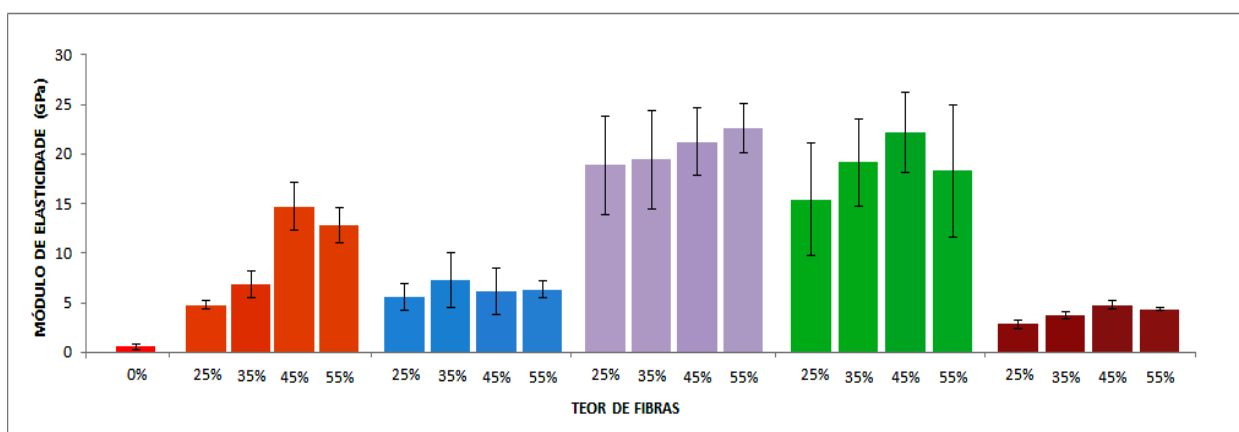
módulo de elasticidade e resistência à tração dos compósitos foram obtidos para o teor de 45% de volume de fibra, 4,74 GPa e 25,32 MPa, respectivamente, atingindo um aumento percentual de 717,24% no módulo e 153,45% na resistência, em relação à matriz, e de 65,16 % no módulo e 4,89% na resistência, em relação ao volume de 25% de fibra. Compósitos com 45% de fibras de bucha vegetal foi considerado como volume crítico, não apresentando propriedades superiores quando acrescentado maior teor de fibras.

Com a incorporação de fibras de bucha vegetal, a deformação máxima diminuiu quando comparada a matriz sem fibras, apresentando comportamento semelhante aos reforçados com sisal distribuídos aleatoriamente.

4.3.7 Comparativo entre compósitos

Os compósitos de bucha vegetal e sisal descontínuo aleatório apresentaram comportamento do módulo de elasticidade semelhante, enquanto que inferior em relação aos reforçados com sisal contínuo unidirecional e rami (Figura 46). O desempenho dos compósitos com fibras contínuas unidirecionais foi excelente, apresentando módulo da ordem de 22 GPa.

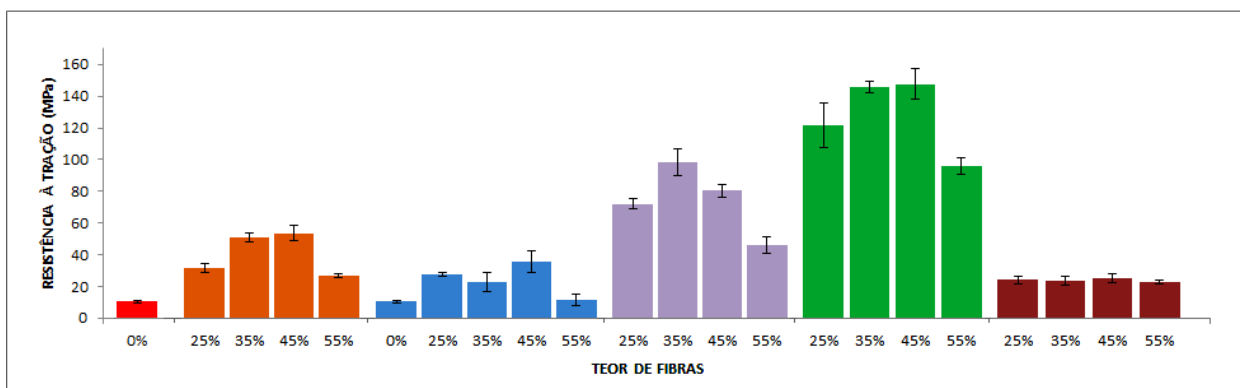
Figura 46 – Módulo de elasticidade dos compósitos em estudo



