

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E QUÍMICAS DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE JUTA E DE
MALVA

IGOR ROBERTO CABRAL OLIVEIRA

Manaus

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

IGOR ROBERTO CABRAL OLIVEIRA

PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E QUÍMICAS DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE JUTA E DE
MALVA

A dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: João de Almeida Melo Filho
Co-orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos

Manaus

2013

IGOR ROBERTO CABRAL OLIVEIRA

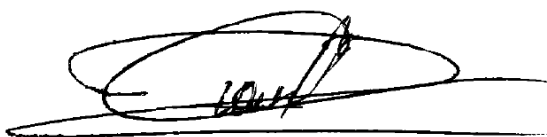
PROPRIEDADES MECÂNICAS, FÍSICAS E QUÍMICAS DE COMPÓSITOS
CIMENTÍCIOS REFORÇADOS COM FIBRAS LONGAS DE JUTA E DE
MALVA

A dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia Civil,
Universidade Federal do Amazonas,
como parte dos requisitos necessários à
obtenção do título de Mestre em
Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA



Prof. João de Almeida Melo Filho, D.Sc.
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Raimundo Pereira de Vasconcelos, D.Sc.
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Flávio de Andrade Silva, D.Sc.
Universidade Federal do Rio de Janeiro



Prof. Holmer Savastano Júnior, D.Sc.
Universidade de São Paulo

Ficha Catalográfica
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Oliveira, Igor Roberto Cabral

O48p Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e de malva / Igor Roberto Cabral Oliveira. - Manaus: UFAM, 2013.
96 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2013.

Orientador: João de Almeida Melo Filho

Co-orientador: Raimundo Pereira de Vasconcelos

1. Cimento - Compósitos 2. Fibras vegetais 3. Juta 4. Malva I. Melo Filho, João de Almeida (Orient.) II. Vasconcelos, Raimundo Pereira de III. Universidade Federal do Amazonas IV. Título

CDU (2007): 691.328.44:677.11/.15(043.3)

*Dedico a meus pais,
esposa e filhos.*

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço profundamente a Deus pela oportunidade de realizar mais um sonho.

Aos meus pais, Pedro e Francisca, pelos seus esforços e amor em gerar melhores condições para a minha capacitação e pelo incentivo durante toda a minha vida. Aos meus queridos e amáveis avos, que foram importantes incentivadores deste trabalho.

Agradeço também a minha esposa Andressa e minha filha Angelina pelo apoio e paciência proporcionados durante o decorrer deste trabalho.

Ao Professor e amigo Raimundo Pereira de Vasconcelos sou muito grato pela ajuda, incentivo, paciência, amizade e confiança conferida no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor e amigo João Melo Filho que também com sabedoria me ajudou no momento que estava na COPPE, assim como nos momentos finais deste trabalho.

Ao Professor Romildo Dias Toledo Filho agradeço pela oportunidade de poder utilizar o Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ – LabEst, embora com diversas atividades, ajudou-me no andamento da pesquisa.

Ao pesquisador Saulo Rocha Ferreira meus muitos agradecimentos pela ajuda durante o tempo que fiquei na COPPE.

Aproveitando não poderia deixar de citar a equipe de profissionais competentes e auxiliares do Labest: à Rosangela, pela ajuda na realização das análises físicas dos materiais, ao Renan e Rodrigo pelo auxílio na execução dos ensaios mecânicos, Adailton, Flavio, Ivan, Júlio, Alessandro e Clodoaldo pela colaboração, contribuindo de forma importante na preparação dos materiais e das placas.

Agradeço também o apoio do professor Gustavo H. D. Tonoli, da Universidade Federal de Lavras – UFLA, do Departamento de Ciências Florestais – DCF e da doutoranda em Ciência e Tecnologia da Madeira Alessandra de Souza Fonseca pela ajuda na caracterização das fibras.

Aos queridos colegas, coordenadores e líderes da Concremat Engenharia Manaus, pelo apoio permitindo conciliar estudo ao trabalho. Em especial ao Jair Caminha e Ari Caraver pela troca de ideias correlacionadas a esta pesquisa.

E a todos que colaboraram direta e indiretamente para que este trabalho pudesse ser realizado.

À CAPES pelo apoio financeiro, sem o qual esse trabalho não seria possível.

"O temor do Senhor é o princípio do saber; mas os loucos desprezam a sabedoria e o ensino. Porque o Senhor dá a sabedoria e da sua boca vem a inteligência e o entendimento".

Provérbios 1:7; 2:6

RESUMO

Propriedades mecânicas, físicas e químicas de compósitos cimentícios reforçados com fibras longas de juta e malva.

No presente estudo foi realizado a investigação experimental das propriedades físico-mecânicas e também químicas das fibras de juta e malva assim como dos compósitos reforçados com as respectivas fibras vegetais. Em relação aos compósitos, estes foram produzidos com uma matriz auto-adensável e livre de hidróxido de cálcio. Os compósitos foram produzidos com o teor de 8% de fibras longas, alinhadas unidirecionalmente e distribuídas em 5 camadas, formando como produto final um compósito em formato de placas. Os principais ensaios utilizados para a caracterização das fibras foram análise química, termogravimetria, análise microestrutural e tração direta, enquanto para os compósitos foram análise microestrutural, tração direta e flexão em quatro pontos. Os ensaios físico-mecânicos apresentaram, tanto nas fibras de malva como nas fibras de juta, a possibilidade da aplicação destas fibras em compósitos de alta resistência. Os compósitos reforçados com ambas as fibras, apresentaram propriedades mecânicas promissoras no desenvolvimento de peças semi-estruturais e estruturais. Os compósitos reforçados com fibras de malva apresentaram resistência superior aos dos compósitos reforçados com fibras de juta (cerca de 20% na tração à flexão e 10% na tração direta). Ambos os compósitos apresentaram um comportamento de múltipla fissuração tanto na flexão como na tração.

Palavras-chave: compósito, juta, malva.

ABSTRACT

Mechanical, physical and chemical behavior of cementitious composites reinforced with jute and malva fibers.

The work in hand deals with the experimental investigation of the mechanical, physical and chemical behavior of jute and malva fibers as well as the cementitious composites reinforced by those fibers. The composites were produced with a self-consolidating matrix free of calcium hydroxide. Long and unidirectional aligned fibers distributed in five layers were used as reinforcement. This arrangement resulted in a reinforcement ratio of 8%. The fibers were investigated by chemical analysis, thermogravimetry, microstructural observation and direct tensile tests. Direct tension, four point bending tests and microstructural observation were the techniques used to characterize the composites. The physical and mechanical results indicated that both fibers have properties adequate for being used as reinforcement in high performance composites. The newly developed fiber reinforced composites presented promising mechanical properties towards the development of semi-structural and structural elements. The composites reinforced with malva fibers presented mechanical resistance higher than those reinforced with jute (around 20% in the flexural and 10 % in the tensile strength). Both composites presented a multiple cracking behavior under bending and tensile loads.

Keyword: Composite, jute, malva.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Classificação das Fibras.	05
Figura 2.2	Classificação das Fibras Vegetais.	08
Figura 2.3	Estrutura da celulose.	09
Figura 2.4	Representação das fibrocélulas, fibrilas, das microfibrilas e dos cristais de celulose da fibra de sisal.	10
Figura 2.5	Fibras de juta e malva beneficiadas industrialmente: (a) Cordões e (b) Sacarias.	12
Figura 2.6	Tipos de distribuição de reforço fibroso: a) Fibras curtas distribuídas aleatoriamente, (b) Fibras contínuas unidirecionais e (c) Fibras contínuas bidimensionais.	18
Figura 2.7	Aplicação em telhas.	20
Figura 2.8	Aplicação em pisos elevados.	20
Figura 2.9	Aplicação em painéis de divisórias.	20
Figura 3.1	Localização da cidade de Manacapuru (AM).	21
Figura 3.2	Curva granulométrica do cimento CP II F-32.	23
Figura 3.3	Curva granulométrica da areia.	23
Figura 4.1	Fluxograma dos ensaios realizados para determinação das propriedades das fibras de juta e malva.	26
Figura 4.2	Fluxograma dos ensaios realizados para avaliação do comportamento dos compósitos reforçados com fibras longas de juta e malva.	27
Figura 4.3	Detalhe da fibra submetida a tração direta: (a) Dimensão do suporte para fixação da fibra e (b) Garra superior e inferior da máquina.	29
Figura 4.4	Microscópio monocular Quimis, modelo Q-705M1.	30
Figura 4.5	Determinação da espessura das fibras: (a) Trechos analisados e (b) Obtenção das cinco leituras no trecho 2.	31
Figura 4.6	Análise micro-estrutural das fibras: (a) Microscópio eletrônico de varredura e (b) Metalizador.	32
Figura 4.7	Amostras em cadinhos de platina.	33
Figura 4.8	Materiais antes da moldagem.	34
Figura 4.9	Misturador de bancada com a mistura seca.	35
Figura 4.10	Configuração dos moldes: desenho esquemático de todas as peças da forma.	36

Figura 4.11	Moldagem das placas: (a) Colocação de uma das camadas de argamassa sobre as fibras, (b) Espalhamento da argamassa na forma.	36
Figura 4.12	Preparação das placas para ensaios mecânicos: (a) Corte das placas, (b) Amostras para o ensaio de flexão.	37
Figura 4.13	Máquina Shimadzu AGX – 100KN.	37
Figura 4.14	Ensaio de tração nos compósitos: (a) início do ensaio tração posição inicial do corpo de prova, (b) Detalhe do posicionamento dos LVDT's.	38
Figura 4.15	Leitura do ensaio de tração pelo programa Trapézio X.	39
Figura 4.16	Ensaio de flexão nos compósitos: início do ensaio flexão posição inicial do corpo de prova.	40
Figura 5.1	Imagens obtidas através do MEV: (a) Seções das fibras de juta, (b) Seções das fibras de malva.	44
Figura 5.2	Ampliação de uma das amostras analisadas no MEV: (a) Seção elíptica e (b) Seção Real.	45
Figura 5.3	Imagens obtidas por MEV: (a) Seções Elípticas das fibras de juta, (b) Seções elípticas das fibras de malva, (c) Seções reais das fibras de juta e (d) Seções reais das fibras de malva.	45
Figura 5.4	Imagem no MEV da seção transversal das fibras de juta: (a) Fibrocélulas e (b) Ampliação de uma fibrocélula.	47
Figura 5.5	Curva tensão x deformação das fibras: (a) juta e (b) malva.	47
Figura 5.6	Curva de TG e DTG das fibras de juta e malva em atmosferas de nitrogênio, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.	49
Figura 5.7	Curvas típicas tensão de tração x deslocamento para ensaios de tração direta em compósitos.	52
Figura 5.8	Modo de fratura dos corpos de prova após ensaio de tração para os compósitos: (a) CJ e (b)CM.	54
Figura 5.9	Curvas típicas de tensão x deflexão para compósitos CJ e CM.	56
Figura 5.10	Detalhe da região II para os compósitos: (a) CJ e (b) CM.	57
Figura 5.11	Modo de fratura dos corpos de prova após ensaio de flexão para os compósitos: (a) CJ e (b)CM.	59
Figura 5.12	Microscopia ótica de fibras no interior dos compósitos: (a)CJ e (b) CM.	60
Figura 5.13	Micrografia lateral de fibras de Juta:(a) Interface fibra-matriz, (b) ampliação da imagem anterior, (c) Pouca aderência e fratura da matriz.	60

Figura 5.14 Micrografia lateral de fibras de Malva: (a) Interface fibra-matriz, (b) ampliação do trecho de fratura.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Características mecânicas e físicas de algumas fibras.	06
Tabela 2.2	Produção mundial de algumas fibras.	07
Tabela 2.3	Consumo Industrial nacional de fibras em mil toneladas.	07
Tabela 2.4	Composição química de algumas fibras naturais analisadas no Brasil.	11
Tabela 2.5	Produção mundial da fibra de Juta e demais fibras com características semelhantes em mil toneladas.	12
Tabela 2.6	Produção estadual das fibras Juta/Malva em toneladas.	13
Tabela 3.1	Propriedades químicas do cimento CP II F-32.	22
Tabela 3.2	Propriedades químicas da metacaulinita.	24
Tabela 3.3	Características da água utilizada na confecção dos compósitos.	25
Tabela 4.1	Traço da matriz e compósito desenvolvido caracterizado no presente estudo.	27
Tabela 4.2	Análise química das fibras com as respectivas normas.	28
Tabela 5.1	Valores referentes ao diâmetro das fibras de juta e malva.	43
Tabela 5.2	Valores das seções elípticas e reais das fibras de juta e malva.	46
Tabela 5.3	Valores médios e coeficientes de variação do módulo de elasticidade, da tensão última de tração e da deformação de ruptura das fibras de juta e malva.	48
Tabela 5.4	Valores médios dos constituintes químicos da fibra de juta e malva (%).	50
Tabela 5.5	Resultados médios e coeficientes de variação das propriedades mecânicas de Tração obtidas das curvas tensão x deformação para os compósitos CJ e CM.	52
Tabela 5.6	Resultados médios e coeficientes de variação das propriedades mecânicas obtidas das curvas tensão x deflexão para os compósitos CJ e CM.	56

SUMÁRIO

RESUMO.....	VIII
ABSTRACT.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE TABELAS.....	XIII
SUMÁRIO.....	XIV
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura do trabalho	3
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Fibras	5
2.1.1 Fibras vegetais	8
2.2 Compósitos laminados cimentícios	14
2.2.1 Conceitos e informações gerais	14
2.2.2 Agente aglomerante principal.....	15
2.2.3 Adições minerais	16
2.3 Compósitos laminados cimentícios reforçados com fibras vegetais	17
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS	21
3.1 Fibras de juta e malva.....	21
3.2 Cimento	22
3.3 Areia	23
3.3 Argilas calcinadas – metacaulinita	24
3.4 Superplastificante	25
3.5 Água	25
CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	26
4.1 Informações complementares	26
4.2 Caracterização das fibras	28
4.2.1 Análise química	28
4.2.2 Tração direta	29
4.2.3 Análise microestrutural: Óptica (MO) e MEV	30
4.2.4 Determinação da massa específica	32

4.2.5 Análise termogravimétrica	33
4.3 Produção dos laminados	33
4.4 Caracterização dos compósitos.....	37
4.4.1 Tração direta	37
4.4.2 Flexão em quatro pontos	39
4.4.3 Análise Microestrutural	41
CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
5.1 Resultados físico-mecânicos e químicos das fibras de juta e de malva	43
5.1.1 Análise microestrutural da seção das fibras	43
5.1.2 Resistência à tração direta	47
5.1.3 Massa específica	49
5.1.4 Análise termogravimétrica	49
5.1.5 Análise química	50
5.2 Caracterização dos compósitos.....	51
5.2.1 Comportamento mecânico sob cargas de tração direta	51
5.2.2 Comportamento mecânico sob flexão	55
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO.....	62
6.1 Propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras de juta e malva	62
6.2 Produção dos compósitos reforçados com fibras de juta e de malva	63
6.3 Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras de juta e de malva.....	63
6.4 Comparação microestruturalmente da interface fibra-matriz dos compósitos reforçados com fibras de juta e de malva	64
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	65
8. REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE	78
APÊNDICE 1. Processo de Beneficiamento das fibras de juta e malva.	78
APÊNDICE 2. Curvas dos ensaios realizados neste trabalho.	80

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Com a proibição dos produtos de cimento reforçados com fibras de amianto, devido à comprovação de riscos à saúde (desenvolvimento de câncer), onde segundo Mendes (2007), caminho este já alcançado por 50 países no mundo, mas que ainda é pleiteado no Brasil em razão de ser um dos maiores produtores de fibra de amianto do mundo, as fibras vegetais vêm sendo uma real opção como reforço de matrizes cimentícias. Onde apesar da sua utilização ser ainda pequena, esta alternativa é apresentada como um caminho mais sustentável, de baixo custo e disponibilidade quando comparada a utilização de fibras sintéticas que exigem maior consumo de energia e maior custo de obtenção (TORGAL E JALALI 2010).

A adição de fibras em matrizes resulta em um compósito com propriedades mecânicas modificadas. O ganho de resistência e de tenacidade, quando comparado à matriz sem reforço, são os principais benefícios provindos das fibras BENTUR E MINDESS, (1990). Este ganho, segundo BENTUR E MINDESS (1990), é decorrente da melhor transferência de tensões entre a matriz e as fibras que se inicia a partir do estado elástico. Para tanto, é necessário o controle de algumas propriedades fundamentais das fibras, tais como geometria, composição química, características superficiais, resistência e rigidez (OLIVEIRA, 2000; FERREIRA, 2012).

Nas últimas décadas, a busca pela melhoria das propriedades mecânicas e o desenvolvimento de novos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais tem gerado resultados promissores no meio científico, como os apresentados por Melo Filho (2005), Penha (2006), Marquês (2009) e Toledo Filho (2012).

Pesquisas têm mostrado que as fibras vegetais devem ser inseridas em matrizes cimentícias livres de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e com baixa alcalinidade para que sua durabilidade seja garantida (TOLEDO FILHO, 2012). Com o objetivo de minimizar o ataque às fibras vegetais, visto que, a matriz cimentícia possui elevado teor de Ca(OH)_2 e alta alcalinidade, Lima (2004) e Melo Filho (2012) desenvolveram uma matriz livre de hidróxido de cálcio, substituindo parcialmente o cimento Portland por metacaulinita e resíduos de tijolos moídos. Com essa substituição, o teor de Ca(OH)_2 gerado durante a hidratação do cimento foi reduzido praticamente à zero. Segundo John e Agopyan (1993), outras técnicas de tratamento podem ser aplicadas tanto na matriz quanto nas fibras, tais como: carbonatação acelerada da matriz, impermeabilização da matriz e aplicação de agentes bloqueadores que evitem a decomposição das fibras.

Segundo Melo Filho (2005) e Marquês (2009), o reforço com fibras vegetais de sisal e arumã contínuas distribuídas unidirecionalmente e bidirecionalmente em teores de 6% a 8% em matrizes cimentícias livres de hidróxido de cálcio, apresentaram resultados bastante promissores quanto à resistência mecânica. Já Melo Filho (2012) obteve ótimos resultados no que diz respeito à durabilidade desses compósitos.

Na construção civil estes compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais podem ser utilizados em diversas funcionalidades tais como: placas planas e corrugadas para elemento de cobertura, painéis divisórios, revestimentos externos entre outros. Porém, para cada nova tecnologia desenvolvida é necessária, a caracterização, tanto química como mecânica.

Neste contexto, este trabalho se propõe a estudar o desenvolvimento e a caracterização mecânica dos compósitos cimentícios duráveis reforçados com dois tipos de fibras cultivadas na Região Amazônica: juta e malva. E também se estudou as propriedades mecânicas, físicas e químicas das fibras utilizadas nos compósitos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral dessa pesquisa é avaliar o comportamento físico-mecânico de compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta e de malva.

Como objetivos específicos o presente estudo se propôs a: (i) avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras de juta e de malva; (ii) Produzir compósitos cimentícios reforçados com fibras de juta e de malva; (iii) Comparar o desempenho dos compósitos reforçados com fibra de juta e de malva com relação às propriedades mecânicas de flexão e de tração direta; (iv) Comparar micro estruturalmente a interface fibra-matriz dos compósitos reforçados com fibras de juta e de malva.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos, descritos a seguir.

O **Capítulo 1** apresenta a motivação, os objetivos e a estrutura do trabalho desenvolvido.

No **Capítulo 2**, é apresentada uma revisão bibliográfica das características da matriz cimentícia, a classificação das fibras naturais (com ênfase nas fibras de juta e malva) e o comportamento mecânico dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais na forma de filamentos (fibras técnicas), assim como aplicação das mesmas na construção civil.

O **Capítulo 3** descreve os materiais empregados no presente trabalho.

O **Capítulo 4** comenta a metodologia empregada na caracterização dos compósitos, assim como os ensaios realizados para a caracterização das fibras.

No **Capítulo 5** são apresentados e analisados os resultados dos diferentes ensaios realizados na caracterização das fibras e dos compósitos reforçados com fibras longas de juta e malva.

Por fim, no **Capítulo 6** são apresentadas as principais conclusões obtidas no trabalho.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo são apresentadas as bibliografias utilizadas para embasamento desta pesquisa. É comentado desde a classificação geral das fibras até a aplicação de compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais.

2.1 Fibras

As fibras podem ser organizadas em duas principais classes: orgânicas e as inorgânicas. Tanto as fibras orgânicas como as fibras inorgânicas estão subdivididas em naturais e artificiais. Um exemplo de fibra orgânica natural e artificial é a fibra de celulose e a fibra de PVA, respectivamente, já em relação a fibra inorgânica natural e artificial pode-se citar como exemplo a fibra de amianto e a fibra de aço, respectivamente. Na Figura 2.1 é mostrada esta classificação das fibras.

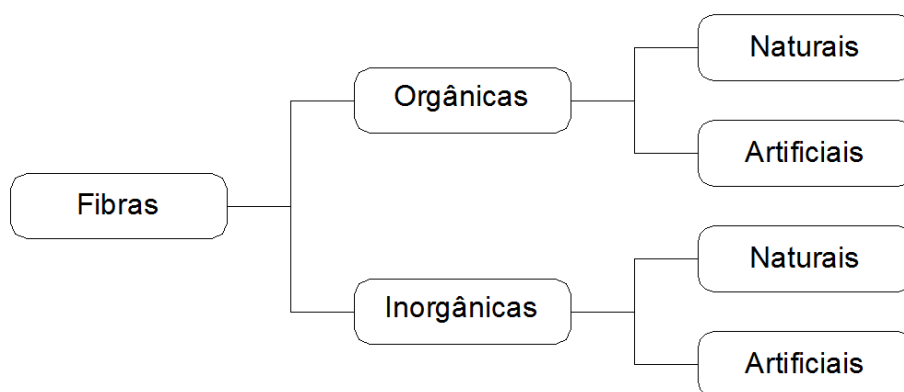


Figura 2.1 - Classificação das Fibras.
Fonte: Adaptado de SILVA (2002) que referencia ZHU (1993).