Fonte: Autora

Para a resistência à tração, o compósito com sisal contínuo unidirecional apresentou desempenho superior comparado aos demais compósitos. Entre os compósitos com fibras descontínuas, o reforçado com rami descontínuo aleatório apresentou melhores resultados (Figura 47).

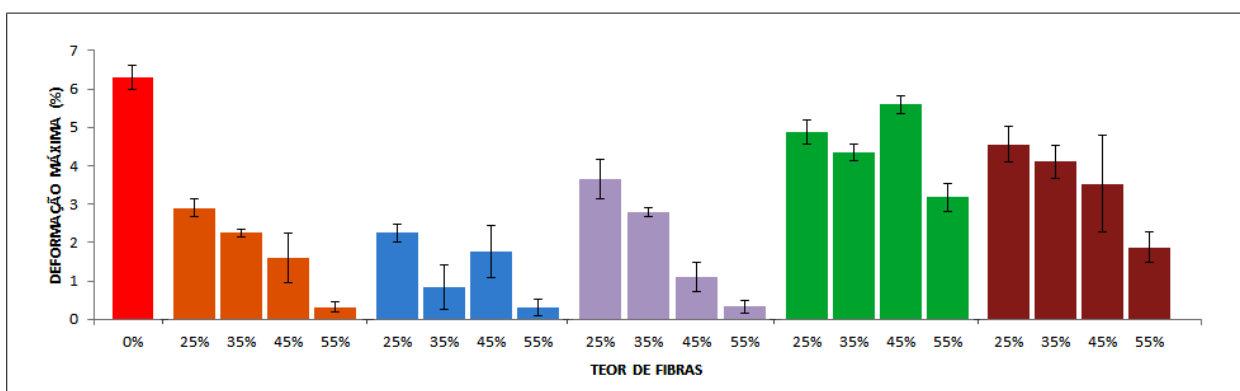
Figura 47 – Resistência à tração dos compósitos em estudo



Fonte: Autora

Os compósitos apresentaram comportamento semelhante para a deformação máxima, apresentando redução desta propriedade com a adição de fibras à matriz (Figura 48).

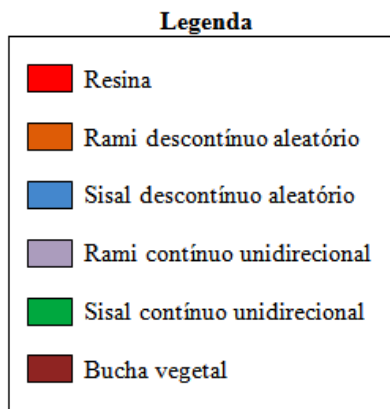
Figura 48 – Deformação máxima dos compósitos em estudo



Fonte: Autora

Os compósitos estão apresentados diferenciados pelas cores conforme legenda apresentada na Figura 49.

Figura 49 – Legenda das Figuras 47, 48 e 49.