Com relação as fibras de amianto, o Brasil é um dos maiores produtores, onde segundo Mendes (2007), o Brasil é considerado um grande comercializador e exportador de fibras de amianto na modalidade "crisotila" ou "amianto branco" extraídas a partir das jazidas de Minaçu, Goiás. Entretanto, devido a comprovação de entidades mórbidas associadas à exposição ao amianto, exemplo a asbestose e o câncer de pulmão, onde no Brasil já são

conhecidas estas causas, mas ainda sem a proibição ou banimento do mesmo, ao contrário da escolha já alcançado por cerca de 50 países. Com isso, pesquisadores de diversas partes do mundo transferem gradualmente suas linhas de pesquisas para as outras demais subclasses de fibras, ou seja, diminuindo pesquisas utilizando a subclasse de fibras inorgânicas naturais (amianto).

Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas propriedades físico-mecânicas das principais fibras utilizadas em pesquisas tanto no Brasil como nos demais países.

Tabela 2.1 - Características mecânicas e físicas de algumas fibras.

Fibras	Densidade (g/cm³)	Diâmetro (mm)	Alongam. na Ruptura (%)	Resist. à tração (MPa)	Módulo de Elastic. (GPa)	Fonte dos Dados
Coco (<i>Cocos Nucifera</i>)	800 CV=7,6%	0,25 CV=27,3%	25 CV=29,1%	174 CV=24,2%	3,5	Tôledo Filho (1997)
	1177	-	23,9 – 51,4	95 - 118	2,8	Agopyan e Savastano (1997)
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	900 CV=8,90%	0,12 CV=23,80%	3,0 CV=29,15%	577,5 CV=12,66%	15 - 21	Tôledo Filho (1997)
	1370	-	4,9 - 5,4	347 - 378	15,2	Agopyan e Savastano (1997)
Malva (<i>Urena lobata Linn</i>)	1409	42,6x10 ⁻³ *	5,2	160	17,4	Agopyan e Savastano (1997)
Juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	1020-1040	0,1 – 0,2	2 – 3	250 - 350	26 - 32	Aziz et al. (1987)
Arumã branco (<i>Ischnosiphon polyphyllus</i>)	370	-	-	176 - 487	11 - 28	Marques, M.G.S. (2009)
Polipropileno comum (filam.)	913	-	22,3 - 26,0	250	2	Agopyan e Savastano (1997)

(*) Desvio Padrão de ordem de 50% das médias

Com relação à produção mundial e o consumo nacional, conforme apresentados nas Tabelas 2.2 e 2.3, as fibras sintéticas apresentam uma produção maior que as fibras naturais, mas devido ao seu impacto sócio-econômico e a busca por um modelo de desenvolvimento sustentável, diversos pesquisadores tem se dedicado ao estudo da utilização de fibras vegetais, tais como Melo Filho (2012), Agopyan e Savastano (1997) e Toledo Filho (1997).

Tabela 2.2 - Produção mundial de algumas fibras.

Principais Fibras	Milhares de toneladas	Variação 2006/2007 (%)
Fibras sintéticas (1)	44.522	+7,0
Fibras Artificiais (2)	3.592	+8,2
Algodão	26.704	+2,7
Lã	1.218	-1,5
Seda	156	+7,6
Total	76.192	+6,3

Fonte: FIBER ORGANON/ ARLINGTON, VA/USA (2008).

Tabela 2.3 – Consumo Industrial nacional de fibras em mil toneladas.

ANO	NATURAIS	ARTIFICIAIS	SINTÉTICAS	TOTAL
2003	829,1	37,2	605,6	1.473,4
2004	958,4	39,3	690,2	1.687,8
2005	926,6	38,6	573,4	1.538,6
2006	915,7	48,2	576,7	1.540,5
2007	1.032,1	57,0	620,5	1.709,6
2008	1.078,0	29,0	678,8	1.785,8
2009	969,8	50,1	612,3	1.632,1
2010	1.041,2	32,2	710,6	1.784,0
2011	935,6	33,5	718,4	1.687,6

Fonte: ABIT/FEBRALÃ/ABRASEDA/ABRAFAS/AFIPOL/CONAB (2011).

Com relação às vantagens e desvantagens na utilização de fibras vegetais como reforço, de acordo com Marquês (2009), Melo Filho (2005), Savastano Júnior (2000), podem ser citados:

Vantagens - Grande abundância, baixo custo, não são prejudiciais a saúde, envolve a economia agrícola local, baixo consumo de energia na obtenção e baixa densidade;

Desvantagens - Baixa durabilidade no meio alcalino, grande variação de suas propriedades intrínsecas e grande absorção de água.

2.1.1 Fibras vegetais

As fibras vegetais, também conhecidas como fibras celulósicas, podem ser obtidas através da semente, do caule, da folha e do fruto, conforme mostra a Figura 2.2.

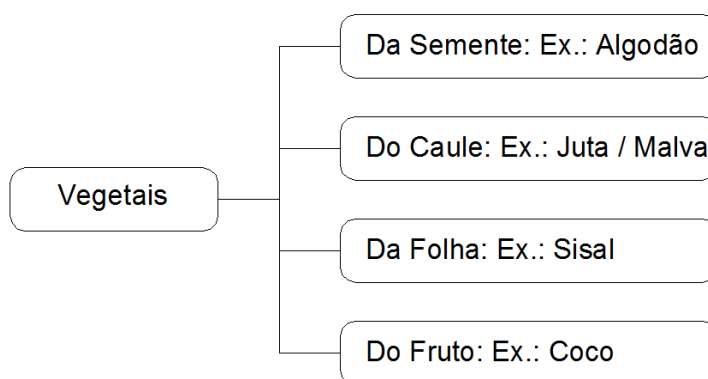


Figura 2.2 - Classificação das Fibras Vegetais.
Fonte: SILVA (2002).

A resistência das fibras celulósicas é influenciada pelo seu arranjo molecular e também pelo seu grau de polimerização (GP), ou seja, quanto maior o seu GP, maior em tese é a resistência da fibra. Outros fatores que estão relacionados a composição química das fibras naturais e estão interligados às propriedades mecânicas, são as condições climáticas e de plantio, idade e de onde foi extraída a amostra da planta. (BLEDZKI, A. K.; GASSAN, J, 1999).

Com relação a sua microestrutura, utilizando a microscopia, observa-se que as fibras vegetais são formadas pelo somatório de células que são constituídas por microfibrilas dispostas em camadas com espessuras e ângulos diferentes. Estas em sua maioria apresentam orientação com relação ao eixo da fibra com certo ângulo característico que quanto maior a quantidade de celulose e menor o ângulo formado entre as microfibras, maior será o valor do módulo de elasticidade e resistência das fibras (EICHHORN, 2001; JONH, 2007).

Os principais constituintes das fibras naturais vegetais são a celulose, a hemicelulose e a lignina. A celulose por ser um polímero hidrofílico glucano constituído por uma cadeia linear de unidades de anidra-glicose ($C_6H_{11}O_5$), que contêm grupos de hidroxila alcoólicos, conforme apresentado na Figura 2.3. Estes grupos de hidroxilas formam ligações de hidrogênio intermoleculares e intramoleculares com a macromolécula em si e também com outras macromoléculas de celulose ou de moléculas polares. Portanto, todas as fibras naturais são de natureza hidrofílica. Apesar da estrutura química da celulose de diferentes tipos de fibras naturais serem a mesma, o grau de polimerização varia. As propriedades mecânicas da fibra são significativamente dependentes do grau de polimerização (MOHANTY *et al*, 2005).

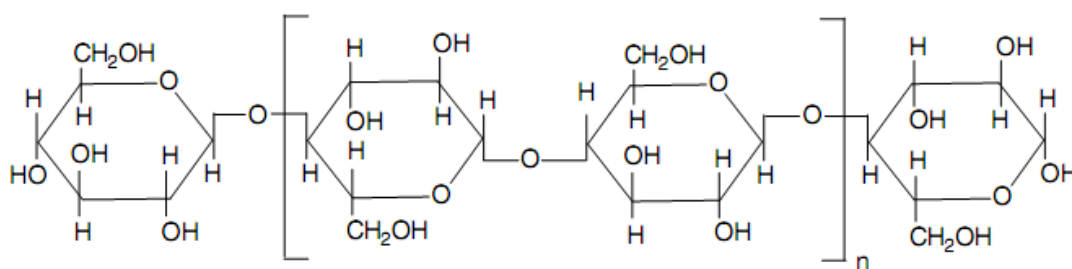


Figura 2.3 - Estrutura da celulose.
Fonte: MOHANTY *et al* (2005).

A lignina é um polímero bioquímico que funciona como um material de enrijecimento das plantas, que geralmente resistem à degradação microbiana. (MOHANTY *et al*, 2005).

Segundo Melo Filho (2012), as fibrocélulas são ligadas através da lamela intercelular ou média, constituída de hemicelulose e lignina. A cavidade central das fibrocélulas chama-se Lúmen, conforme pode ser observado esquematicamente na Figura 2.4(a), e através da microscopia eletrônica de varredura mostrada na Figura 2.4(b) para a fibra de juta.

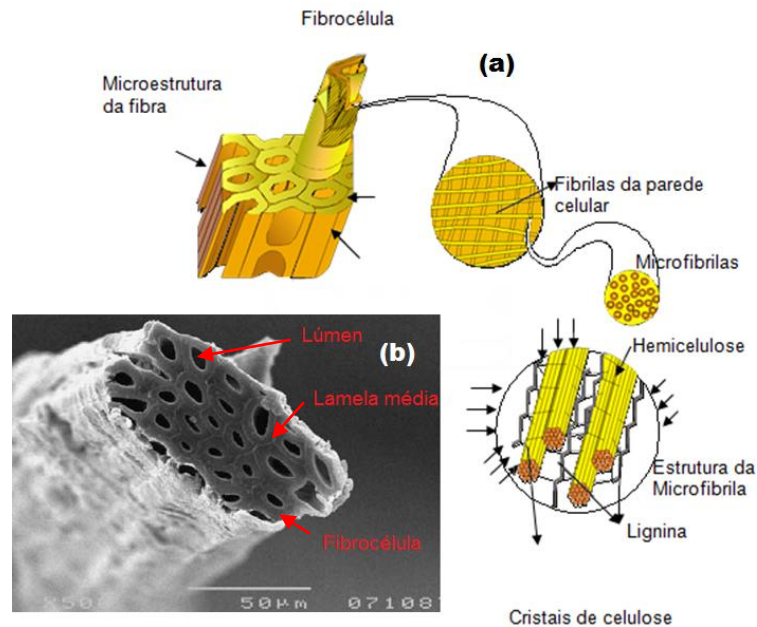


Figura 2.4 – a) Representação das fibrocélulas, fibrilas, microfibrilas e cristais de celulose de fibra vegetal;
b) Seção transversal da fibra de juta.

Fonte: a) Adaptado de MELO FILHO (2012); b) OKSMAN K. et al (2009).

Devido a grande incidência de poros permeáveis, que incluem os lúmens, as fibras vegetais exigem uma grande absorção de água e exibem consequentemente uma massa específica aparente inferior a real (SAVASTANO, 2000).

Segundo Agopyan e Savastano Jr. (1997) e Satyanarayana (2007), a variação na composição química entre as fibras, conforme apresentado na Tabela 2.4, pode gerar grandes variações com relação as propriedades físico-mecânica entre elas, como pode ser observado na Tabela 2.1 do item 2.1.

Tabela 2.4 – Composição química de algumas fibras naturais analisadas no Brasil.

Fibras	Celulose (%)	Hemicelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)	Extrativos (%)
Juta (<i>Corchorus capsularis</i>)	60	22,1	15,9	1,0	-
Sisal (<i>Agave sisalana</i>)	70,7-75,2	21,1	7,6 – 8,0	-	-
Coco (<i>Cocos Nucifera</i>)	43,4-53	14,7	38,3 - 40,7	-	3,5
Malva (<i>Urena lobata</i> Linn)	76	-	10,0	0,7	-

Fonte: AGOPYAN e SAVASTANO, Jr. (1997).

Entretanto é também de fundamental importância a obtenção de informações referentes ao grau de polimerização destas fibras, a sua morfologia e assim como a cristalinidade das mesmas.

2.1.1.1 Fibras de juta e malva

De acordo com o aspecto sócio econômico as fibras de juta e malva são consideradas como umas das principais riquezas da economia agrícola da região Amazônica, sobretudo no Amazonas e Pará. Elas assumem uma grande relevância, não apenas pela geração de renda, mas por demandar quantidade expressiva de mão-de-obra e contribuir para a fixação do homem no campo, além de induzir a criação de novos empregos nos processos de comercialização e industrialização.

A juta (*Corchorus capsularis*) e malva (*Ureta Lobata L*) produzem fibras têxteis similares, tradicionalmente usadas na fabricação de vestuário, barbantes, cordões, cortinas, fios, forração de estofados, fundo de tapetes, telas para artesanatos, sobretudo, na confecção de sacaria para acondicionamento de produtos agrícolas (Figura 2.5), inclusive das commodities, como o café, o açúcar, a castanha-de-caju e o cacau (MARTINS NETO, 2010; SAVASTANO, 2000).

As fibras de juta e malva são originárias do talo, fazem parte das plantas dicotiledôneas. Os feixes de fibras são unidos entre si e mantidos no lugar pelo tecido celular do floema e pelas substâncias gomosas e graxas.



Figura 2.5 – Fibras de juta e malva beneficiadas industrialmente: (a) Cordões e (b) Sacarias.

No Apêndice 1 é comentado as etapas do beneficiamento industrial local das fibras de juta e malva para produção de cordões até a confecção de sacarias.

Com relação à produção mundial, segundo a *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO), os principais países produtores de fibras de juta e de fibras com características semelhantes a esta, são a Índia e Bangladesh, conforme apresentado na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Produção mundial da fibra de Juta e demais fibras com características semelhantes em mil toneladas

	2005/2006	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011
Mundo	2898.0	3216.8	3236.7	2588.6	2629.4	3085.1
Índia	1530.0	1800.0	1782.0	1476.0	1620.0	1962.0
Bangladesh	1138.7	1186.4	1236.8	931.0	839.6	990.0
Myanmar	39.9	43.6	19.1	12.9	8.0	8.0
Nepal	17.7	17.1	16.8	17.0	17.7	17.0
Brasil	26.1	26.0	25.7	20.0	14.9	15.0
China	82.8	86.8	86.8	80.0	75.2	75.0

Fonte: FAO (2011).

Observando o período de 2010 a 2011, constata-se que a Índia produziu 64% da produção do mundo, Bangladesh produziu 32%, enquanto o Brasil representa somente 0,5 % da produção mundial. E no passar dos anos houve uma queda em média de 20% na produção do Brasil.

Dados informados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2010) e Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB (2011) indicam que apenas dois estados são produtores de juta e malva, que são os estados do Amazonas e Pará com 88% e 12% respectivamente, conforme Tabela 2.6.

	2003	2004	2010	Juta (2010)	Malva (2010)
Amazonas	13.416	12.619	12.502	907	11.595
Maranhão	230	50	-	-	-
Pará	3.570	2.376	1.648	27	1.621

Fonte: CONAB (2011); IBGE (2010).

De acordo com a Conab (2011), os fatores que influenciam na diminuição destas produções foram:

- Condições climáticas desfavoráveis, com ocorrência de enchentes nas bacias hidrográficas da Região Amazônica e conseqüentes perdas de lavouras;
- Demora das empresas de aniagem em sinalizar que atuariam no mercado adquirindo fibras, bem como ao preço;
- Dificuldade do produtor em comercializar sua fibra pós-colheita;
- Perdas de produtividade decorrente do corte prematuro das plantas.

Com relação ao ciclo de produção, segundo a COOMAPEM – Cooperativa Mista Agropecuária de Manacapuru Ltda, da fibra de juta e malva dura geralmente em média de 6 a 7 meses por ano. Este ciclo de produção envolve um período de safra, compreendido entre os meses de agosto até meados de abril. Com o surgimento das várzeas em torno do mês de agosto, os ribeirinhos antes dos níveis d'água subirem iniciam os plantios, e espera-se a

maturação das plantas nos meados de dezembro, onde o nível d'água das varzeas começa a diminuir e as fibras *in natura* estão prontas para a colheita.

Ainda, segundo a COOMAPEM, esta colheita é processada artesanalmente na propriedade – a partir de dezembro. Neste processo, os caules são cortados, acondicionados em feixes e deixados submersos nas águas. Após cerca de cinco dias, as fibras são retiradas do caule, através da separação manual das cascas, talos e fibras internas.

Para Young (1994) este processo de separação acontece através do apodrecimento controlado, por enzimas ou bactérias (bioquímicas e/ou biológico), que agem na pectina do caule ou da folha.

Conforme comentado pela COOMAPEM as fibras são expostas ao sol, secando em varais durante um período de aproximadamente sete dias. Após as fibras secas, estas são acondicionadas em fardos manuais de, em média, 100 a 200 kg (sem padronização) e estocadas sob os assoalhos das casas e em seguida os fardos são comercializados através do sistema de beneficiamento agroindustrial e industrial local.

2.2 Compósitos laminados cimentícios

2.2.1 Conceitos e informações gerais

Material compósito é definido como uma combinação macroscópica de dois ou mais materiais distintos, possuindo uma interface distinta entre si (CALLISTER, 1997).

Com esta definição pode-se afirmar que o concreto e a argamassa são compósitos cimentícios ou também chamados de matrizes cimentícias, pois são formados através da união do cimento, do agregado graúdo e/ou miúdo e água servindo assim como preenchimento de estruturas na Construção Civil.

Já um compósito laminar é uma série de folhas bidimensionais, possuindo uma direção preferencial conforme a solicitação do esforço, podendo ser prensadas umas sobre as outras com diferentes orientações (CALLISTER, 2000).

Segundo Silva (2002), o processo mais utilizado na produção de laminados cimentícios é a técnica Hatscheck. Este processo recebe o sobrenome de Ludwaing Hatscheck, austríaco, que produziu placas de cimento e asbesto sendo bastante utilizadas na construção civil.

2.2.2 Agente aglomerante principal

O compósito laminado cimentício tem como elemento aglomerante principal o cimento, onde o material apresenta em forma de pó e é constituído de silicatos e aluminatos de cálcio. Ele resulta da moagem do clínquer, obtido através de uma mistura de calcário e argila, convenientemente dosada e homogeneizada sendo aquecida até a fusão incipiente (30% de fase líquida), de tal forma que toda a cal se combine com os materiais argilosos, não resultando cal livre em quantidade prejudicial.

Após esta queima, adiciona-se sulfato de cálcio (gesso), cujo teor de sulfato não deve ultrapassar a 3%, a fim de regularizar o tempo de início das reações químicas do cimento. Como matéria prima para a fabricação deste composto tem-se, então, o calcário, argila e o gesso.

Ao longo do tempo grande partes das pesquisas utilizaram como principal aglomerante na matriz o cimento Portland, porém esta matriz cimentícia quando hidratada produz alta alcalinidade oriunda da portlandita $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ liberada quando acontece esta hidratação, ocorrendo ainda à presença de álcalis solúveis como o óxido de potássio $[\text{Na}_2\text{O}]$ (SILVA, 2002).

Os estudos realizados por Marquês (2009) e Melo Filho (2005), minimizam o uso do cimento, substituindo-o parcialmente por adições minerais tais como a metacaulinita e resíduos de tijolos cerâmicos, resultando assim em uma matriz cimentícia mais resistente a agentes químicos, com menor porosidade e menor calor de hidratação, menor risco de fissuração térmica e maior consumo de hidróxido de cálcio através das reações pozolânicas resultando na formação de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) que diminui a alcalinidade da matriz cimentícia.

2.2.3 Adições minerais

As adições minerais têm como finalidade melhorar as propriedades físico-mecânicas do concreto ou argamassa, através da soma ou substituição parcialmente do cimento na matriz cimentícia. É um material inorgânico com finura normalmente menor ou igual ao do cimento que quando não utilizados, conforme citado anteriormente, acabam sendo agentes poluidores ambientais.

Dentre as principais adições minerais mais utilizadas, que proporcionam uma reação pozolânica, estão a sílica ativa ou microssílica, extraída através da fabricação de ligas metálicas, cinzas de cascas de arroz e de restos de colheitas de grãos, e a metacaulinita que é originada através da calcinação e moagem de argilas cauliníticas com temperaturas variando de 600°C a 900°C.

De acordo com Mehta, Monteiro (2008), a sílica ativa, a metacaulinita e a cinza da casca de arroz são classificadas como superpozolanas, pois além de apresentarem uma pozolana de alta reatividade, aumentando a coesão da pasta melhorando a resistência mecânica em torno de 10% a 40%, além de diminuir o PH da água, diminuem a porosidade total, aumentam o consumo de Ca(OH)_2 através da reação pozolânica.

A metacaulinita apresenta grande disponibilidade no Brasil e baixo custo, surgindo como alternativa interessante na produção de material cimentício: concreto ou argamassa, minimizando assim o impacto ambiental produzido pela indústria da construção civil, diminuindo a produção de CO₂ na atmosfera.

Segundo Luz et al (2005), a metacaulinita ou o caulim é um minério composto de silicatos hidratados de alumínio abundante na crosta terrestre. Este minério é basicamente formado por caulinita, um argilomineral produzido pela decomposição do feldspato, e apresenta coloração branca ou esbranquiçada, devido ao baixo teor de ferro.

2.3 Compósitos laminados cimentícios reforçados com fibras vegetais

Os estudos sistemáticos de fibras vegetais como reforço em matrizes cimentícias começou na Inglaterra por volta de 1970 (SAVASTANO Jr., AGOPYAN (1998)). Com a proibição ou a restrição na utilização do asbesto na fabricação de produtos de fibrocimento no final do século 20, em alguns países, devido ser um material cancerígeno (MENDES, 2001), houve um grande desenvolvimento de pesquisas em todo mundo na substituição de fibras sintéticas e também de asbesto por fibras vegetais em matrizes cimentícias. Dentre os diversos trabalhos desenvolvidos, destacam-se: Swamy e Stravides (1979), Swift e Smith (1979), Campbell e Coutts (1980), Aziz *et al.* (1981), Ramaswamy *et al.* (1983), Aziz *et al.* (1984), Aziz *et al.* (1987), Studinkat (1989), Pirie *et al.* (1990), Soroushian e Marikunte (1992), Sarigaphuti *et al.* (1993), Tolêdo Filho (1997), Savastano Jr. e Agopyan (1998), Bledzki e Gassan (1999), Arsène et al. (2001), Savastano Jr. *et al.* (2002), Bilba *et al.* (2003), Mohr (2005), Roma *et al.* (2008), Melo Filho et al. (2007) e Tolêdo Filho *et al.* (2009).

No Brasil, a pesquisa pioneira coube ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (Ceped), Camaçari, Bahia, com início em 1980 (GUIMARAES, 1987).

Verificou-se que com a utilização de fibras vegetais em laminados cimentícios, com baixo módulo de elasticidade e baixa aderência fibra-matriz, possibilitava resultados satisfatórios em relação aos ensaios de tração e flexão em comparação aos resultados obtidos com uma matriz cimentícia convencional (LIMA, 2004; MELO FILHO, 2005; MARQUES, 2009; MELO FILHO, 2012).

Os compósitos mais produzidos consistem em fibras curtas dispersas no interior da matriz (Figura 2.6a). Nesse tipo de reforço, a contribuição das fibras para as propriedades mecânicas do compósito é inferior à que ocorre quando se utiliza fibras longas orientadas perpendiculares ao carregamento (Figura 2.6b,c), quando estes são submetidos à flexão (MARQUES, 2009).

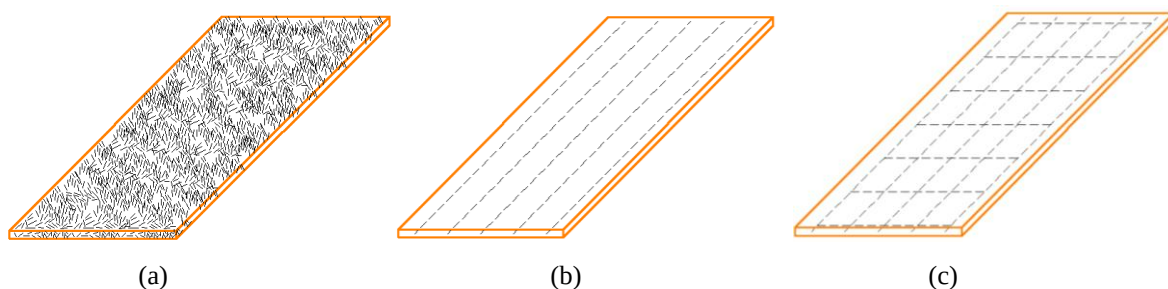


Figura 2.6 - Tipos de distribuição de reforço fibroso: a) Fibras curtas distribuídas aleatoriamente, (b) Fibras contínuas unidirecionais e (c) Fibras contínuas bidimensionais.
Adaptado de MELO FILHO (2005).

De um modo geral, os elementos cimentícios reforçados com fibras curtas vegetais apresentam menores número de microfissuras com aberturas e espaçamento maiores em comparação aos compósitos reforçados com fibras longas, conforme observado nas literaturas de Silva 2002 e Melo Filho 2012. Portanto, os compósitos reforçados com fibras longas suportam maiores esforços com maior número de fissuras e menor espaçamento, sendo assim de fundamental importância à aplicação destes compósitos em estruturas sujeitos a maiores esforços.

Segundo Oliveira (2000), as propriedades dos compósitos fibrosos dependem de inúmeros fatores:

- Resistência mecânica do material empregado na fabricação do compósito;
- Característica geométrica da fibra;
- Teor de fibras adicionadas na matriz cimentícia;
- Orientação e distribuição das fibras dentro da matriz cimentícia;
- Dimensão máxima do agregado utilizado para confecção da matriz cimentícia;
- Tensão de aderência entre as fibras e a matriz.

Normalmente, o compósito fibroso quando submetido a esforços de tração ou flexão, resulta em ruptura com o aparecimento de inúmeras microfissuras na estrutura. As fibras, ao interceptarem as fissuras, atuam como uma ponte de transferência de tensões. Na matriz fissurada, parte das tensões é transferida para as fibras ao longo de sua superfície, onde são desenvolvidas tensões de aderência. Consequentemente, para que ocorra a abertura das fissuras é necessária mais energia, e à medida que a tensão é transferida através das fibras, mais microfissuras se formam na peça, tendo-se o que é chamado de estado de múltiplas fissuras (BALAGURU, 1989).

Com relação à interação fibra-matriz, a alta capacidade de absorção de água da fibra vegetal pode provocar a perda de aderência, diminuindo assim a resistência de aderência na interface. Esta interface, também conhecida por zona de transição, difere do restante da pasta, visto que durante o processo de absorção no entorno da fibra, ocorre a formação de um filme que gera uma maior porosidade, resultando assim na diminuição da transferência de tensões (SALES, 2006).

Com relação à aplicabilidade, os compósitos laminados cimentícios reforçados com fibras vegetais podem ser utilizados em:

- Reforços de elementos estruturais;

- Bancadas e divisórias entre ambientes internos e externos (Figura 2.9);
- Pisos Elevados (Figura 2.8);
- Elementos de Cobertura, no formato de telhas ou painéis (Figura 2.7);
- Canaletas;
- Revestimento e reparos de tubos, taludes e canais abertos;
- Pavimentos de condomínios diversos, praças e indústrias.



Figura 2.7 – Aplicação em telhas
Fonte: TONOLI (2006).



Figura 2.8 – Aplicação em pisos elevados
Fonte: BERNARDES (2009).



Figura 2.9 – Aplicação em divisórias
Fonte: BEVILAQUA (2005)

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS

No presente capítulo são exibidos os materiais utilizados na produção dos compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais de juta e malva. Neste contexto, é apresentada a origem das fibras utilizadas nesse estudo, assim como os resultados da caracterização físico-química dos demais materiais da pesquisa obtidos por pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE.

3.1 Fibras de juta e malva

As fibras de juta (*Corchorus capsularis*) e malva (*Ureta Lobata L*) foram obtidas na empresa COOPERFIBRAS, localizada a aproximadamente 84 km da cidade de Manaus, no município Manacapuru, estado do Amazonas, Brasil, conforme coordenadas e mapa apresentado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Localização da cidade de Manacapuru (AM).
Fonte: Google Earth (acesso 20/01/2012).

As fibras são beneficiadas em dois momentos, primeiramente na zona rural pelos trabalhadores (ribeirinhos) conforme comentado no item 2.1.1.1. E no segundo momento nas indústrias locais. No entanto, o processo de limpeza das fibras adotado nessa pesquisa foi o mesmo adotado por Melo Filho (2005) onde as fibras foram lavadas e “pentadas”.

As fibras foram obtidas em março de 2011, sendo que todo o procedimento experimental da pesquisa foi realizado no período de julho a agosto 2011.

3.2 Cimento

Para a confecção dos compósitos laminados foi utilizado o Cimento Portland CP II F-32, cuja composição química está apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Propriedades químicas do cimento CP II F-32.

Substância química	Prop. Químicas (%)
CaO	71,476
SiO ₂	15,326
Al ₂ O ₃	3,706
Fe ₂ O ₃	3,777
SiO ₃	3,327
MgO	1,344
K ₂ O	0,189
Na ₂ O	0,331
Massa específica (g/m ³)	3,08
Perda ao fogo	4,93

Fonte: Melo Filho (2012).

O cimento CP II F – 32 é um cimento composto que tem como adição mineral o filler (calcário moído). As principais vantagens desse cimento são a diversidade nas aplicações, secagem rápida, melhor desempenho e acabamento. Sendo um cimento muito utilizado tanto para concretos quanto para argamassas em geral.

A Figura 3.2 mostra a curva granulométrica do cimento CP II F-32, que segundo Melo Filho (2012), apresentou 95% das partículas de cimento inferiores a 68 µm e 50% inferiores a 18 µm resultando no resíduo final de 7,7% retido na peneira 75 µm.

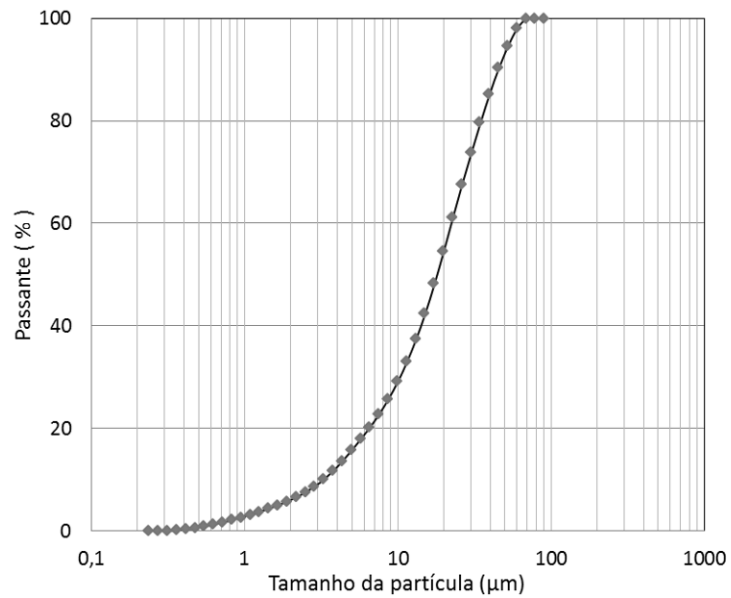


Figura 3.2 – Curva granulométrica do cimento CP II F-32.
Fonte: MELO FILHO (2012).

3.3 Areia

Foi empregada na fabricação dos compósitos uma areia quartzosa de rio com massa específica de $2,67\text{g/cm}^3$. Na Figura 3.3 é apresentada a curva granulométrica desta areia.

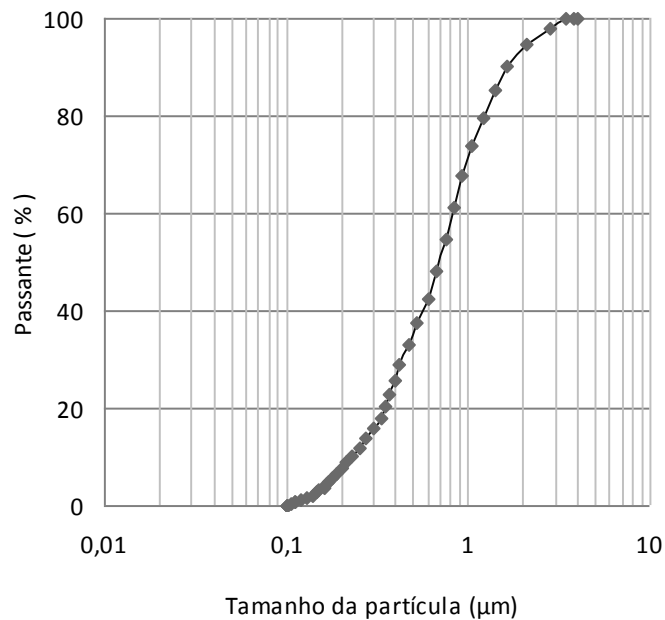


Figura 3.3 – Curva granulométrica da areia.
Fonte: MELO FILHO (2012).

De acordo com Melo Filho (2005 e 2012), as partículas com granulometria inferior a 1,18mm influenciam na área de contato entre as partículas dos aglomerantes, tornando o produto final mais homogêneo, dessa maneira foi então adotado, durante a moldagem das placas, a utilização de areia com diâmetro máximo das partículas menor que 1,18 mm.

3.3 Argilas calcinadas – metacaulinita

A metacaulinita utilizada neste trabalho foi fornecida pela empresa METACAULIM do Brasil Indústria e Comércio LTDA. A fabricante garante as seguintes composições químicas, propriedades físicas e de desempenho da metacaulinita conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Composição química, propriedades físicas e desempenho da metacaulinita.

Composição Química		
Substância química	Prop. Químicas (%)	Limites – NBR 15894.1
CaO	0,2	CaO+MgO < 1,50%
SiO ₂	56,0	44,0% - 65,0%
Al ₂ O ₃	36,0	32,0% - 46,0%
Fe ₂ O ₃	2,00	-
MgO	0,20	CaO+MgO < 1,50%
K ₂ O	1,50	< 2,30%
Na ₂ O	0,1	< 0,50%
Propriedades Físicas e Desempenho		
Ensaio	Valores	Limites – NBR 15894.1
Resíduo peneira 0,045mm (#325)	5%	< 10%
Área específica (BET)	240.000 cm ² /g	> 150.000
Massa específica	2,58	-
Massa Unitária	0,62	-
	115%	> 105%
Índice de Atividades pozolônicas pelo método Chapelle	1.000g Ca(OH) ₂ /g	> 750g Ca(OH) ₂ /g

Fonte: Metacaulim do Brasil (acesso 12/10/2011).

3.4 Superplastificante

Utilizou-se como aditivo o superplastificante do tipo PA (Poliacrilato, Glenium 51), com teor de sólidos de 31,20 %, massa específica de 1.073 kg/m³ e pH 6,2 (FERREIRA, 2012).

Segundo Ferreira (2012), a determinação do ponto de saturação das partículas finas conforme ensaio de fluidez da pasta realizado por Aïtcin (2000), resultou em 95% de saturação dos materiais finos (cimento e metacaulinita).

3.5 Água

A água utilizada em toda a fase experimental era proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro, com as características descritas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Características da água utilizada na confecção dos compósitos.

Elemento Químico	Obtido	Padrão – Ministério da Saúde
Cloro residual	0	0,2 mg/l
pH	6,5	6,5 – 8,5
Nitrato (N-NO ₃)	30 mg/l	10mg/l (N-NO ₃)

Fonte: MARQUES (2009).

CAPÍTULO 4 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

4.1 Informações complementares

No presente trabalho os procedimentos experimentais foram divididos em três etapas. Na primeira etapa foi feita a caracterização química, física e mecânica para determinação de algumas propriedades das fibras de juta e malva, conforme apresentado na Figura 4.1.

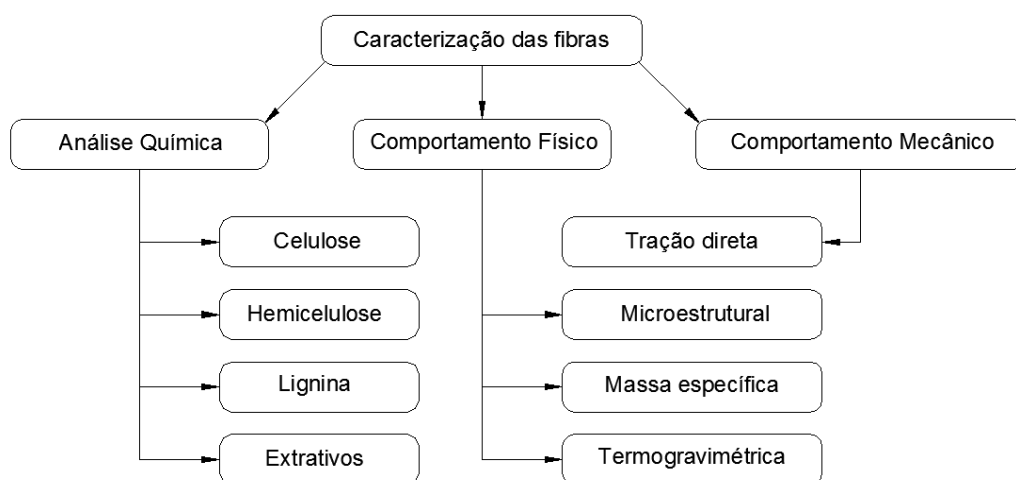


Figura 4.1 – Fluxograma dos ensaios realizados para determinação das propriedades das fibras de juta e malva.

É importante ressaltar que antes das caracterizações química e física e da aplicação das fibras nos compósitos foi feito primeiramente um beneficiamento conforme descrito no item 3.1.

Antecedendo a produção dos compósitos, buscou-se a matriz cimentícia mais adequada. Para tanto foi utilizada a matriz desenvolvida por Melo Filho (2012), o qual produziu uma matriz livre de hidróxido de cálcio com a substituição de 50% do cimento por metacaulinita obtendo em seu estudo, compósitos reforçados com fibras de sisal com elevada durabilidade e sem a deterioração da fibra de sisal mesmo depois de submetidas à intemperismo acelerado (25 ciclos de molhagem e secagem). Neste estudo, comprovou-se também, que esta matriz proporciona um compósito mais resistente, menos poroso, com

menor absorção de água e ainda preservando as propriedades mecânicas das fibras vegetais. O traço utilizado no presente trabalho pode ser observado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Traço da matriz e do compósito produzido no presente estudo.

Matriz				Compósito
				Fibras longas
MK (%)	CP (%)	a/mc	SP (%)	Vf (%)
50	50	0,45	2,0	8

Onde:

MK –metacaulinita;

SP - Superplastificante;

CP –Cimento Portland;

Vf – volume de fibra adotado na mistura;

a/mc – fator água/material cimentante;

Na segunda etapa procedeu-se com a produção dos laminados. Nesta etapa adotaram-se procedimentos semelhantes aos utilizados por Melo Filho (2012) e Ferreira (2012).

E na terceira etapa os compósitos foram caracterizados quanto ao comportamento físico-mecânico, conforme ensaios apresentados na Figura 4.2.

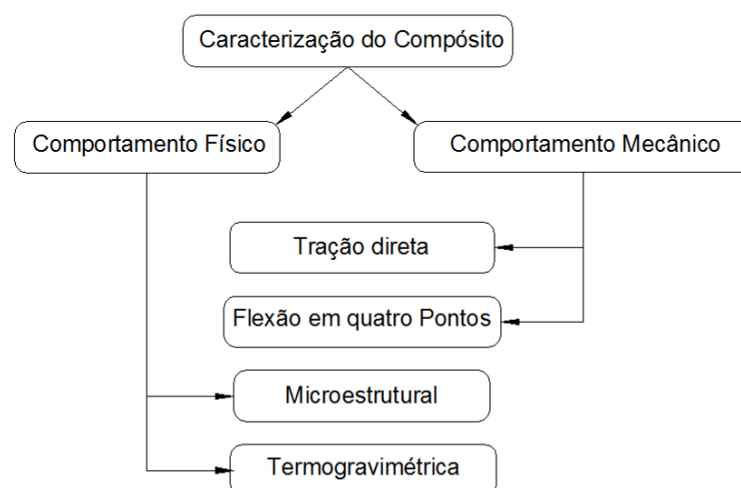


Figura 4.2 – Fluxograma dos ensaios realizados para avaliação do comportamento dos compósitos reforçados com fibras longas de juta e malva.

Os ensaios de caracterização físico-mecânico das fibras e dos compósitos foram realizados na Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Centro de Tecnologia, no Laboratório de Estruturas - Labest. A análise microestrutural das fibras e da interface foi realizada na Universidade Federal do Amazonas – UFAM, no Departamento de Geociências, no Laboratório de microscopia eletrônica. A composição química das fibras foi realizada com o apoio da Universidade Federal de Lavras – UFLA através do Departamento de Ciências Florestais.

4.2 Caracterização das fibras

4.2.1 Análise química

Antes da caracterização química, as fibras foram cortadas no comprimento de aproximadamente 1 cm e em seguida adicionadas na parte superior do moínho de Rotor Vertical – Modelo SP-03 de quatro facas e duas fixas com funil resultando em um pó, para então realizar a caracterização química das fibras de juta e malva.

Para cada fibra foram analisadas 3 amostras, as análises químicas foram realizadas conforme as Normas descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Análise química das fibras com as respectivas normas e referências bibliográficas.

ANÁLISE	NORMA OU REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
Teor de Extrativos Totais	NBR 14853
Teor de Lignina insolúvel/ácida	NBR 7989
Teor de Inorgânicos	NBR 13999
Holocelulose	BROWNING, B.L. (1963)
Celulose	KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, E. P. A (1987)
Hemicelulose	Obtido pela diferença entre teor de holocelulose e celulose

4.2.2 Tração direta

Neste ensaio utilizou-se uma máquina de ensaios universal Shimadzu AGX-100kN com célula de carga de 1kN e velocidade de 0,1 mm/min. Para execução do ensaio nas fibras utilizou-se um suporte de papel com gramatura de 75g/m². Na Fig. 4.3(a) são mostradas as dimensões do suporte de papel e na Fig. 4.3(b) é mostrada uma das fibras sendo ensaiadas.