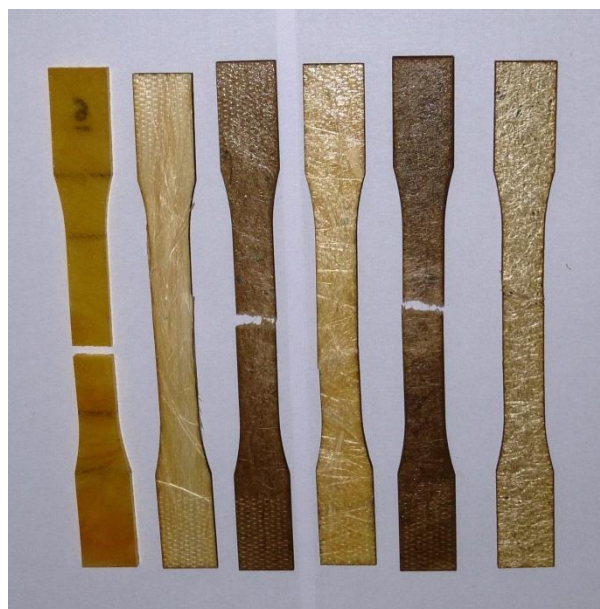
Fonte: Autora

4.4 Ruptura dos corpos de prova

Os corpos de prova foram ensaiados à tração até a ruptura, apresentando uniformidade em relação à forma como ocorreu o rompimento destes para cada tipo de reforço. Os corpos de prova dos compósitos com fibra de sisal e bucha vegetal não tiveram as partes rompidas totalmente separadas, porque parte das fibras não foram rompidas. Os compósitos reforçados com fibra de rami apresentaram ruptura com separação total e observa-se macroscopicamente, que não houve arrancamento das fibras. A configuração final das partes rompidas das fibras de sisal e bucha vegetal foi influenciada pela seção transversal das mesmas, porque com menor área de contato da resina com as fibras, houve o rompimento da resina que, por fim, não conseguiu redistribuir a tensão para as fibras.

As superfícies de ruptura dos corpos de prova ensaiados da placa de resina, dos compósitos com fibra de sisal alinhado unidirecionalmente, rami alinhado unidirecionalmente, sisal distribuído aleatoriamente, rami distribuído aleatoriamente e fibra de bucha vegetal, respectivamente da esquerda para a direita, podem ser observadas na Figura 50.

Figura 50 - Corpos de prova ensaiados



Fonte: Autora

4.5 Resumo dos compósitos em estudo e da literatura

Como apresentado na revisão bibliográfica, existem vários trabalhos sobre compósitos com matriz polimérica reforçada com fibras vegetais, no entanto, o volume de fibras adotado para a produção dos compósitos deste estudo foi mais elevado do que aqueles já investigados com a resina poliuretana e, quando em teores semelhantes, apresentaram melhores resultados. A Tabela 19 apresenta propriedades mecânicas dos compósitos em estudo e obtidas por alguns pesquisadores, que foram produzidos com vários teores de fibras, com diferentes tipos de orientações e processo de produção. A partir dos resultados apresentados pelos compósitos deste trabalho, observa-se que as matrizes poliuretanas reforçadas com fibra de rami e sisal apresentaram bons resultados de módulo de elasticidade e resistência à tração, mesmo comparado a resinas com excelente desempenho mecânico e mais estudadas, como é o caso da matriz epóxi e poliéster. O desempenho da matriz poliuretana reforçada com fibras de bucha vegetal foi melhor comparada ao compósito com a matriz poliéster para o mesmo tipo de reforço, porque com a resina de poliéster houve aderência pobre, o que não foi observado com a resina poliuretana.

Tabela 19 – Propriedades dos compósitos em estudo e de alguns compósitos poliméricos com fibras vegetais encontrados na literatura

Compósito	Teores de fibras em volume (%)	Orientação das fibras	Módulo de elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação máxima (%)
Sisal/PU (Autora)	25-55	alinhado	15,39-22,19	96,11-147,55	3,18-5,60
Sisal/PU (Autora)	25-55	aleatório	5,62-7,27	11,10-33,65	0,32-2,25
Sisal/PU (Silva, 2003)	10-35	aleatório	3,00-5,80	38,40-53,00	1,10-1,90
Sisal/PU (Silva, 2003)	18	alinhado	7,00	108,00	2,00
Sisal/PU (Carvalho <i>et al.</i> , 2003)	23,2-46,8	alinhado	0,73-1,72	37,22-74,74	4,82-15,06
Rami/PU (Autora)	25-55	alinhado	18,84-22,56	43,43-92,36	0,33-3,66
Rami/PU (Autora)	25-55	aleatório	4,49-14,69	25,20-50,51	0,32-2,90
Rami/Epóxi (Soares, 2012)	30-60	alinhado	9,70-20,20	91,30-139,4	1,70-4,30
Rami/Poliéster (Ferreira, 2012)	30-50	alinhado	8,26-17,11	104,95-127,09	2,65-2,79
Tecido de rami/Epóxi (Soares, 2012)	50	alinhado unidirecional	23,70	126,30	1,30
Tecido de rami/Poliéster (Ferreira, 2012)	30-50	alinhado bidirecional	9,57-11,64	46,53-61,88	1,19-1,84
Bucha vegetal/PU (Autora)	25-55	aleatório	2,87-4,74	22,85-25,32	1,87-4,56
Bucha vegetal/Poliéster (Ferreira, 2012)	20-40	aleatório	1,65-3,64	18,66-26,40	2,21-2,59
Coco/PU (Silva, 2003)	10-20	aleatório	2,00-2,50	21,00-25,00	1,10-1,70