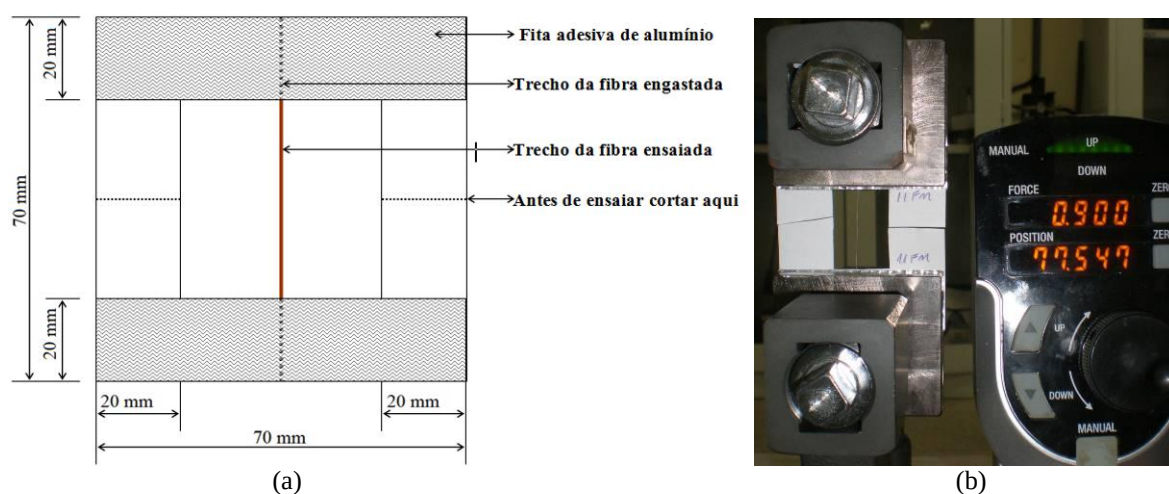


Figura 4.3 – Detalhe da fibra submetida a tração direta: (a) Dimensão do suporte para fixação da fibra e (b) Garra superior e inferior da máquina.

Foram ensaiadas 30 amostras com comprimento de 70 mm para cada tipo de fibra. O trecho central ensaiado teve um comprimento de 30 mm. Para fixação da fibra nas extremidades do suporte foi necessário 20 mm de fibra para ambos os lados, conforme Fig.4.3(a). Para melhorar a aderência e proteger a superfície das fibras no decorrer do ensaio, as fibras foram fixadas nas extremidades no suporte de papel com auxílio de cola de secagem rápida da marca Superbond e em seguida foi colocado uma camada de fita metálica de alumínio, de acordo com a norma ASTM C1557.

A tensão última de tração foi determinada dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção transversal das fibras a qual foi obtida por meio de análises microscópicas. O módulo de elasticidade foi calculado através da inclinação da reta da curva apresentada nos gráficos

tensão x deformação. Esses valores são aproximados, já que a máquina de ensaios não possuía aparatos para a medição da deformação real das amostras.

4.2.3 Análise microestrutural: Óptica (MO) e MEV

Na análise de microscopia óptica foi utilizada uma câmera digital Canon A-520 acoplada a um microscópio monocular Quimis, modelo Q-705M1, conforme Figura 4.4.



Figura 4.4 – Microscópio monocular Quimis, modelo Q-705M1.

Esta análise permitiu a determinação da espessura de cada amostra, após a obtenção das imagens, um software de desenho foi utilizado para a determinação das medidas.

A análise óptica foi executada antes do ensaio de tração nas fibras. Cada amostra de fibra foi analisada em três trechos, conforme Figura 4.5(a), onde em cada trecho foram feitas cinco leituras (Figura 4.5b), determinando assim, a espessura média de cada fibra. Porém, para a determinação da seção das fibras buscou-se auxílio da microscopia eletrônica de varredura – MEV.

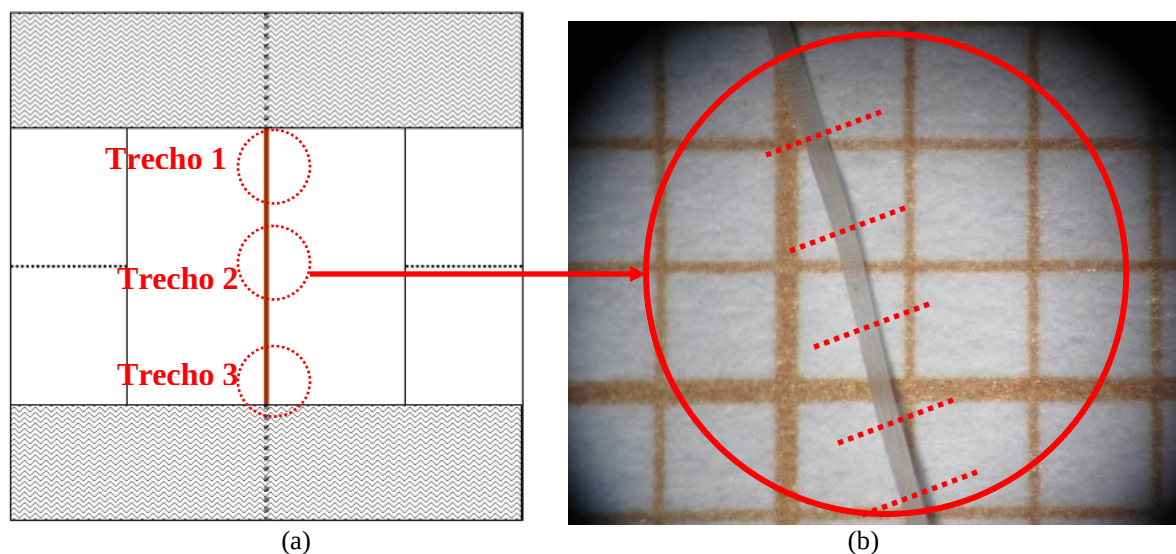


Figura 4.5 – Determinação da espessura das fibras: (a) Trechos analisados e (b) Obtenção das cinco leituras no trecho 2.

As análises de microscopia eletrônica de varredura foram realizadas no microscópio Modelo: XL-30 – ESEM marca Phillips (Figura 4.6a) do Laboratório de análise microestrutural da Universidade Federal do Amazonas – UFAM.

Para obtenção da imagem da seção transversal das fibras, foi necessário o corte no trecho a ser visualizado com o auxílio de uma lâmina afiada com a finalidade de eliminar qualquer alteração na superfície da seção. Para melhorar a condição do corte, as fibras ficaram imersas em água por 48h antes do corte.

As amostras foram fixadas através de fita adesiva dupla face em suportes de alumínio, também conhecidos como porta-amostra, com 10 mm de diâmetro e metalizados com Au (ouro), pelo método “Sput-tering”, durante 30 minutos, utilizando o equipamento Balzers SCD 050 Sputter Coater (Figura 4.6b). Em seguida fez-se a obtenção das imagens, onde o microscópio operou com aceleração de voltagem de 30 kV.

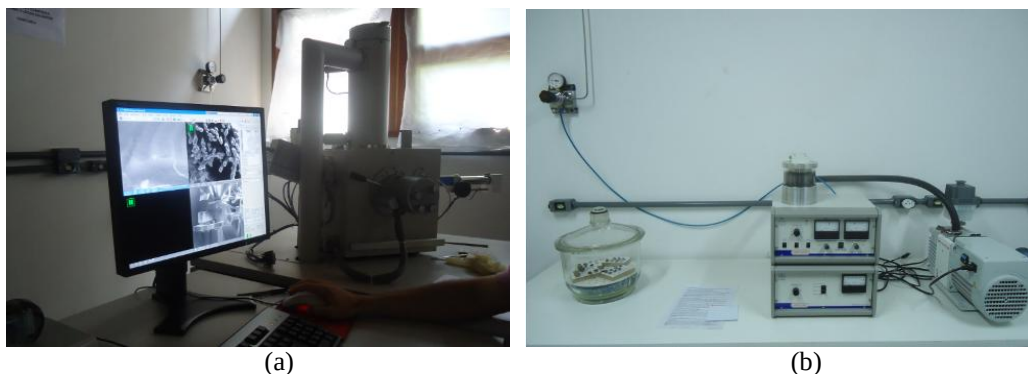


Figura 4.6 - Análise micro-estrutural das fibras: (a) Microscópio eletrônico de varredura e (b) Metalizador.

4.2.4 Determinação da massa específica

Para determinação da massa específica foram ensaiadas 3 amostras de cada espécie, de acordo com o seguinte procedimento:

- i) Primeiramente foi determinado o peso das fibras em uma balança digital com precisão de cinco casas decimais;
- ii) Em seguida, separou-se um recipiente com escala graduada e água potável, sendo feita a leitura inicial do volume;
- iii) E finalmente adicionou as fibras no recipiente com água, sendo em seguida feitas várias leituras do volume, até os valores ficarem constantes.

Para a obtenção da massa específica, baseando-se no princípio da imersão, no qual a água possui massa específica igual a 1g/cm^3 onde o volume deslocado pela imersão da peça da fibra será igual ao seu peso, foi utilizado o valor médio.

Neste trabalho utilizaram-se estes resultados para o cálculo das frações volumétricas das fibras nos compósitos produzidos.

4.2.5 Análise termogravimétrica

Foram feitas no Laboratório da LABEST/COPPE/UFRJ de análises físico-químicas, as análises termogravimétricas das fibras de juta e malva através do equipamento de termogravimetria modelo SDT Q-600 Simultâneo da TA Instruments. O equipamento operou com as seguintes condições experimentais: atmosfera inerte (N₂); Fluxo máximo de 100 ml/min; Faixa de temperatura: 25°C até 1000°C; Taxa de aquecimento de 10°C por minuto.

A preparação de cada amostra ocorreu da seguinte forma: (a) separou-se um feixe de fibras com cerca de 100 g; (b) em seguida foi feito um corte manual com tesoura, obtendo-se fibras com tamanhos inferiores a 1 mm; e (c) por fim, foi feita a retirada de aproximadamente 10 mg para todas as análises, empregando para isso cadinhos de platina (Figura 4.7).



Figura 4.7 – Amostra em cadinhos de platina.
Fonte: MARQUES (2009).

4.3 Produção dos laminados

Para a utilização das fibras de juta e malva, como material de reforço no compósito, as fibras foram beneficiadas conforme item 3.1 e em seguida foram cortadas em tamanhos de 400 mm, separadas em feixes de acordo com seu peso e, por último, para que mantivessem uma melhor distribuição no momento da moldagem, estes feixes foram unidos através de três costuras transversais, formando assim uma camada de fibras, onde duas das costuras foram

feitas a 50mm das extremidades e uma na parte central, garantindo assim um melhor alinhamento e facilitando o processo de moldagem. Os compósitos foram moldados com uma fração volumétrica de 8% de fibras distribuídas em 5 camadas.

Antecedendo a produção dos laminados, foi calculado o volume e, com o peso específico da mistura fresca, calculou-se a massa de argamassa necessária para cada camada, preservando a espessura desejada. Tomou-se o cuidado de deixar os materiais já separados, conforme mostrado na Figura 4.8, para que não ocorresse atraso durante a confecção do laminado.



Figura 4.8 – Materiais antes da moldagem.

Na produção dos laminados foram seguidas as respectivas etapas:

i) Mistura dos materiais secos: primeiramente os materiais da argamassa foram misturados em seus estados secos em um misturador de bancada, com capacidade de 20 l (Figura 4.9), na seguinte ordem: cimento, metacaulinita e areia.



Figura 4.9 – Misturador de bancada com a mistura seca.

Este primeiro processo levou em média 2 minutos, sendo em seguida adicionada a água com o superplastificante diluído em seu interior, lentamente no misturador, deixando-se misturar por mais 3 minutos. Logo após, foi feita uma parada de 30 segundos para retirada de material retido na argamassadeira e misturado por mais 2 minutos até que a mistura apresentasse uma homogeneização visível para então ser feita a moldagem das placas. Durante os intervalos da mistura dos materiais foi passado desmoldante nas formas de alumínio e de acrílico para que houvesse melhor acabamento superficial dos laminados.

ii) Moldagem dos laminados: nessa etapa, ocorria a colocação no molde, com dimensões de 400 x 250 x 150 mm (Figura 4.10), com fundo e tampa de acrílico, da primeira camada de argamassa que era espalhada no molde com auxílio de uma espátula. Em seguida foi aplicada sobre a camada de argamassa uma camada de fibra unidirecionalmente no sentido longitudinal, conforme Figura 4.11a. Novamente, outra camada de argamassa foi colocada e espalhada com o auxílio da espátula (Figura 4.11b). Finalizando, a placa tinha cinco camadas de fibras e seis camadas de argamassa intercaladas com as fibras. Após a moldagem, as amostras eram envolvidas por uma manta umida a fim de garantir uma cura adequada até a desforma.

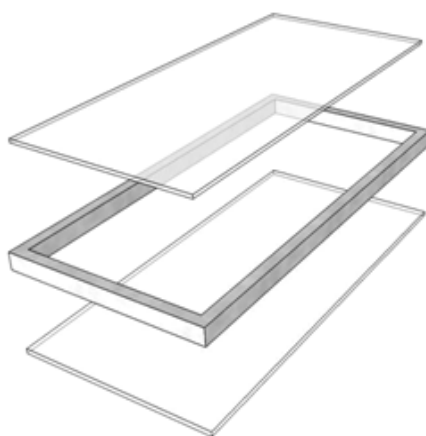


Figura 4.10 – Configuração dos moldes: desenho esquemático de todas as peças da forma.
Fonte: FERREIRA (2012).



Figura 4.11 – Moldagem das placas: (a) Colocação de uma das camadas de argamassa sobre as fibras, (b) Espalhamento da argamassa na forma.

Após a desforma, que variou de 3 a 4 dias após a produção, as placas foram levadas para a câmara úmida, que tinha temperatura de 22 ± 1 °C e umidade relativa de 100%, durante 28 dias. Em seguida, os compósitos foram cortados com o auxílio de uma serra de bancada com potência SSP – 75 e jato de água (Figura 4.12a), resultando em amostras com dimensões de 80x400x12mm (largura, comprimento e espessura) para o ensaio de flexão (Figura 4.12b) e amostras com dimensões de 50x400x12mm para o ensaio de tração.

Após o processo de cura, os corpos de prova foram armazenados em uma sala com temperatura controlada de 21 ± 1 °C por um período de até 40 horas antes da execução dos ensaios. Antes do ensaio, alguns corpos de prova foram pintados de branco com uma tinta a base de PVA para uma melhor visualização do processo de fissuras.



(a) (b)
 Figura 4.12 – Preparação das placas para ensaios mecânicos: (a) Corte das placas, (b) Amostras para o ensaio de flexão.

4.4 Caracterização dos compósitos

4.4.1 Tração direta

O ensaio foi realizado em uma máquina de ensaios eletro-mecânica modelo Shimadzu AGX (Figura 4.13), com célula de carga de 100 kN, e velocidade de deslocamento de 0,1 mm/min.



Figura 4.13 – Máquina Shimadzu AGX – 100KN.

O sistema utilizado para a fixação do corpo de prova consistiu de duas placas metálicas que eram coladas ao corpo-de-prova com uma camada fina de adesivo epóxi (Sikadur 32) conectadas a outra peça metálica por uma pino, a qual era presa na garra da máquina de ensaios (Figura 4.14a). Para manter o alinhamento da colagem foi utilizado um perfil “L” metálico.

Os deslocamentos axiais foram obtidos a partir da leitura média de dois LVDTs (linear variable differential transformer - sensores de medição de deslocamento linear) acoplados em aparatos de alumínio que eram fixados nas amostras através de parafusos localizados em quatro pontos, impedindo assim a sua rotação em relação ao eixo do corpo-de- prova (Figura 4.14b). O comprimento de leitura dos LVDTs utilizado foi de 160mm.

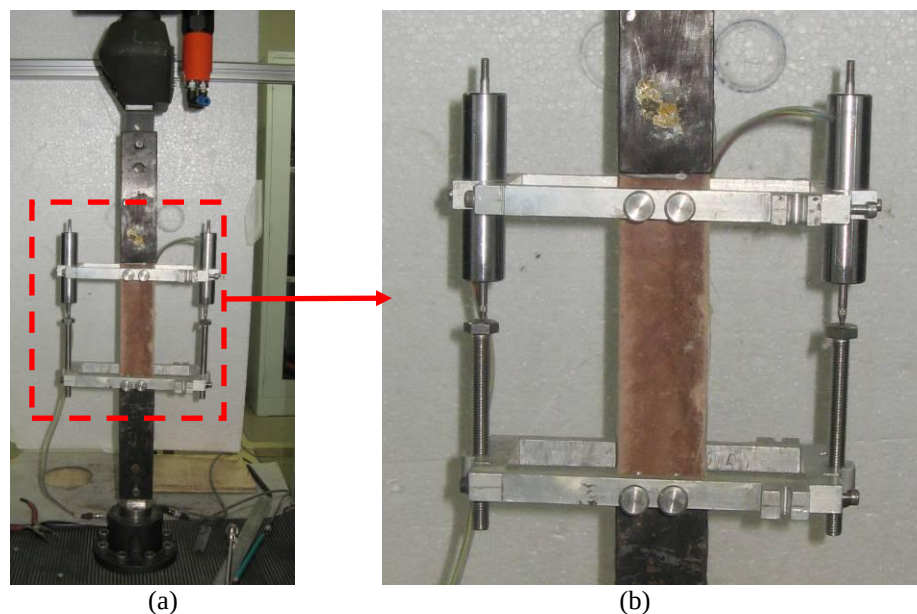


Figura 4.14 – Ensaio de tração nos compósitos: (a) início do ensaio tração posição inicial do corpo de prova, (b) Detalhe do posicionamento dos LVDT's.

O sistema de aquisição de dados, contínuo, foi baseado no programa Trapézio X (Figura 4.15), obtendo-se a carga por meio da célula de carga da máquina e o deslocamento por meio dos LVDTs. A tensão última de tração foi determinada dividindo a carga máxima resistida da amostra pela área da seção. Foram ensaiadas três amostras para cada tipo de reforço fibroso.

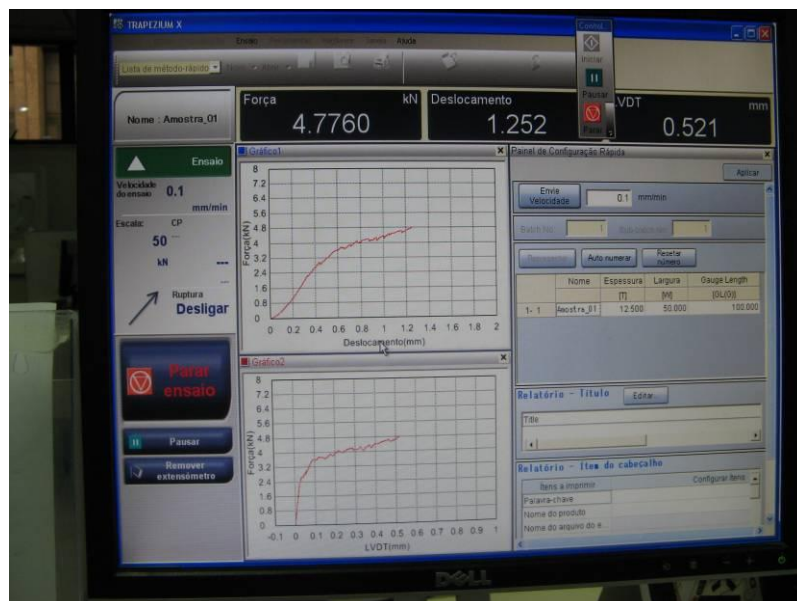


Figura 4.15 –Leitura do ensaio de tração pelo programa Trapézio X.

4.4.2 Flexão em quatro pontos

Os ensaios de flexão foram realizados máquina de ensaios mecânicos utilizada para os ensaios de tração direta - Universal Shimadzu, modelo AGX – 100KN, com célula de carga de 100 kN, mostrada na Figura 4.13. Neste ensaio foram realizadas três repetições para cada tipo de reforço fibroso.

A Figura 4.16 mostra o dispositivo de ensaio com quatro cutelos, montados na máquina de ensaio. O sistema de aquisição de dados, contínuo, foi baseado no programa Trapézio, obtendo-se a carga e a flecha no meio do vão por meio de um LVDT. A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,5 mm/min, padronizada para todos os ensaios de flexão. Os pontos de carga distavam 100 mm e o vão entre apoios distava 300 mm.

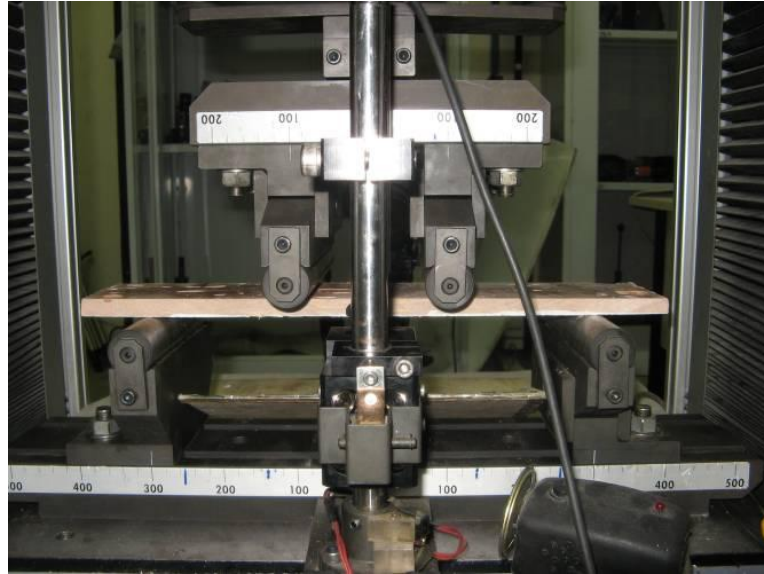


Figura 4.16 – Ensaio de flexão nos compósitos: início do ensaio flexão posição inicial do corpo de prova.

Os resultados foram expressos em tensão de tração na flexão, onde foi utilizada a equação 4.2 para o cálculo da mesma. Foram ainda calculados os índices de tenacidade pelo método da RILEM (1984), calculando-se a área sob a curva do gráfico carga x deslocamento até a carga de ruptura e dividindo-se o valor encontrado pela área da seção transversal.

$$\sigma = \frac{6M}{b d^2} \quad (4.1)$$

$$T = \frac{A}{b d} \quad (4.2)$$

onde:

σ = tensão de tração na flexão;
 M = momento de inércia;
 T = energia absorvida;
 b = largura da amostra;
 d = altura da amostra e
 A = área do gráfico carga x deflexão

Para o cálculo do módulo de elasticidade dos compósitos através dos resultados dos ensaios de flexão, foi adotada a fórmula conhecida da resistência dos materiais. O módulo de

elasticidade é obtido da equação da flecha no vão central em função da força aplicada, Equação 4.3.

$$\delta = \frac{Pa}{48EI} (3L^2 - 4a^2) \quad (4.3)$$

onde:

δ – Deslocamento Central;
P – Carga Aplicada;
E – Módulo de Elasticidade do material;
L – Vão entre os apoios;

Sendo $a = L/3$, tem-se a Equação 4.4:

$$\delta = \frac{23PL^3}{1296EI} \quad (4.4)$$

Isolando-se o módulo de elasticidade, tem-se a Equação 4.5:

$$E = \frac{23L^3}{1296I \left(\frac{P}{\delta} \right)} \quad (4.5)$$

Onde P/δ é o coeficiente da reta obtida da curva $P \times \delta$ (Carga x flecha) no trecho elástico.

4.4.3 Análise Microestrutural

A análise por microscopia foi realizada utilizando-se um microscópio de varredura, Modelo: XL-30 – ESEM, marca Phillips.

As amostras analisadas para verificar a interface fibra-matriz, foram retiradas de compósitos do experimento de tração, onde foram extraídos cubos com dimensões de no máximo 1cm de lado, de trechos que haviam sofrido maior influência e ruptura ao ensaio.

Para obtenção dos cubos utilizou-se uma serra de corte de marmoraria e em seguida foi realizado o polimento através de uma sequência de lixas comerciais, com granulometria de 400 e 200 mm.

As amostras foram fixadas através de uma fita adesiva dupla face no porta- amostra e metalizados com Au, pelo método “Sput-tering”, durante 30 minutos utilizando o equipamento Balzers SCD 050 Sputter Coater. A obtenção das imagens ocorreu tanto com o detector de eletrons secundários quanto retroespalhados e aceleração de voltagem de 30 kV.

CAPÍTULO 5 - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos ensaios químicos, físicos e mecânicos realizados nas fibras e nos compósitos reforçados com fibras longas de juta e de malva. No caso dos compósitos, estes foram submetidos a ensaios de flexão em 4 pontos e a tração direta. No corpo principal do texto são apresentadas curvas típicas, enquanto que as demais curvas são apresentadas no Apêndice 2.

5.1 Resultados físico-mecânicos e químicos das fibras de juta e de malva

5.1.1 Análise microestrutural da seção das fibras

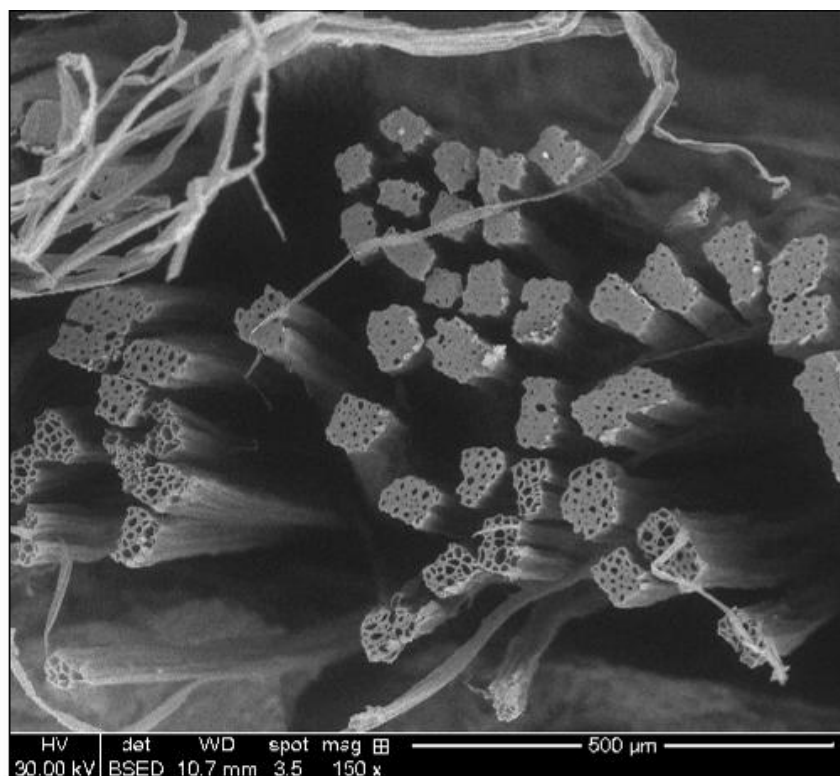
Conforme a metodologia empregada no item 4.2.2, referente à microscopia óptica, são apresentados na Tabela 5.1 os valores médios com os coeficientes de variação da espessura das fibras.

Tabela 5.1 – Valores referentes a espessura das fibras de juta e malva.

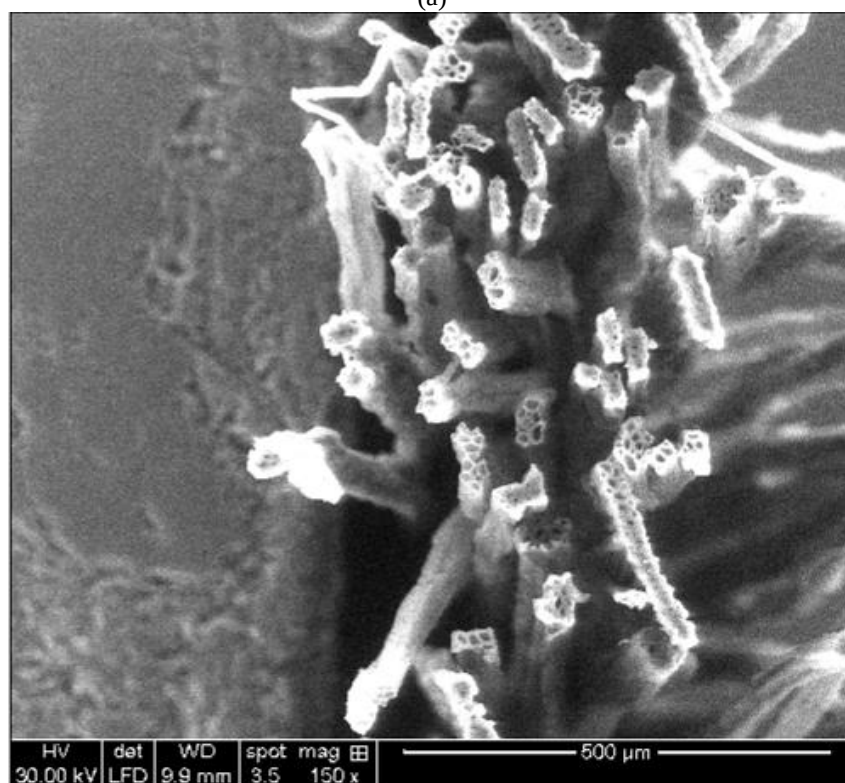
Fibras	Intervalo (mm)	Média (mm)	CV (%)
Malva	0,04 – 0,11	0,08	22,52
Juta	0,08 – 0,24	0,15	27,81

Observou-se que a espessura média obtida para as fibras de juta foi duas vezes maior que a espessura obtida para a fibra de malva. Supondo que a seção das fibras seja circular e utilizando como o diâmetro médio o valor médio da espessura, encontrado na Tabela 5.1, as fibras de juta e malva teriam áreas de $0,0177\text{mm}^2$ e $0,00503\text{mm}^2$, respectivamente.

Ao analisar as seções das fibras no microscópio eletrônico de varredura – MEV (Figura 5.1(a) e (b)), observou-se que tanto para as fibras de juta como para as fibras de malva a seção real da fibra aproximava-se mais a uma seção elíptica, como pode ser verificado na Figura 5.2(a) e (b).



(a)



(b)

Figura 5.1 – Imagens obtidas através do MEV: (a) Seções das fibras de juta e (b) Seções das fibras de malva.

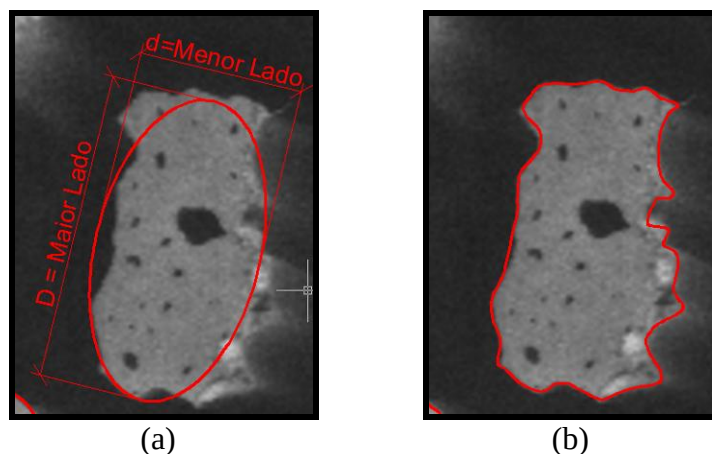


Figura 5.2 – Ampliação de uma das amostras analisadas no MEV: (a) Seção elíptica e (b) Seção Real.

Para tanto, foram avaliadas 14 amostras aleatórias de ambas as espécies, sendo então feito um comparativo entre a área calculada da seção elíptica e a área real (Figura 5.3), resultando assim na Tabela 5.2.

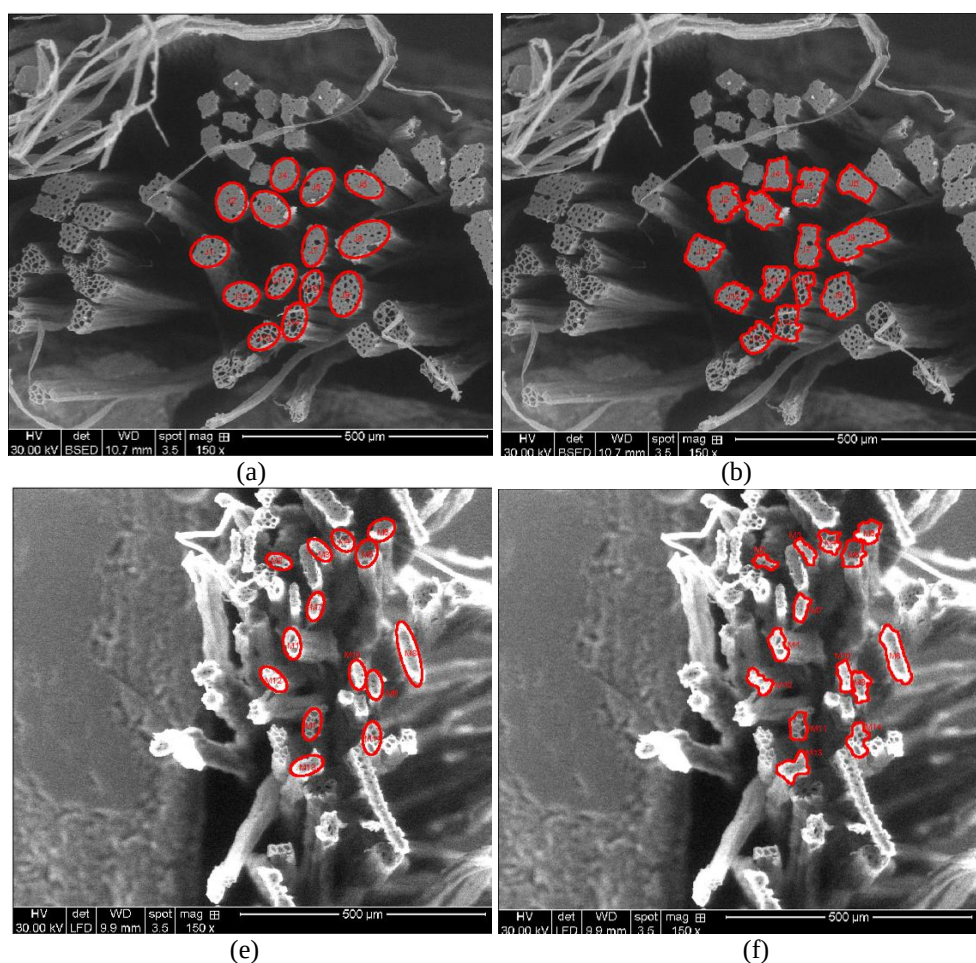


Figura 5.3 – Imagens obtidas por MEV: (a) Seções Elípticas das fibras de juta, (b) Seções elípticas das fibras de malva, (c) Seções reais das fibras de juta e (d) Seções reais das fibras de malva.

Tabela 5.2 - Valores das seções elípticas e reais das fibras de juta e malva.

Amostras de Juta	Seção Elíptica			Seção Real	Amostras de Malva	Seção Elíptica			Seção Real
	D (μm)	d (μm)	Área (mm^2)	Área (mm^2)		D (μm)	d (μm)	Área (mm^2)	Área (mm^2)
J1	79	62	0,00385	0,00364	M1	65	35	0,00179	0,00180
J2	79	62	0,00385	0,00362	M2	53	31	0,00129	0,00091
J3	87	63	0,00430	0,00388	M3	59	32	0,00148	0,00117
J4	70	55	0,00302	0,00290	M4	53	38	0,00158	0,00154
J5	87	55	0,00376	0,00379	M5	59	42	0,00195	0,00203
J6	82	50	0,00322	0,00334	M6	59	42	0,00195	0,00177
J7	86	47	0,00317	0,00349	M7	60	33	0,00156	0,00131
J8	110	65	0,00562	0,00596	M8	138	38	0,00412	0,00403
J9	95	61	0,00455	0,00462	M9	61	33	0,00158	0,00178
J10	75	41	0,00242	0,00208	M10	61	33	0,00158	0,00145
J11	79	47	0,00292	0,00267	M11	67	36	0,00189	0,00162
J12	73	55	0,00315	0,00296	M12	66	36	0,00187	0,00152
J13	70	47	0,00258	0,00271	M13	70	38	0,00209	0,00231
J14	79	47	0,00292	0,00313	M14	68	37	0,00198	0,00209
Média	82,21	54,07	0,00352	0,00348	Média	67,07	36,00	0,00191	0,00181

Ao comparar o resultado da área das seções elípticas das fibras de juta e de malva com as respectivas áreas reais, verificou-se que o erro era de apenas 1,12% e 5,45%, respectivamente. Porém, ao se adotar a seção circular, este erro passou para 409% e 178%, respectivamente. Sendo assim, a seção elíptica foi adotada para todos os cálculos de área. Semelhante ao procedimento adotado, Motta, et al (2010), determinaram a seção das fibras de sisal, através da correlação entre a área real e a área determinada por duas dimensões perpendiculares, aproximando-se assim, a uma seção elíptica.

De acordo com os resultados da Tabela 5.2, a relação entre a maior dimensão (D) e a menor dimensão (d) da seção elíptica foi determinada conforme as seguintes expressões: $d=0,35D$ para as fibras de juta e $d=0,45D$ para as fibras de malva. Com a utilização destas expressões e as medidas médias (D) obtidas pelo microscópio óptico, calculou-se as áreas das seções de cada amostra de fibra submetida ao ensaio de tração direta.

Através da Figura 5.4, é possível observar a microestrutura das fibras de juta, que mostra as fibrocélulas, o lúmen e a lamela média.

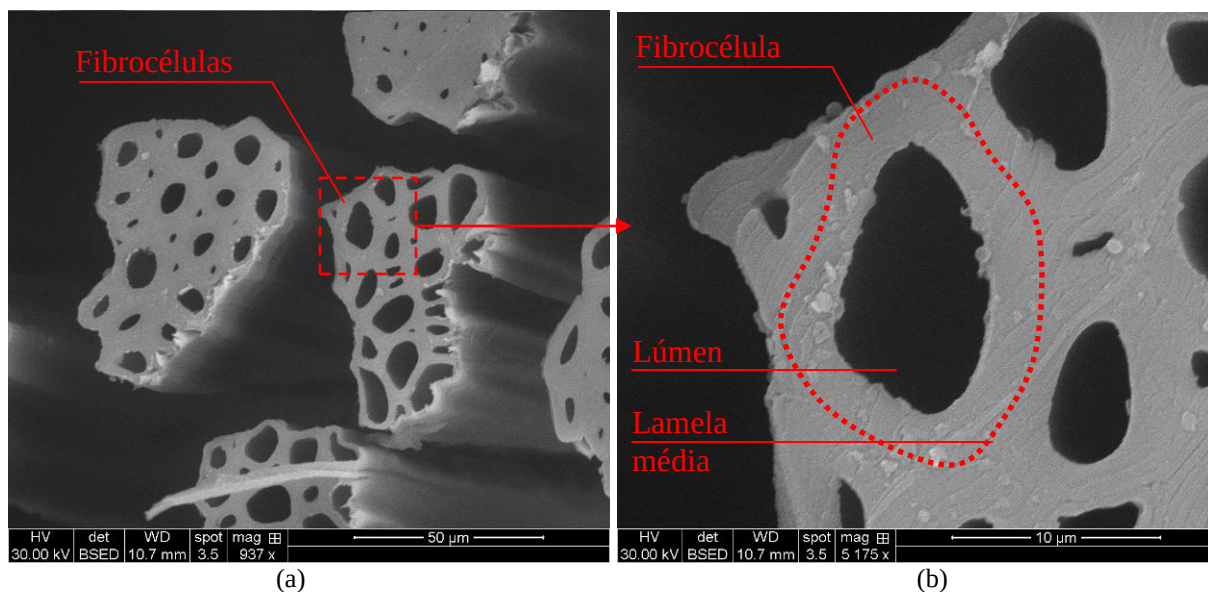


Figura 5.4 – Imagem no MEV da seção transversal das fibras de juta: (a) Fibrocélulas e (b) Ampliação de uma fibrocélula.

5.1.2 Resistência à tração direta

Na Figura 5.5 estão apresentados os gráficos tensão x deformação das fibras de juta e de malva e na Tabela 5.3 são apresentados os valores de resistência à tração, módulo de elasticidade e deformação de ruptura das fibras.

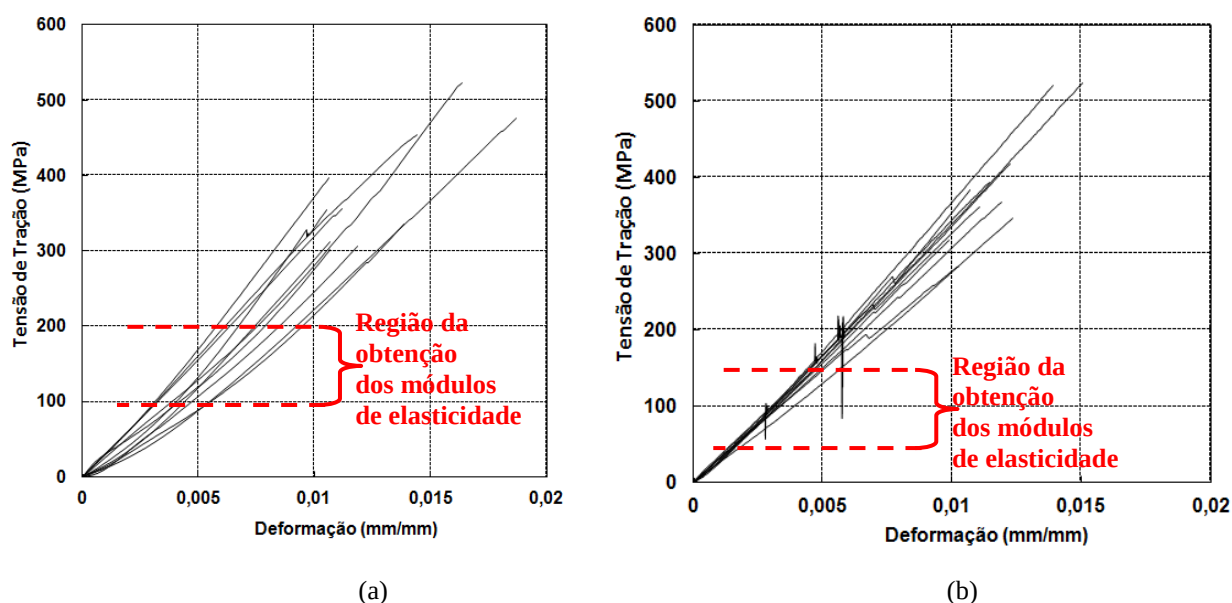


Figura 5.5 – Curva tensão x deformação das fibras: (a) juta e (b) malva.

Tabela 5.3 – Valores médios e coeficiente de variação do módulo de elasticidade, da tensão última de tração e da deformação de ruptura das fibras de juta e malva.

Fibras	Módulo de elasticidade			Tensão última			Deformação de Ruptura Equivalente	
	Equivalente							
	Intervalos	Média	CV	Intervalos	Média	CV	Média	CV
	(GPa)	(GPa)	(%)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(%)
Juta	19,40 – 37,83	29,70	20,37	341,68 – 522,33	405,33	14,76	1,40	19,25
Malva	24,97 – 32,94	30,93	7,82	284,13 – 523,01	391,47	19,98	1,19	13,58

Observando as curvas apresentadas, verifica-se que as curvas referentes às fibras de juta apresentaram maior deformação em relação às fibras de malva, além disso, as fibras de malva apresentaram comportamento mais linear, em termos de tensão x deformação, do que as fibras de juta. Este comportamento pode ser provavelmente decorrente da diferença do ângulo de alinhamento das microfibrilas. Conforme Timer *et al.* (2002); Zobel e Van Buijtenen (1989) esta diferença de inclinação influencia em várias propriedades, tais como sua instabilidade dimensional, rigidez, resistência mecânica e elasticidade.