Fonte: Citados na tabela

5 CONCLUSÃO

5.1 Conclusão

Analisando as propriedades mecânicas dos compósitos estudados é possível observar:

- Os compósitos com fibras de rami contínuas unidirecionais apresentaram melhores valores para o módulo de elasticidade e resistência à tração quando comparados aos compósitos com reforço de fibras de rami distribuídas aleatoriamente. O módulo de elasticidade é a propriedade mais afetada pela distribuição e orientação das fibras, em que os valores do módulo para os compósitos de fibras contínuas unidirecionais foram pelo menos 1,5 vezes maior do que para os distribuídos aleatoriamente, para teores iguais.
- Com o aumento do teor de fibras de rami descontínuo aleatório, as propriedades mecânicas apresentaram melhoria até 45% em volume, sendo este o teor crítico para esses compósitos. Nos compósitos com rami contínuo unidirecional, com o aumento do volume de fibras, ocorreu aumento do módulo de elasticidade, enquanto que para a resistência à tração percebeu-se melhoria apenas até 35% de volume de fibras.
- Nos compósitos com fibras de sisal distribuídas aleatoriamente as propriedades não apresentaram alterações significativas. Para os compósitos com as fibras contínuas unidirecionais o volume crítico foi de 45%.
- Para a bucha vegetal ocorreu pouca variação das propriedades mecânicas, mas com resultados semelhantes a compósitos apresentados pela literatura com o mesmo tipo de reforço e com fibras de sisal distribuídas aleatoriamente.
- O melhor compósito foi obtido com as fibras de sisal contínuas unidirecionais que apresentou excelentes propriedades mecânicas quando comparados aos relatados na literatura, com módulo de 22,19 GPa e resistência de 147,55 MPa.

5.2 Propostas para trabalhos futuros

Os resultados encontrados neste trabalho mostraram que os materiais adotados para estudo tem potencial para serem aplicados na construção civil, tanto que apresentaram resultados surpreendentes quando comparados a outros compósitos. No entanto, a partir deste trabalho somado aos realizados até o momento, com o intuito de analisar o comportamento mecânico de compósitos utilizando fibra vegetal como reforço, ainda deixam várias questões que necessitam serem estudadas. Nesse sentido, segue algumas sugestões para estudos futuros com matriz poliuretana à base de óleo de mamona e fibras vegetais:

- Analisar as propriedades mecânicas de compósitos que apresentaram os melhores resultados moldados a quente, pois este processo reduz a viscosidade da resina facilitando o preenchimento dos vazios;
- Estudo comparativo dos compósitos que apresentaram melhores propriedades mecânicas com materiais usados como painéis na construção civil;
- Estudo do desempenho térmico, acústico e durabilidade dos compósitos.

REFERÊNCIAS

ALVES, M. O.; SANTIAGO, E. G.; LIMA, A. R. M. **Diagnóstico socioeconômico do setor sisaleiro do nordeste brasileiro**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2005.

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

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

ANGÉLICO, R. A. **Avaliação de modelos de falhas progressivas para estruturas em material compósito**. 2009. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ANNUNCIADO, T. R. **Estudo da Chorisia speciosa e outras fibras vegetais como sorventes para o setor de petróleo**. 2005. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

ASKELAND, D. R.; PHULÉ, P. P. **Ciência e engenharia dos materiais**. São Paulo: Centage Learning, 2008.