Já a propriedade que apresentou maior diferença entre as fibras de juta e de malva foi a deformação a ruptura equivalente, onde a fibra de juta apresentou valor médio de 17,65 % superior a fibra de malva. Com relação à tensão última e ao módulo de elasticidade os resultados não apresentaram diferenças significativas, visto que os coeficientes de variação são altos.

Apesar da grande dispersão dos resultados da tensão última e o módulo de elasticidade, comum as fibras naturais, os resultados apresentados estão dentro daqueles encontrados na literatura técnica conforme já apresentados na Tabela 2.1.

Por outro lado, o módulo de elasticidade obtido para a fibra de malva possui valores com menor grau de dispersão, indicando resultados mais precisos, em relação ao valor médio, que foi de 30,93 GPa.

5.1.3 Massa específica

Os resultados da massa específica das fibras de juta e malva apresentaram um valor média de 0,852 g/cm³ e 0,913 g/cm³, respectivamente. Onde o coeficiente de variação para ambas as fibras foi aproximadamente de 5%. Portanto a fibra de juta apresentou uma densidade 6,7% menor do que a fibra de malva.

5.1.4 Análise termogravimétrica

Na Figura 5.6 são apresentadas as análises termogravimétricas (TG/DTG) das fibras de juta e de malva.

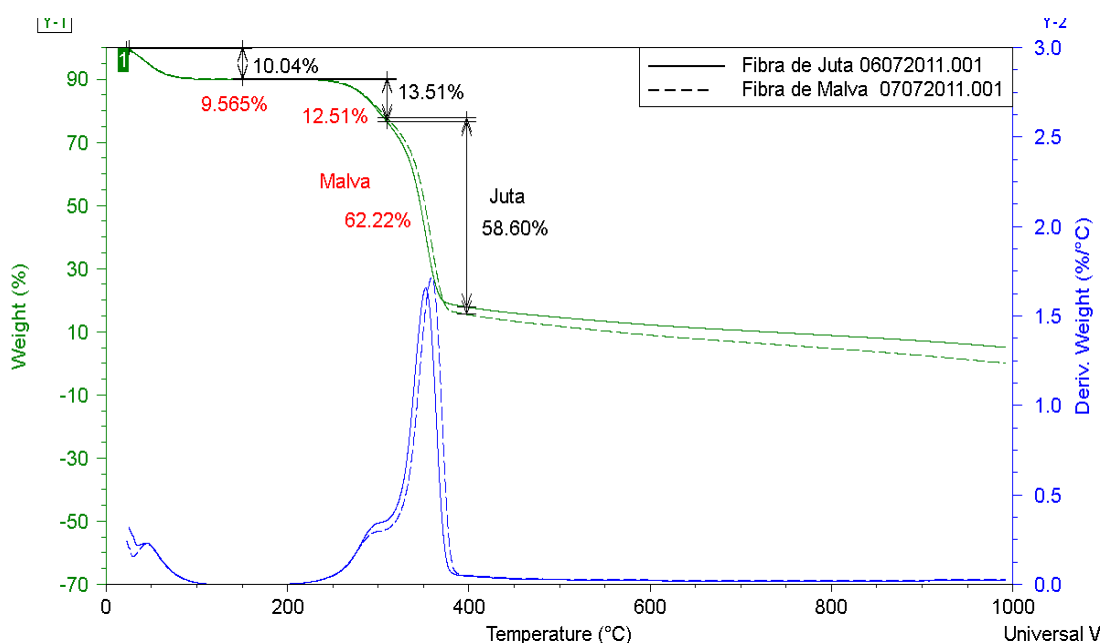


Figura 5.6 - Curva de TG e DTG das fibras de juta e malva em atmosferas de nitrogênio, com taxa de aquecimento de 10 °C/min.

Observa-se que as curvas de TG possuem três trechos de perda de massa. No primeiro trecho, compreendido entre 30°C e 100 °C ocorreu uma redução da massa, de cerca de 10% para ambas as fibras, devido à perda de umidade. Em seguida, houve um decréscimo acentuado entre as temperaturas de 230 °C e 350 °C, com perda de massa de 13,51% para a fibra de juta e 12,51% para a fibra de malva, atribuída à decomposição principalmente da hemicelulose. No terceiro trecho, entre as temperaturas de 350 °C e 400 °C houve reduções de

massa de 58,60% e 62,22%, para juta e malva, respectivamente, devido principalmente à decomposição da celulose. A pequena diferença de porcentagem de massa (cerca de 6%) referente à decomposição de celulose pode indicar que a fibra de malva apresente um maior teor de celulose em relação a fibra de juta.

Com relação à curva de DTG, foi possível, através de picos, verificar com mais precisão a temperatura máxima a qual ocorreu a perda de umidade (44,50 °C), a decomposição da hemicelulose (298 °C) e a decomposição da celulose, a qual apresentou temperaturas máximas diferentes para as fibras, 352 °C para a fibra de juta e 359 °C para a de malva. Além da maior quantidade de celulose nas fibras de malva, observado na curva de TG, verifica-se também, na curva de DTG, a maior estabilidade térmica da celulose dessa fibra.

5.1.5 Análise química

Na Tabela 5.4 são apresentados os valores médios dos constituintes químicos das fibras de juta e malva.

Tabela 5.4 – Valores médios dos constituintes químicos da fibra de juta e malva (%).

Constituintes	Espécies			
	Fibra de juta		Fibra de malva	
	Média (%)	CV (%)	Média (%)	CV (%)
Celulose	66,33	0,0018	69,36	0,0013
Hemicelulose	24,83	-	21,28	-
Lignina	10,49	0,0324	13,55	0,0649
Extrativos Totais	5,71	0,0332	7,55	0,0636

De acordo com Gridi-Papp I. L. *et al* (1985) e Peterson (1984), a celulose e a lignina são os principais constituintes que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas das fibras, desse modo, observando-se a Tabela 5.4, pode-se comentar que:

- Conforme resultados do ensaio de tração, onde se observa que a diferença em termos de tensão última entre as fibras de juta e de malva não é significativa (aproximadamente 4%), o que pode ser explicado pela diferença do teor de celulose também não ser significativa (4,36%), uma vez que este teor é o principal responsável pela resistência à tração da fibra, de acordo com Gridi-Papp I. L. *et al* (1985).

- Conforme pode ser observado no item 5.1.2, as curvas tensão x deformação referentes às fibras de malva apresentaram um comportamento mais linear em relação às fibras de juta, provavelmente influenciado pelo maior teor de lignina apresentado pelas fibras de malva em relação às fibras de juta, em torno de 22,58%, logo conferindo assim a fibra de malva maior rigidez e módulo de elasticidade. Uma vez que, o teor de lignina esta diretamente relacionada ao aumento de rigidez e do módulo de elasticidade, conforme observado por Peterson (1984).

5.2 Caracterizações dos compósitos

5.2.1 Comportamento mecânico sob cargas de tração direta

Para melhor análise das curvas tensão de tração x deformação dos compósitos, estas foram divididas em quatro regiões, identificadas por números romanos, conforme mostrado na Figura 5.7. A região I corresponde ao trecho com comportamento linear elástico. Nesta região pode ser observado o valor da tensão e deformação de primeira fissura que é dominado pela matriz. Em seguida ocorre a região II, caracterizada pela formação de múltiplas fissuras e gradual diminuição do módulo do compósito. A região III é caracterizada pela abertura progressiva das fissuras. Nessa região calculou-se a resistência à tração máxima do compósito. A partir deste ponto inicia-se a região IV caracterizada pelo decaimento rápido da curva tensão x deformação.

Curvas típicas tensão de tração direta x deformação para compósitos reforçados com fibras de juta (CJ) e de malva (CM), respectivamente, são mostradas na Figura 5.7.

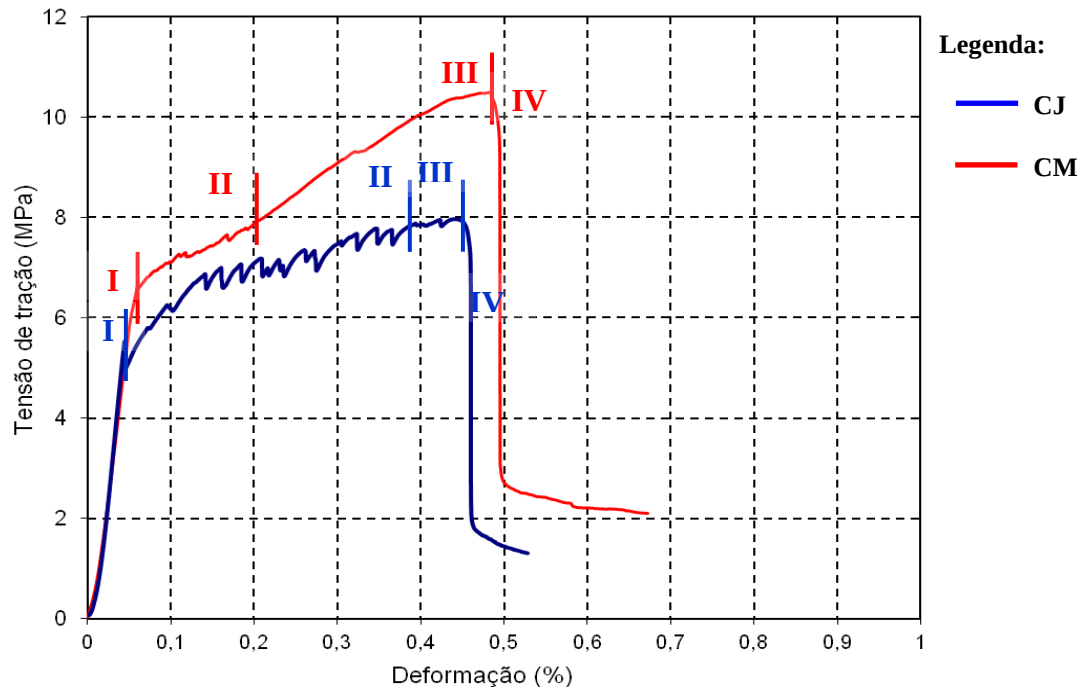


Figura 5.7 - Curvas típicas tensão de tração x deformação para ensaios de tração direta em compósitos.

Os resultados de tensão de primeira fissura (σ_{if}), deformação de primeira fissuração (ϵ_{if}), tensão última (σ_{uf}), deformação última fissuração (ϵ_{uf}) e respectivos coeficientes de variação (CV) para os ensaios de tração direta são mostrados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 - Resultados médios e coeficientes de variação das propriedades mecânicas de Tração obtidas das curvas tensão x deformação para os compósitos CJ e CM.

Regiões	I		III	
	σ_{if} (MPa)	ϵ_{if} (%)	σ_{uf} (MPa)	ϵ_{uf} (%)
Compósitos	CV (%)	CV (%)	CV (%)	CV (%)
CJ	5,42	0,045	7,96	0,392
	(6,38)	(6,47)	(2,45)	(8,63)
CM	6,60	0,060	10,34	0,482
	(0,11)	(2,00)	(2,09)	(8,32)

De uma forma geral, percebe-se que ambos compósitos apresentaram um comportamento dúctil com aumento da tensão após o surgimento da primeira fissura. Esta observação foi similar a aquelas encontradas na literatura para compósitos tanto na flexão quanto na tração direta (MELO FILHO, 2012; MARGARETH, 2010).

Comparando-se a região I dos dois compósitos, nota-se uma diferença significativa nos valores de tensão de primeira fissura e deformação de primeira fissura. Os compósitos produzidos com malva (CM) apresentaram acréscimos de 17,88% e 25,00% para as respectivas propriedades.

Como a matriz cimentícia produzida na presente pesquisa foi a mesma empregada tanto para o compósito CJ quanto para o compósito CM, pode-se pensar que as curvas tensão x deformação características para ambos os compósitos deveriam ser as mesmas, mas deve-se lembrar que ao se introduzir as fibras vegetais, de um modo geral, a matriz cimentícia, antes homogênea, adquire uma heterogeneidade devido a introdução de vazios provocados durante o processo de produção dos compósitos. Do exposto e dos resultados de tensão de primeira fissura e da deformação inicial pré-fissuração, presume-se que o compósito CJ seja mais heterogêneo, com mais vazios, do que o compósito CM, implicando em um desempenho inferior.

Na região II, os compósitos CJ e CM apresentam características bastante distintas, o compósito CJ demonstrou uma curva crescente com elevados picos e quedas, enquanto que no compósito CM, o gráfico apresenta uma curva crescente suave, com alguns picos localizados, demonstrando que para o segundo compósito houve uma melhor interação entre a matriz e o reforço fibroso. Esse comportamento pode ser justificado, provavelmente, pelo fato das fibras de malva terem a metade da espessura das fibras de juta, o que implicaria em uma maior área de contato e melhor transferência de tensões fibra-matriz .

Com relação a região III, o compósito CJ apresentou resistência última menor do que o compósito CM (23,02%), com uma diferença significativa na deformação última de fissuração (18,67%). Estes resultados confirmam o comportamento apresentado pelos compósitos na região II, ou seja, a matriz do compósito CM apresenta melhor distribuição de tensões do que a do compósito CJ.

Finalmente, na região IV, ambos os compósitos apresentaram uma queda brusca na tensão. Admiti-se que esta queda esteja relacionada a perda de aderência na interface fibra-matriz e ao rompimento das fibras, ocasionando o colapso do material.

Observando o modo de fratura após os ensaios de tração, conforme a Figura 5.8, verifica-se que o compósito CJ apresenta 21 fissuras espaçadas a cada $4,33 \pm 1,34$ mm, enquanto que o compósito CM apresenta 27 fissuras com espaçamento médio de $3,17 \pm 1,21$ mm.

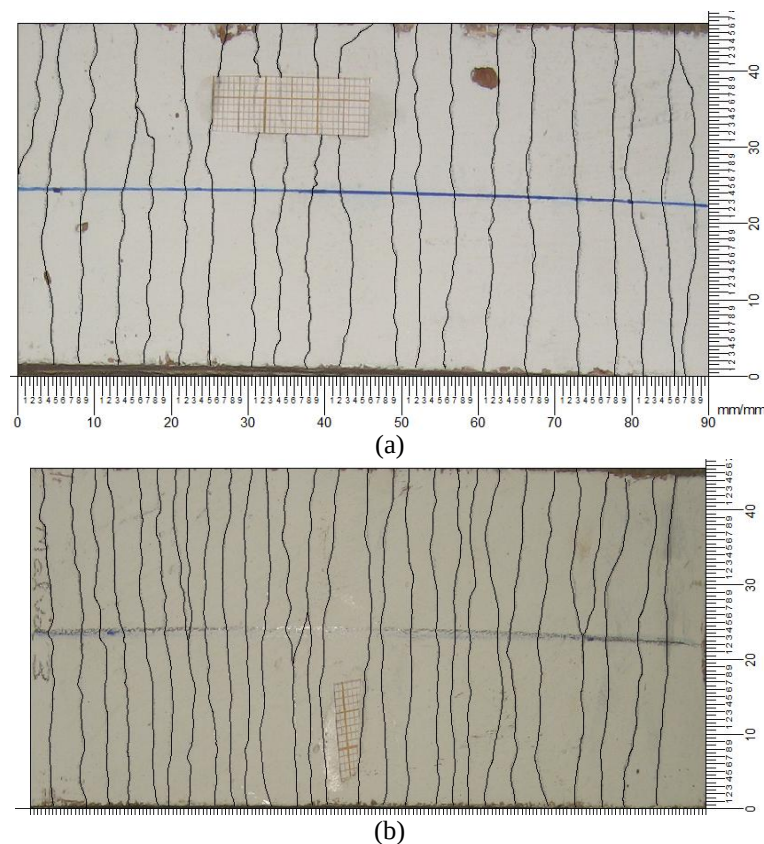


Figura 5.8 - Modo de fratura dos corpos de prova após ensaio de tração para os compósitos: (a) CJ e (b)CM.

Essas observações confirmam novamente que o compósito CM apresenta uma melhor distribuição de tensões fibra-matriz do que o compósito CJ, de acordo com o que foi analisado nas regiões II e III. Isto também pode ser explicado pela melhor distribuição dos filamentos de fibras de malva no interior da matriz em relação as fibras de juta.

5.2.2 Comportamento mecânico sob flexão

As curvas tensão x deflexão foram divididas em cinco regiões identificadas por números romanos como identificado na Figura 5.9, que mostra as curvas para os compósitos reforçado com fibras de juta (CJ) e malva (CM). A região I corresponde ao trecho onde o material apresenta um comportamento linear elástico. Nesta região obtém-se a tensão (σ_{1f}) e deflexão de primeira fissura (d_{1f}) e o módulo de elasticidade do compósito (E_c), que são dominados pela matriz. A região II inicia-se após o surgimento da primeira fissura sendo caracterizada pela formação de múltiplas fissuras com gradual redução do módulo de elasticidade do compósito. A região III é caracterizada pela abertura progressiva das fissuras, podendo ocorrer, em alguns casos, a formação de novas fissuras. A rigidez desta região, denominada rigidez aparente de endurecimento (E_{pf}), é dominada pelo reforço fibroso, visto que a matriz já se encontra multi-fissurada. A região IV, caracterizada pela máxima tensão pós-fissuração, inicia-se quando a curva tensão x deflexão apresenta um pronunciado desvio de linearidade e encerra-se quando a capacidade de suporte do compósito (σ_u) é atingida. A partir deste ponto inicia-se a região V, caracterizada pelo decaimento rápido da curva tensão x deflexão, com expressivo aumento das aberturas de fissuras até que uma delas abra predominantemente até o final do ensaio.

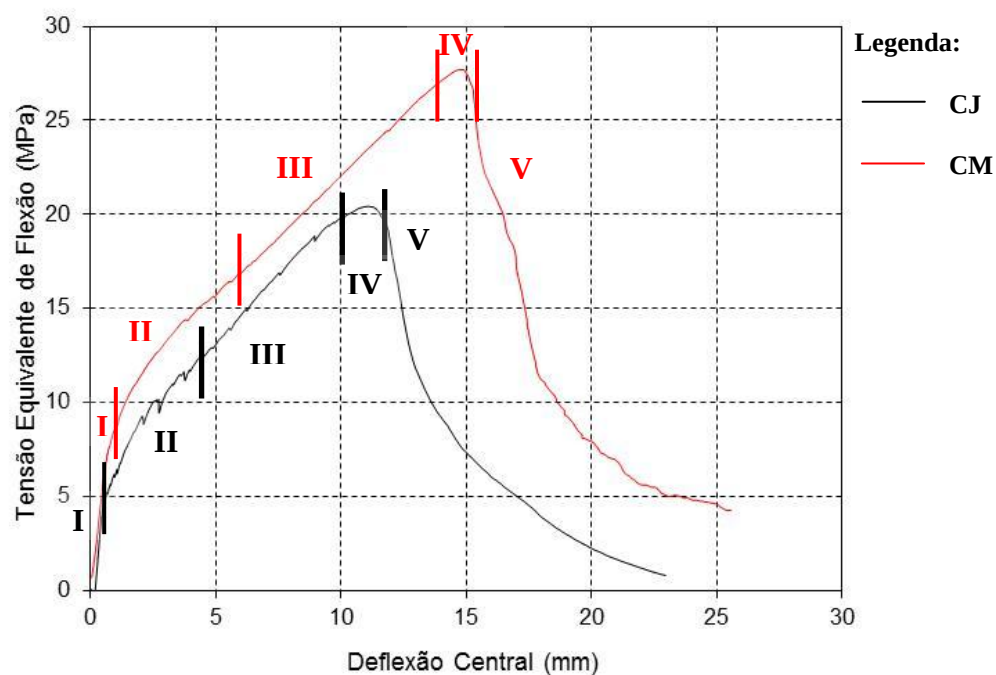


Figura 5.9 – Curvas típicas de tensão x deflexão para compósitos CJ e CM.

Os valores médios das propriedades obtidas em cada região estudada com seus respectivos coeficientes de variação estão apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Resultados médios e coeficientes de variação das propriedades mecânicas obtidas das curvas tensão x deflexão para os compósitos CJ e CM.

Compósitos	Regiões						
	I			III	IV		
	σ_{1f} (MPa) CV (%)	d_{1f} (mm) CV (%)	E_c (GPa) CV (%)	E_{pf} (GPa) CV (%)	σ_u (MPa) CV (%)	D_u (mm) CV (%)	$T_{\sigma u}$ (kJ/m ²) CV (%)
CJ	4,11 (10,86)	0,40 (11,46)	17,21 (10,68)	2,09 (4,35)	21,23 (5,19)	10,63 (7,77)	6,57 (7,99)
CM	7,96 (10,90)	0,75 (18,57)	17,98 (8,20)	2,21 (2,52)	27,27 (10,86)	15,05 (1,52)	10,20 (17,12)

Comparando-se a região I dos compósitos, verifica-se que o compósito CJ apresenta uma tensão de primeira fissura menor do que o compósito CM (cerca de 94%) e na deflexão de primeira fissura, os compósitos CM apresentaram valores maiores (88%). Esses resultados coincidem com o mesmo comportamento observado nos ensaio de tração direta, onde os

resultados inferiores encontrados no compósito CJ são decorrentes da menor dispersão dos filamentos da fibra de juta no interior no compósito em relação às fibras de malva, ocasionando uma melhor distribuição de tensões no segundo compósito. Para o módulo de elasticidade, observou-se que não houve diferenças significativas entre os valores médios dos dois compósitos (diferença menor que 5%).