BENATTI JUNIOR, R. **Rami: planta têxtil e forrageira**. São Paulo: Nobel, 1988.

BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fiber reinforced cementitious composites**. Londres e Nova Iorque: Elsevier Applied Science, 1990.

BISOGNIN, D. A. Origin and evolution of cultivated cucurbits. **Ciência rural**, Santa Maria, v. 32, n. 5, p. 715-723, 2002.

BNDES - BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO (Brasil). **Rami, uma cultura em extinção**. Rio de Janeiro, 1996. Disponível em: <www.bndes.gov.br/publicacoes/consulta_expressa>. Acesso em: 17 set. 2012.

BNH - BANCO NACIONAL DA HABITAÇÃO (Brasil): **Utilização de fibras vegetais no fibro-cimento e no concreto-fibra**. Rio de Janeiro, 1982.

BOYNARD, C. A.; D'ALMEIDA, J. R. M. Water absorption by sponge gourd (*luffa cylindrica*)-polyester composites materials. **Journal of Materials Science Letters**, Londres, v. 18, p. 1789-1791, 1999.

BOYNARD, C. A.; MONTEIRO, S. N.; D'ALMEIDA, J. R. M. Aspects of álcali treatment of sponge gourd (*luffa cylindrica*) fibers on the flexurak properties of polyester matrix composites. **Journal of applied polymer science**, Nova Iorque, v. 87, p. 1927-1932, 2003.

CALLISTER JUNIOR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de janeiro: LTC, 2008.

CANTALINO, A. L. *et al.* **O sisal do Brasil**. Salvador: Sindifibras, 2006. Disponível em: <<http://www.brazilianfibres.com/portal/index.php/pt/publicacoes>>. Acesso em: 15 ago. 2013.

CARVALHO, L. H.; SILVA, S. F. M. Propriedades mecânicas de compósitos de poliuretano/fibras de sisal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE POLÍMEROS, 7. **Anais...** Belo Horizonte, 2003. p. 386-388.

CARVALHO, L. H.; CAVALCANTI, W. S. Propriedades mecânicas de tração de compósitos poliéster/tecidos híbridos sisal/vidro. **Polímeros: ciência e tecnologia**, São Carlos, v. 16, n. 1, p. 33-37, 2006.

CARVALHO, R. F. **Compósitos de fibras de sisal para uso em reforços de estruturas de madeira**. 2005. 133 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

CARVALHO, J. D. V. **Cultivo de bucha vegetal**. Brasília, 2007. Disponível em: <<http://www.respostatecnica.org.br/dossie-tecnico/downloadsDT/MjI5>>. Acesso em: 20 ago. 2013.

CASTRO, G. P.; CORREIA, F. A. Algumas determinações físicas e químicas da fibra de rami. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 8, p. 109-117, 1948.

COUTINHO, F. M. B.; DELPECH, M. C. Poliuretanos como materiais de revestimento de Superfície. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, p. 41-48, 1999.

D' ALMEIDA, A. L. F. S.; CALADO, V.; BARRETO, D. W.; D'ALMEIDA, J. R. M. Acetilação da fibra de bucha (*luffa cylindrica*). **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 59-62, 2005.

DEMIR, H.; ATIKLER, U.; BALKOSE, D.; TIHMINLIOGLU, F. The effect of fiber surface treatments on the tensile and water sorption properties of polypropylene-luffa fiber composites. Composites - Part A, applied Science and manufacturing, Kidlington, v. 37, n. 3, p. 447-456, 2006.

FERREIRA, M. R. S. **Estudo de painéis sanduíches de poliéster reforçado com fibras vegetais para aplicação como forro**. 2012. 119 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

GUIMARÃES, J. L.; FROLLINI, E.; SILVA, C. G.; WYPYCH, F., SATYANARAYANA, K. G. Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. **Industrial Crops and Products**, Philadelphia, v. 30, p. 407-415, 2009.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Rio de Janeiro, v. 25, n. 2, p. 1-88, 2012.

ISAIA, G. C. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007.

JAWAID, M.; ABDUL KHALIL, H. P. S. Cellulosic/synthetic fibre reinforced polymer hybrid composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 85, p. 1-18, 2011.