A região II dos compósitos CJ e CM apresenta características bastante distintas, onde a curva do compósito CJ apresenta expressivos picos referentes à formação de fissuras, enquanto que no gráfico do compósito CM a curva apresenta um comportamento mais suave. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 5.10, onde este trecho foi ampliado.

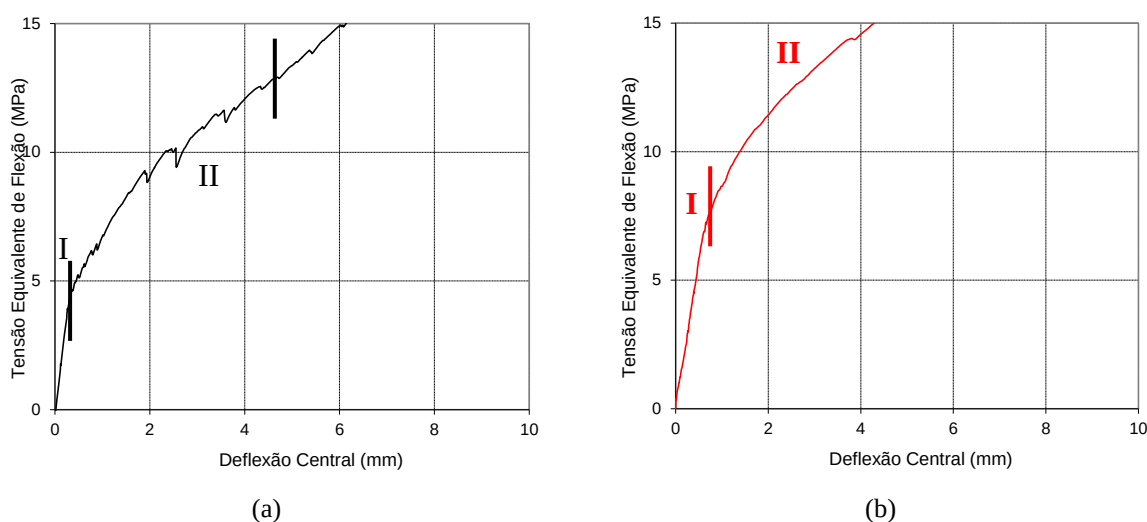


Figura 5.10 – Detalhe da região II para os compósitos: (a) CJ e (b) CM.

Na região III, também não houve diferenças significativas no valor médio da rigidez E_{pf} entre os compósitos CJ e CM (diferença menor que 6%).

Os compósitos CJ e CM apresentaram, com relação as regiões II e III, um comportamento semelhante ao apresentado no ensaio de tração.

Com relação aos valores de σ_u , D_u e T_{su} , obtidos na região IV, verifica-se que o compósito CJ apresentou valores inferiores ao CM, onde no caso da tensão última esta diferença foi de 28,45%. Já com relação aos valores de deflexão última e tenacidade os compósitos CM apresentaram valores superiores, com diferenças de 41,58% e 55,25%,

respectivamente, quando comparadas aos compósitos CJ. Ou seja, essas diferenças foram estatisticamente maiores apenas para os valores de T_{su} e D_u . O aumento de tenacidade já era esperado para o compósito CM, visto que a curva na região II e no desenvolvimento da região III, este apresentou maior numero de fissuras.

Para a região V, observa-se uma curva com uma inclinação menor do que aquela obtida para os compósitos no ensaio de tração direta (região IV), visto que no ensaio de tração na flexão parte da seção transversal está sob tração (abaixo da linha neutra) enquanto a outra parte está sob compressão (acima da linha neutra), portanto, ainda há contribuição da matriz cimentícia para a resistência do compósito. Porém, no ensaio de tração direta, toda a seção está sujeita a tensões de tração, desta forma, na região IV não ha qualquer contribuição da matriz, o que ocasiona um colapso abrupto.

O modo de fratura após os ensaios de flexão para os compósitos CJ e CM estão apresentados na Figura 5.11. Observa-se nos corpos de prova reforçados com fibras de malva a ocorrência de um maior número de ramificações de fissuras. O compósito CJ apresentou 13 fissuras com espaçamento de $9,21 \pm 3,06$ mm (Figura 5.11a), enquanto que o compósito CM apresentou 24 fissuras com espaçamento médio de $4,68 \pm 1,57$ mm (Figura 5.11b). Esse comportamento coincide com o que foi verificado nos ensaios de tração direta, onde os compósitos reforçados com as fibras de malva (CM) apresentaram menores espaçamentos entre fissuras.

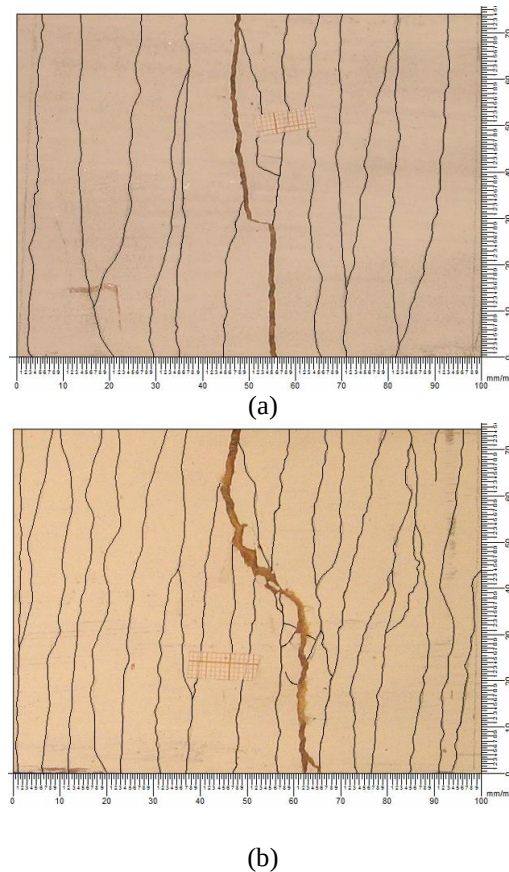


Figura 5.11 - Modo de fratura dos corpos de prova após ensaio de flexão para os compósitos: (a) CJ e (b)CM.

5.2.3 Microestrutura

A partir das micrografias ópticas, identificaram-se pontos em que não houve uma distribuição homogênea das fibras para ambos os compósitos, apresentando concentração de fibras em algumas regiões em detrimento a outras que não apresentam nenhuma fibra, mostrando que a despeito de todos os cuidados tomados durante o processo de produção dos compósitos, não foi possível eliminar completamente este tipo de defeito, o qual não influenciou nos bons resultados dos ensaios mecânicos obtidos pelos compósitos. A Figura 5.12 ilustra este defeito para os compósitos de juta e de malva, onde é possível observar regiões com uma menor concentração de fibras (Figura 5.12a) e outras com aglomerações de fibras impedindo um melhor envolvimento da fibra pela matriz cimentícia (Figura 5.12b).

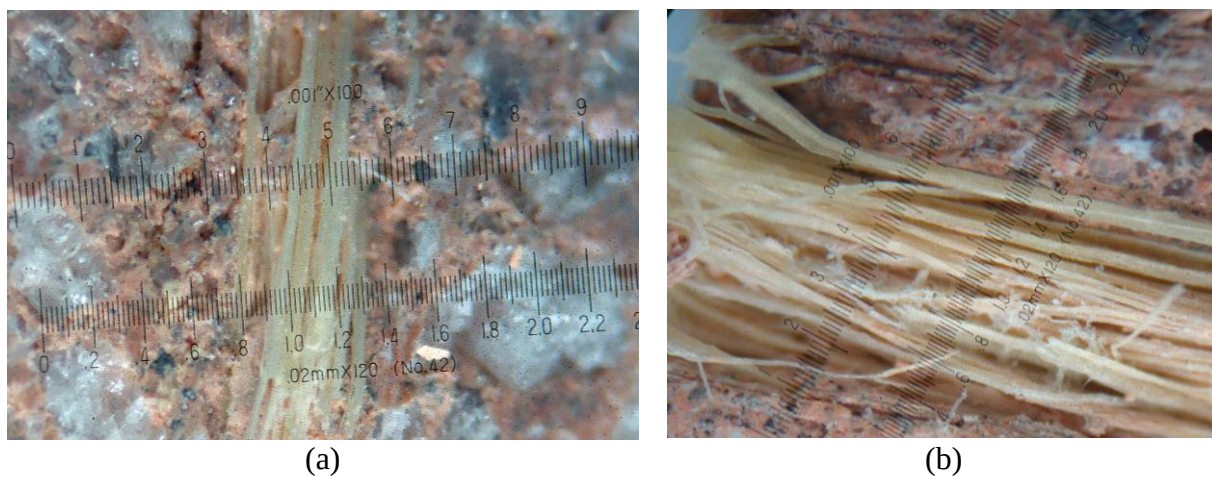


Figura 5.12 - Microscopia ótica de fibras no interior dos compósitos: (a)CJ e (b) CM.

Nas Figuras 5.13 e 5.14 são mostradas as micrografias obtidas por MEV, onde se observa a interface fibra-matriz dos compósitos CJ e CM.

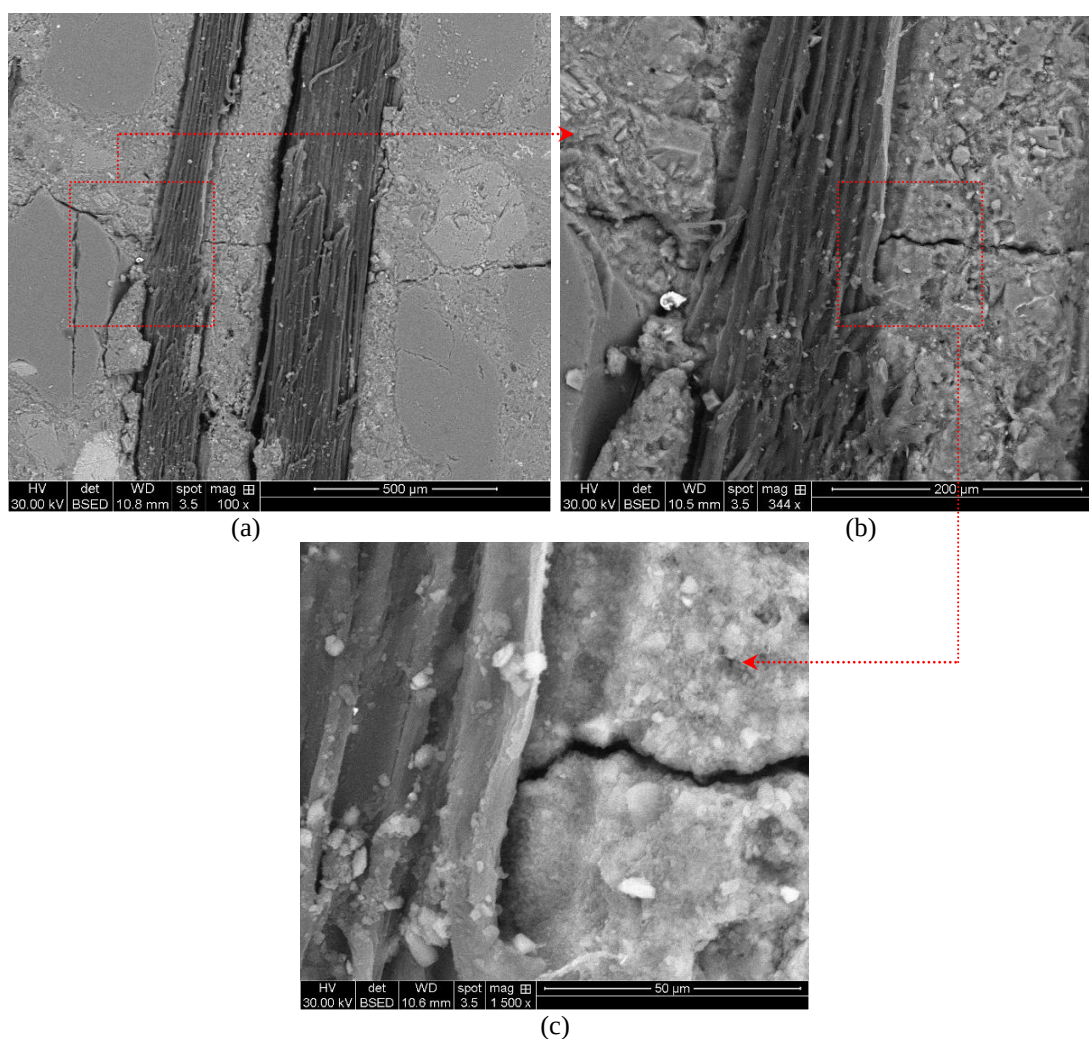


Figura 5.13 – Micrografia lateral de fibras de Juta:(a) Interface fibra-matriz, (b) ampliação da imagem anterior, (c) Pouca aderência e fratura da matriz.

Apartir da análise das figuras observou-se a existência de fissuras na matriz cimentícia, no sentido perpendicular ao alinhamento das fibras, as quais não se percebem a propagação destas em qualquer sentido da fibra. O que possibilita concluir que as fibras foram eficientes na função de distribuir melhor as tensões e não permitindo um crescimento mais acentuado da abertura das fissuras.

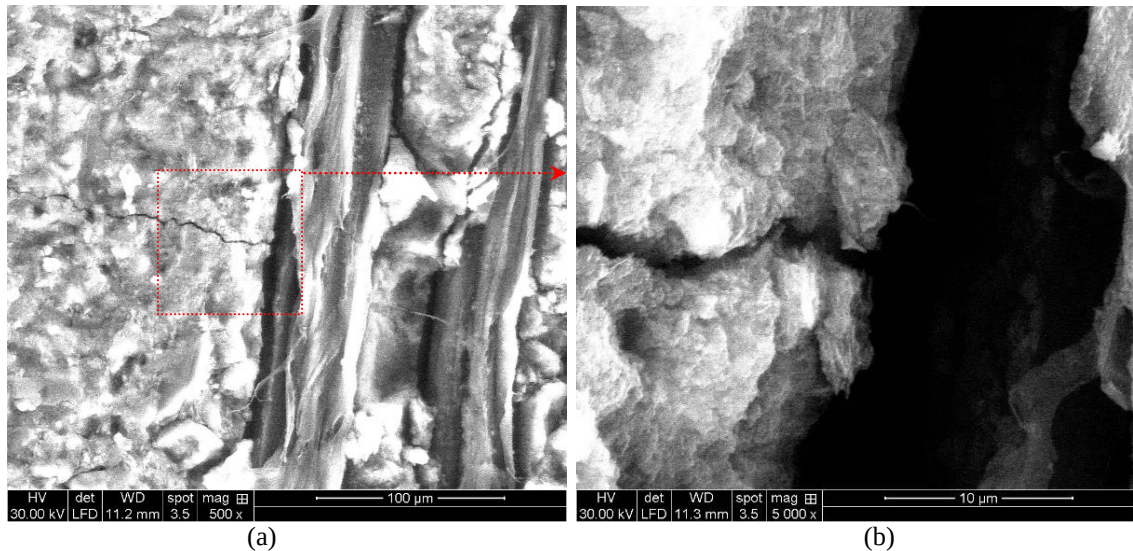


Figura 5.14 – Micrografia lateral de fibras de malva: (a) Interface fibra-matriz, (b) ampliação do trecho de fratura.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO

6.1 Propriedades físicas, químicas e mecânicas das fibras de juta e malva

(a) Propriedades físicas: verificou-se que a massa específica da fibra de juta foi 6,7% menor do que a fibra de malva. Na análise termogravimétrica, observou-se nas curvas TG que ambas as fibras apresentaram um teor de umidade, hemicelulose e de celulose em torno de 10%, 13% e de 60%, respectivamente. As fibras de malva apresentaram um valor de 6% superior ao valor encontrado para as fibras de juta, no teor de celulose, que veio a ser confirmado com os resultados dos ensaios de análise química.

(b) Propriedades químicas: a caracterização química das fibras de juta e malva, mostrou que as fibras de malva apresentam maiores teores de celulose (colocar aqui o aumento (diferença de 4%)) e de lignina (diferença de x%) em comparação as fibras de juta, onde o teor de hemicelulose foi maior que o apresentado pelas fibras da malva.

(c) Propriedades mecânicas: Ambas as fibras apresentaram uma seção transversal com geometria elíptica, onde foi possível determinar uma relação entre a maior dimensão (D) e a menor dimensão (d), de acordo com as seguintes expressões: $d=0,35D$ para a fibra de juta e $d=0,45D$.

As fibra de juta e malva apresentaram valores similares entre si para as propriedades de tensão e módulo de elasticidade, com valores médios da ordem de 400 Mpa e 30 Gpa, respectivamente. Já para os valores da deformação de ruptura equivalente, a fibra de juta apresentou um valor maior, (cerca de 17,65%) em relação a fibra de malva.

6.2 Produção dos compósitos reforçados com fibras de juta e de malva

Os compósitos foram produzidos em formato de placas com dimensões 400x250x150mm, com 5 camadas de fibras, com fração volumétrica de 8%, intercaladas com matriz cimentante. Apesar da pouca espessura da camada cimentante foi possível distribuir as fibras no momento da moldagem, através de costuras transversais feitas nos feixes, formando assim as camadas unidirecionais.

6.3 Comparação das propriedades mecânicas dos compósitos reforçados com fibras de juta e de malva

Na caracterização mecânica dos compósitos, verificou-se um comportamento bastante promissor tanto para os compósitos reforçados com fibra de juta como para os compósitos reforçados com fibras de malva.

(a) Comportamento na Tração Direta: verificou-se que os valores de tensão e de deformação de primeira fissuração e os de tensão última, para os compósitos reforçados com fibra de malva, apresentaram uma superioridade em relação aos compósitos reforçados com fibra de juta (17,88%, 25% e 23,02%, respectivamente) causando nos compósitos reforçados com fibra de malva o número de 27 fissuras com espaçamento médio de $3,17 \pm 1,21$ mm, enquanto que nos compósitos reforçados com fibra de juta, esse número foi de 21 fissuras com espaçamento médio de $4,33 \pm 1,34$ mm. Com isso verificou-se que os compósitos reforçados com fibra de malva desempenharam um comportamento mais homogêneo distribuindo melhor as tensões em relação aos compósitos reforçados com fibras de juta.

(b) Comportamento na flexão: os compósitos reforçados com fibras de malva apresentaram, respectivamente, uma tensão e deflexão de primeira fissuração superior ao segundo compósito, cerca de 94% e 88%. Já na tensão, deflexão e tenacidade última esta

superioridade foi de 28,45%, 41,58% e 55,25%, respectivamente, causando nos compósitos reforçados com fibra de malva o número de 24 fissuras com espaçamento médio de $4,68 \pm 1,57$ mm, enquanto que nos compósitos reforçados com fibra de juta, esse número foi de 13 fissuras com espaçamento médio de $9,21 \pm 3,06$ mm.

6.4 Comparação microestrutural da interface fibra-matriz dos compósitos reforçados com fibras de juta e de malva

Apesar de todos os cuidados tomados durante o processo de produção dos compósitos, os mesmos apresentaram em determinadas regiões uma maior concentração de fibras, mas apesar deste defeito, estas aglomerações de fibras não influenciaram significativamente nos bons resultados encontrados nos ensaios mecânicos dos compósitos. No caso dos compósitos reforçados com fibras de malva, os mesmos apresentaram menor concentração de fibras e maior número de fissuras perpendiculares às fibras em comparação ao segundo reforço fibroso. O que possibilita concluir que no compósito reforçado com fibras de malva houve uma melhor interação entre a matriz cimentante e a fibra distribuindo de forma mais adequada as tensões durante o desenvolvimento do ensaio de tração.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Segue abaixo algumas sugestões para pesquisas futuras:

- Avaliar outros teores de fibras (6% e 10%) com os mesmo procedimentos utilizados.
- Avaliar as diversas possibilidades na distribuição das fibras no interior da matriz: tecido ou malhas.
- Avaliar a prensagem e o comportamento mecânico destes compósitos moldados sob pressão de 0, 2, 3 e 4 MPa.
- Avaliar a durabilidade desses compósitos em condições de envelhecimento natural e envelhecimento acelerado.
- Avaliar a durabilidade e a resistência mecânica destes compósitos na utilização de tratamentos químicos nas fibras para que as mesmas possam ser protegidas contra os agentes nocivos das reações do cimento e impedir a absorção de água pelas mesmas.
- Desenvolvimento de um processo industrial que venha a produzir esse compósito laminado.
- Avaliar através de ensaios de fluência na tração ou flexão, os critérios de abertura máxima de fissuras quando esse material for submetido a ambientes agressivos.
- Avaliar a influência da idade da fibra de juta e de malva com relação a aplicação em compósitos cimentícios.

8. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14853: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro: ABNT, 3p. 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7989: pasta celulósica e madeira - Determinação de lignina insolúvel em ácido. Rio de Janeiro: ABNT, 6p. 2010.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13999: determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525°C. Rio de Janeiro: ABNT, 4p. 2003.

AGOPYAN, V.; SAVASTANO Jr., H. Uso de materiais alternativos à base e fibras vegetais na construção civil: experiência brasileira. In: Seminário Iberoamericano 1997 de materiais Fibrorreforçados, 1., y Reunión Proyecto PIP VIII.5 Cytel, 3., Cali, 1997. Memoriais. Cali, Universidad Del Valle, 1997. P.23-40 (Artículo 03).

AÏTCIN, P. C. Concreto de Alto Desempenho. Editora Pini, São Paulo, p. 669, 2000.

ARSÈNE, M. A.; BILBA, K.; OUENSANGA, A. Etude d'un Matériau Composite Ciment/Fibre de Bagasse de Canne à Sucre. Rev. Composites et Matériaux Avancés (RCMA), vol.1, n.1, French, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E DE CONFECÇÃO – ABIT. Disponível em: < <http://www.abit.org.br>>. Acesso em 05 maio 2012.

AZIZ, M. A., PARAMASIVAM, P., LEE, S. L. Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction. *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 3(2), 1981.

AZIZ, M. A., PARAMASIVAM, P., LEE, S. L. Concrete reinforced with natural fibres. In: Swamy, R. N. (ed.) *New reinforced concretes – Concrete technology and design*, vol. 2. London : Blackie & Son, 1984.

AZIZ, M.A., PARAMASIVAM, P., LEE, S.L. Natural fibre reinforced composite building materials for low-income. *Symposium on Building Materials for Low-Income Housing*, Bangkok, Thailand, pp. 129-137, jan 20-26 1987.

BALAGURU, P. N., SHAH, S.P., 1992, *Fibre-Reinforced Cement Composites*, McGraw-Hill AMERICAN CONCRETE INSTITUTE Committee 544, 1989, “Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concret”, (ACI 544.2R-89), American Concrete Institute, Detroit, 11p.

BENTUR, A. & MINDESS, S. “Fibre Reinforced Cementitious Composites”. In: *Applied Science*. London and New York, Elsevier, 2ª edição, 1990.

BERNARDES, M. Tecnologia construtiva de piso elevado para áreas externas de edifícios. 2009. 221p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

BEVILAQUA, R. Estudo comparativo do desempenho estrutural de prédios estruturados em perfis formados a frio segundo os sistemas aporticado e “Ligat Steel Framing”. 2005. 247p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

BILBA, K. ARSÈNE, M. A. OUENSANGA, A. Sugar Cane Bagasse Fibre Reinforced Cement Composites. Part I. Influence of the Botanical Components of Bagasse on the Setting of Bagasse/Cement Composite. Cement and Concrete Composites, v.25, p. 91-96, 2003.

BLEDZKI, A. K., GASSAN, J. “Composites reinforced with cellulose based fibres”. Progress in polymer science, V. 24, pp 221-274, 1999.

BROWNING, B.L. The chemistry of wood. Interscience Publisher. 1963.

CALLISTER, W.D.JR. Materials Science and Engineering: na introduction. 4 ed. New York: John Wiley & Sons, 1997. 852 p.

CALLISTER, W.D.Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 5ª. Edição. LTC Editora. Rio de Janeiro, 2000;

CAMPBELL, M.D., COUTTS, R.S.P. Wood fibre-reinforced cement composites. Journal of Materials Science, 15, pp. 1962-1970, 1980.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. Disponível em: < [http:// www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)>. Acesso em 05 maio 2012.

COOPERATIVA MISTA AGROPECUÁRIA DE MANACAPURU – COOMAPEM . Disponível em: < <http://www.coomapem.coop.br>>. Acesso em 06 maio 2012.

COUTTS R. A review of Australian research into natural fibre cement composites. Cem Concr Compos 2005;27:518–26.

EICHHORN S.J., et al. – Materials Sci. 2001; 36:2107-2131.

FERREIRA, S. R. Influência do tratamento de molhagem e secagem na aderência fibra-matriz e no comportamento mecânico de compósitos cimentícios reforçados randomicamente com fibras de sisal. 2012. 158p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro- COPPE, Rio de Janeiro.

FIBER ORGANON – FO. Disponível em: < <http://www.citeve.pt>>. Acesso em 05 maio 2012.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. Disponível em: < <http://www.fao.org>>. Acesso em 05 maio 2012.

GUIMARÃES, S. S., Fibra vegetal-cimento - Resultados de algumas experiências realizadas no THABA/CEPED. In: Anais do I simpósio internacional sobre produção e transferência de tecnologia em habitação: da pesquisa à prática. HABITEC 87. São Paulo, 6-10, abr. p.103, 1987.

GRIDI-PAPP I. L.; KONDO J. I., SABINO N. P.; FUZATTO M. G. Resistência intrínseca da fibra de algodão determinada através de correção do índice Pressley. Scielo Brazil: Bragantia, Campinas, nº 44: 587-598, 1985.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: [http:// www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br) . Acesso em 05 maio 2012.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras vegetais. In: Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras para Construção Civil. Anais. SãoPaulo, EP-USP, 1993, p. 29-38.

JONH M. J., THOMAS S., Carbohydrate Polymers 2007, doi: 10.1019/j.carbopol.2007.05.040.

KENNEDY, F.; PHILLIPS, G. O.; WILLIAMS, E. P. A. Wood and cellulose: industrial utilization, biotechnology, structure and properties, ellis horwood. Chichester: E. Horwood, 1987. 1130 p.

LIMA, P. R. L. Análise teórica e experimentos reforçados com fibras de sisal. 2004. 263p. Tese (Doutorado em ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE, Rio de Janeiro.

LUZ, A. B., CAMPOS, A.R., CARVALHO, E.A. e BERTOLINO, L.C., Caulim. In Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações. Ed. Luz, A. B. e LINS, F.A.F. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, pp.231-262, 2005.

MARQUES, M.G.S. Caracterização das Propriedades da Fibra Vegetal de Arumã para Aplicação como Reforço à Matriz Cimentícia. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2009.

MARTINS NETO, S. F. Material compósito de matriz frágil reforçado com fibras naturais de sisal e malva: caracterização e correlações das propriedades mecânicas. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Materiais e Processos de Fabricação) - Universidade Federal do Pará – UFPA.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MELO FILHO, J. de A. Desenvolvimento e Caracterização de Laminados cimentícios reforçados com Fibras Longas de Sisal. 2005. 114p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro- COPPE, Rio de Janeiro.

MELO FILHO, J.A., SILVA, F.A., TOLEDO FILHO, R.D., FAIRBAIRN, E.M.R., 2007, “Effect of Reinforcement Ratio and Molding Pressure on the Mechanical Performance of Short Sisal FRC”, *In: 4th International Conference on Science and Technology of Composite Materials*, Rio de Janeiro – RJ.

MELO FILHO, J. de A. Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal. 2012. 207p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro- COPPE, Rio de Janeiro.

MENDES, R. Asbesto (amianto) e doença: revisão do conhecimento científico e fundamentação para uma urgente mudança da atual política brasileira sobre a questão. Scielo Brazil: Cad. Saúde Pública vol.17 n°.1:1-18, Rio de Janeiro, Jan./Feb. 2001.

MENDES, R. Amianto e Política de Saúde Pública no Brasil. Cadernos de Saúde Pública, 23(7):1-2, jul., Editorial, 2007.

MOHANTY, A. K., MISRA, M., DRZAL, L. T., “Natural fibers, biopolymers, and biocomposites”. Taylor & Francis Group, 1 edição, pp.896, 2005.

MOHR, B.J., Durability of Pulp Fiber Cement Composites, Ph.D. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2005.

L.A.C. MOTTA, V.M. JONH, V. AGOPYAN. Thermo-chemical treatment to Improve properties of sisal fibres for composites. Materials Science Forum Vols. 636-637, pag. 253-259, 2010.

OKSMAN K., MATHEW A. P., LÅNGSTRÖM R., NYSTRÖM B., JOSEPH K. The influence of fibre microstructure on fibre breakage and mechanical properties of natural fibre reinforced polypropylene. Composites Science and Technology, nº 69, pag. 1847 – 1853, 2009.

OLIVEIRA, P. L. Projeto Estrutural de Pavimentos rodoviários e de pisos industriais de concreto. 2000. 246p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos.

PENHA, J.K.M; DAMASCENO, M.A.; FELIPE, R.N.B.; FELIPE, R.C.T.S. Análise comparativa entre as propriedades mecânicas de compósitos poliméricos reforçados por juta/vidro/juta e juta/juta. In: 17 CEBCImat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 15-19 nov 2006.

PETTERSEN, R.C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R.(ed). The chemistry of solid wood. Washington, American Chemical Society, 1984. p.54-126.

PIRIE B.J., GLASSER F.P., SCHMITT-HENCO C., AKERS S.A.S. Durability studies and characterization of the matrix and fibre-cement interface of asbestos-free fibre-cement products. Cement and Concrete Composites, v.12, 1990, p. 233-244.

RAMASWAMY, H. S., AHUJA, B. M., KRISHNAMOORTHY, S. Behaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibres. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 5, pp. 3-13, 1983.

ROMA JR, L.C., MARTELLO, L.S., SAVASTANO JR., H., 2008, “Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers”, Construction and Building Materials, v. 22, pp. 668–674.

SALES, A.T.C.. Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu. 2006. 273p – Tese (Doutorado na area de Concentração: Estruturas) – Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC). Rio de Janeiro

SARIGAPHUTI, M., SHAH, S.P., VINSON, K.D., 1993, “Shrinkage cracking and durability characteristics of cellulose fiber reinforced concrete”, ACI Materials Journal, v.90, n. 4, ,pp. 309-318.

SATYANARAYANA K.G., GUIMARÃES J. L., WYPYCH W., Comp. Part A: Appl. Sci. Manufac.2007;38(7): 1694-1709.

SAVASTANO Jr. H., AGOPYAN, V. Fibras naturais para produção de componentes construtivos. Curso Internacional Materiales Compuestos Fibrorreforzados, Universidad Del Valle/Cyted Proyecto, Cali, Colombia, 1998.

SAVASTANO Jr. H. Sistema de cobertura para construção de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais. 2000. 144p. Tese (Livre-docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SAVASTANO Jr., H., JOHN, V. M., AGOPYAN, V., GATTO, E. G. Developing waste cellulose fiber reinforced composites with clinker free cement. Proceedings of International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies NOCMAT-3, Hanoi, 12-14 march 2002.

SILVA, A. C., Estudo da durabilidade de compósitos reforçados com fibras de celulose. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Construção Civil/EPUSP. – São Paulo, 2002.

SOROUSHIAN, P., MARIKUNTE, S., 1992, “Long-term durability and moisture sensitivity of cellulose fiber reinforced cement composites”, In: Swamy (Ed.) Fibre Reinforced Cement and Concrete, pp. 1166-1184, E & FN Spon, London.

STUDINKAT, J. B. Asbestos substitution in the fibre cement industry. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 11(2), 1989.

SWAMY, R. N., STRAVIDES, H. Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage and cracking. ACI Journal, Title n. 76-21, mar, 1979.

SWIFT, D. G., SMITH, R. B. L. The flexural strength of cement-based composites using low modulus (sisal) fibres. Composites, july, pp.145-149, 1979.

TOLÊDO FILHO, R. D. Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental. Tese de doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.

TOLÊDO FILHO, R. D., et.al. Physical and mechanical properties of durable sisal fiber–cement composites - Construction and Building Materials, Volume 24, Issue 5, Maio 2010. Disponível em: < www.elsevier.com/locate/conbuildmat>. Acesso em: 15 janeiro 2012.

TOLEDO FILHO, R.D., SILVA, F.A., FAIRBAIRN, E.M.R., MELO FILHO, J.A., 2009, “Durability of Compression Molded Sisal Fiber Reinforced Mortar” Construction & Building Materials, no prelo.

TONOLI, G. H. D. Aspectos produtivos e análise do desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologia para telhas onduladas. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo, Depart. de Zootecnia, Pirassununga, 129f, 2006.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. Cementitious building materials reinforced with vegetable fibres: Areview. Construction and Building Materials, www.Elsevier.com/locate/conbuildmat , Agosto e 2010.

WIMMER, R.; DOWNESS, G. M.; EVANS, R. Temporal variation of microfibril angle in Eucalyptus nitens grown in different irrigation regimes. Tree Physiology, Victoria, v. 22, n. 7, p. 449-457, May 2002.

YOUNG, R.A, Fibers (Vegetable). Kirk – Othmer encyclopedia of chemical Technology 4^o. Ed. Volume 10. J. Wiley & Sons, Inc. pp 727 – 744, 1994.

ZHU, W. H. Utilisation of banana fibre in composite materials. Dissertation (Master Thesis). Victoria University of technology, Melbourne, 1993.

ZOBEL, J. B.; BUJTENEN, J. P. Wood variation: its causes and control. New York: Springer-Verlag, pag 363, 1989.

APÊNDICE

APÊNDICE 1. Processo de Beneficiamento das fibras de juta e malva.

Neste anexo são apresentadas as etapas do processo interno de uma industrial de beneficiamento de fibra localizada em Manacapuru, a COOPERFIBRAS. Que conforme o gerente de produção da empresa, os produtos finais são constituídos nas proporções de fibra de juta e malva em torno de 30% e 70%, respectivamente.



Figura A.1 – Processo industrial inicial de Beneficiamento das fibras de juta e malva: (a) Fardo, (b) Fibras de juta, (c) Codicionamento das fibras para desfiamento, (d) Limpeza das fibras através do processo de vibração, (e) Início do Processo de desfiamento, (f) Finalização do Processo de desfiamento.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura A.2 – Continuação do processo industrial das fibras de juta e malva: (a) fibras após processo de desfilamento, (b) matéria-prima na utilização como reforço em forro de gesso, (c) Produção dos cordões, (d) Condicionamento dos cordões em carriteis menores, (e) Concionamnto dos carriteis menores em maiores, (f) Produção dos sacos, (g) Costrura dos fundos e laterais dos sacos com os cordões e (h) Produto final.

APÊNDICE 2. Curvas dos ensaios realizados neste trabalho.

As setas mostram as curvas que foram retiradas para o cálculo. Os gráficos para determinação da resistência a tração das fibras não serão apresentados neste item devido o mesmo já ter sido apresentado no corpo principal do trabalho.

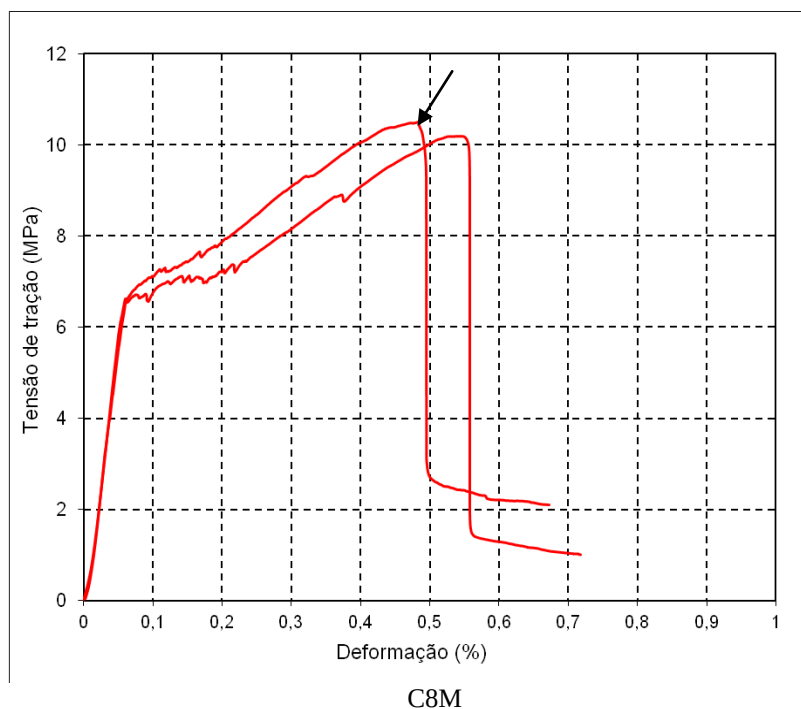
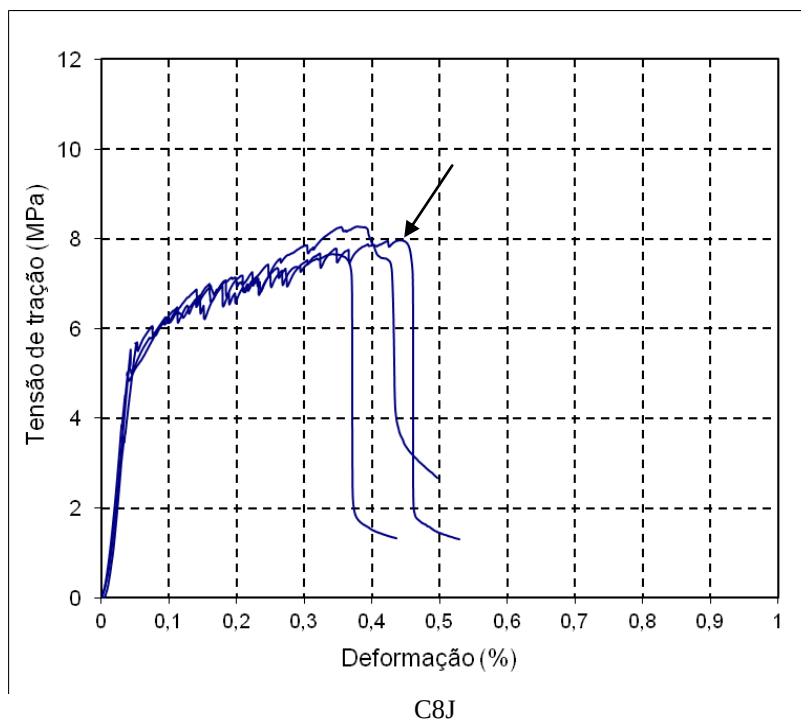


Figura A.3- Curvas dos ensaios de tração dos compósitos: (a) C8J e (b)C8M

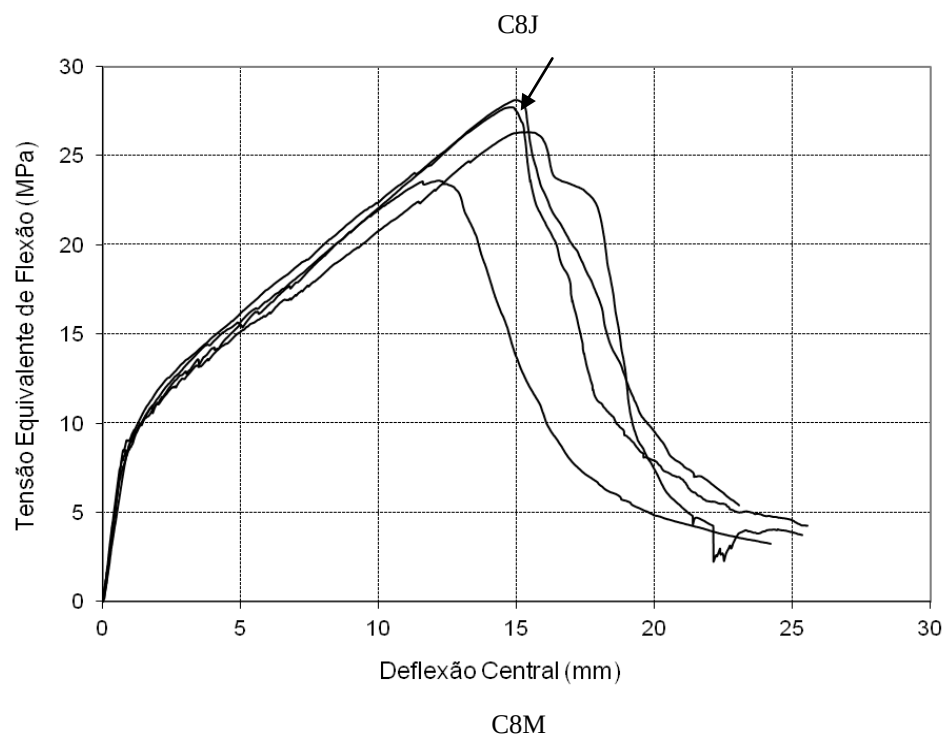
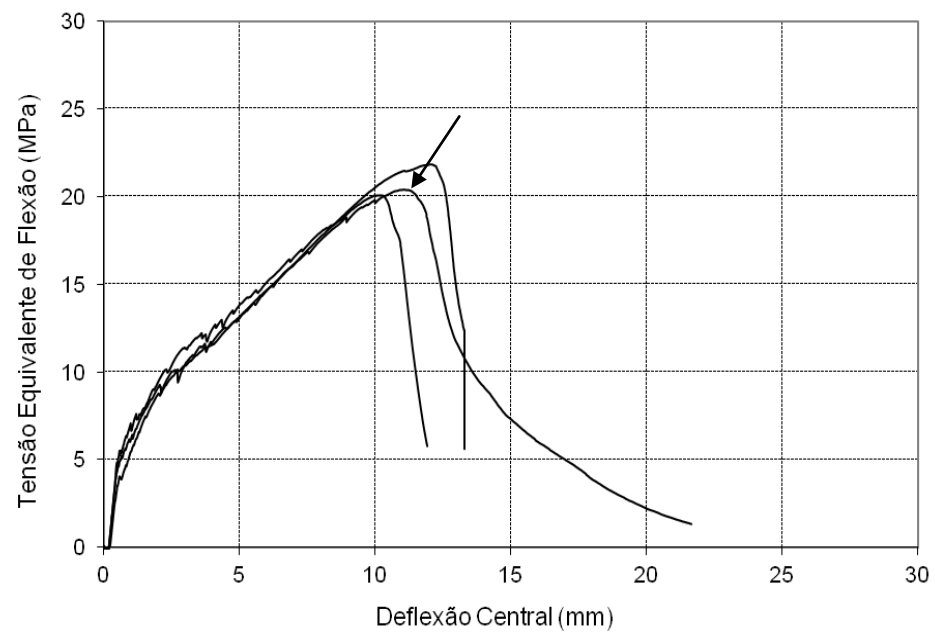


Figura A. 1- Curvas dos ensaios de flexão em 4 pontos dos compósitos: (a) C8J e (b)C8M