JOSHI, S. V.; DRZAL, L. T.; MOHANTY, A. K.; ARORA, S. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? **Composites: Part A**, Kidlington, v. 35, p. 371-376, 2004.

LEVY NETO, F.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

LI, X.; TABIL, L.G.; PANIGRAHI, S. Chemical treatments of natural fiber for use in natural fiber-reinforced composites: a review. **Journal of Polymers and the Environment**, Nova Iorque, v.15, p. 25-33, 2007.

MATTHEWS, F. L.; RAWLINGS, R. D. **Composite materials: engineering and science**. London, Chapman & Hall, 1999.

MAZUMDAR, SANJAY K. **Composites manufacturing: materials, product, and process engineering**. Nova Iorque: CRC Press, 2002.

MERLINI, C.; SOLDI, V.; BARRA, G.M.O. Influence of fiber surface treatment and length on physic-chemical properties of short random banana fiber- reinforced castor oil polyurethane composites. **Polymer Testing**, Chelmsford, v. 30, p. 833-840, 2011.

MEYER, P. L. **Probabilidade: aplicações à estatística**. Rio de Janeiro: Ao livro técnico, 1974.

MILANESE, A. C. **Caracterização de compósitos de matrizes poliméricas reforçadas com fibra de sisal e de vidro**. 2008. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

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

MONTEIRO, S. N.; LOPES, F. P. D.; FERREIRA, A. S.; NASCIMENTO, D. C. O. Natural-fiber polymer-matrix composites: cheaper, tougher, and environmentally friendly. **JOM**, Warrendale, v. 61, p. 17-22, 2009.

MOTTA, L. A. C. **Melhoria do desempenho de fibras de coco e sisal para reforço de matrizes cimentícias através de tratamento termomecânico e impregnação de resinas**. 2006. 149 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NETO, J. B.; MARGEM, F. M.; MONTEIRO, S. N. Avaliação das propriedades mecânicas de fibras de rami, utilizando análise de weibull. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 19. **Anais...** Campos do Jordão, 2010. p. 3268-3275.

OLIVEIRA, C. B.; GUSMÃO, A. B.; ALEGRO, R. C. **Crônica da cultura do rami em Urutaí: lembranças de trabalhadores, 1960-1980**. Confins [Online], 6, 2009. Disponível em: <<http://confins.revues.org/5973#illustrations>>. Acesso em: 18 de junho de 2013.

PAIVA, J.; TRINDADE, W. G.; FROLLINI, E. Compósitos de matriz termofixa fenólica reforçada com fibras vegetais. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, p. 170-176, 1999.

PINHEIRO, D. J. G. **Análise estática e dinâmica de painéis corrugados construídos em materiais compósitos**. 2010. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2010.

ROMANZINI, D.; ORNAGHI JUNIOR, H. L.; AMICO, S. C.; ZATTERA, A. J. Preparation and characterization of ramie-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. **Material Research**, São Carlos, v. 15, n. 3, p. 415-420, 2012.

SABBATINI, F. H. O processo de produção das vedações leves de gesso acartonado. In: SEMINÁRIO TECNOLOGIA E GESTÃO NA PRODUÇÃO DE EDIFÍCIOS VEDAÇÕES VERTICAIS. **Anais...** São Paulo: EPUSP/PCC, 1998. p. 67-94.

SATYANARAYANA, K. G.; GUIMARÃES, J. L.; WYPYCH, F. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: source, production, morphology, properties and applications. **Composites: Part A**, Kidlington, v. 38, p. 1694-1709, 2007.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos materiais**. 6 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

SILVA, M. R.; MOTTA, L. A. C. Produção e caracterização mecânica de compósitos de matriz poliéster reforçada com bucha vegetal em forma de manta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 20. **Anais...** Joinville, 2012, p. 5484-5489.

SILVA, O. R. R. F. **Embrapa – Sistema de produção**. Brasília, DF: EMBRAPA, 2006. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Sisal/CultivodoSisal/doencas.html>> Acesso em: 18 out. 2012.

SILVA, R. V. **Compósitos de resina poliuretano derivado de óleo de mamona e fibras vegetais**. 2003. 157 f. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, R. V.; SPINELLI, D.; BOSE FILHO, W. W.; CLARO NETO, S.; CHIERICE, G. O.; TARPANI, J. R. Fracture toughness of natural fibers/castor oil polyurethane composites. **Composites Science and Technology**, Barking, v. 66, p. 1328-1335, 2006.

SILVESTRE FILHO, G. D. **Comportamento mecânico do poliuretano derivado de óleo de mamona reforçado por fibras de carbono: contribuição para o projeto de hastes de implante de quadril**. 2001. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2001.

SOARES, I. M. **Produção e caracterização de compósitos de matriz epóxi reforçada com fibra de rami para fins de reforço estrutural**. 2012. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985.

TANIGUTI, E. K. **Método construtivo de vedação vertical interna de chapas de gesso acartonado**. 1999. 316 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

TANOBE, V. O. A.; TORQUATO, L. P.; AMICO, S. C.; SYDENSTRICKER, T. H. D. Influência dos tratamentos químicos nas propriedades físico-químicas das esponjas de luffa cilíndrica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 15. **Anais...** Natal, 2002. p. 1602-1608.

TANOBE, V. O. A. **Caracterização de fibras de esponjas de Luffa cylindrica para utilização em compósitos com matriz polimérica**. 2003. 161 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

APÊNDICE A – RESUMO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

O presente apêndice apresenta o resumo dos valores obtidos para as propriedades mecânicas com tratamento estatístico, determinadas a partir do ensaio de tração. Os valores estão apresentados na Tabela A1.

Tabela A1 – Resumo das propriedades mecânicas

Planilha resumo - compósito com fibra de rami aleatório						
Teor de fibras	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência à tração (MPa)		Deformação máxima (%)	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
0%	0,58	0,29	9,99	0,71	6,3	0,3
25%	4,49	0,38	29,78	2,46	2,90	0,23
35%	6,85	1,38	47,73	2,57	2,25	0,11
45%	14,69	2,43	50,51	4,30	1,61	0,64
55%	12,81	1,76	25,20	0,80	0,32	0,13
Planilha resumo - compósito com fibra de rami alinhado						
Teor de fibras	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência à tração (MPa)		Deformação máxima (%)	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
0%	0,58	0,29	9,99	0,71	6,3	0,3
25%	18,84	4,96	67,70	3,00	3,66	0,52
35%	19,42	4,94	92,36	7,77	2,79	0,12
45%	21,22	3,41	75,64	3,96	1,09	0,38
55%	22,56	2,49	43,43	5,06	0,33	0,17
Planilha resumo - compósito com fibra de sisal aleatório						
Teor de fibras	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência à tração (MPa)		Deformação máxima (%)	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
0%	0,58	0,29	9,99	0,71	6,3	0,3
25%	5,62	1,34	26,23	1,04	2,25	0,24
35%	7,27	2,71	21,36	5,83	0,85	0,58
45%	6,19	2,34	33,65	6,50	1,76	0,69
55%	6,33	0,84	11,10	3,39	0,32	0,21

Planilha resumo - compósito com fibra de sisal alinhado						
Teor de fibras	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência à tração (MPa)		Deformação máxima (%)	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
0%	0,58	0,29	9,99	0,71	6,3	0,3
25%	15,39	5,67	121,79	14,18	4,87	0,32
35%	19,15	4,39	145,71	3,94	4,34	0,22
45%	22,19	3,99	147,55	9,65	5,60	0,23
55%	18,31	6,67	96,11	5,39	3,18	0,37
Planilha resumo - compósito com fibra de bucha vegetal						
Teor de fibras	Módulo de elasticidade (GPa)		Resistência à tração (MPa)		Deformação máxima (%)	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão	média	desvio padrão
0%	0,58	0,29	9,99	0,71	6,3	0,3
25%	2,87	0,42	24,14	2,20	4,56	0,45
35%	3,71	0,34	23,77	2,74	4,11	0,43
45%	4,74	0,42	25,32	3,06	3,53	1,26
55%	4,37	0,20	22,85	1,51	1,87	0,40

Fonte: Autora (2013)