

stricto
SENSU

PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

FACULDADES DE ENGENHARIA, QUÍMICA E FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE
MATERIAIS

UBIRAJARA MARQUES LIMA JÚNIOR

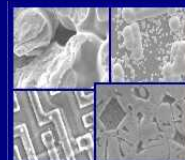
FIBRAS DA SEMENTE DO AÇAIZEIRO (EUTERPE
OLERACEA MART.): AVALIAÇÃO QUANTO AO USO
COMO REFORÇO DE COMPÓSITOS
FIBROCIMENTÍCIOS

Porto Alegre
2007



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

**FIBRAS DA SEMENTE DO AÇAIZEIRO (EUTERPE OLERACEA
MART.): AVALIAÇÃO QUANTO AO USO COMO REFORÇO DE
COMPÓSITOS FIBROCIMENTÍCIOS**

UBIRAJARA MARQUES LIMA JÚNIOR
ENGENHEIRO CIVIL

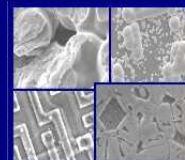
**DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM
ENGENHARIA E TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

PORTO ALEGRE, MARÇO DE 2007



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E
TECNOLOGIA DE MATERIAIS**

Faculdade de Engenharia
Faculdade de Física
Faculdade de Química



PGETEMA

FIBRAS DA SEMENTE DO AÇAIZEIRO (EUTERPE OLERACEA MART.): AVALIAÇÃO QUANTO AO USO COMO REFORÇO DE COMPÓSITOS FIBROCIMENTÍCIOS

UBIRAJARA MARQUES LIMA JÚNIOR
ENGENHEIRO CIVIL

ORIENTADOR: ELEANI MARIA DA COSTA, PROF^a.DR^a.
CO-ORIENTADOR: SANDRO CAMPOS AMICO, PROF.DR.

Trabalho realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia dos Materiais - PGETEMA, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Tecnologia de Materiais.

PORTO ALEGRE, MARÇO DE 2007.

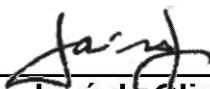
**FIBRAS DA SEMENTE DO AÇAIZEIRO (EUTERPE OLERACEA MART.):
AVALIAÇÃO QUANTO AO USO COMO REFORÇO DE COMPÓSITOS
FIBROCIMENTÍCIOS**

**UBIRAJARA MARQUES LIMA JÚNIOR
ENGENHEIRO CIVIL**

BANCA EXAMINADORA



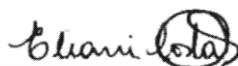
Prof.ª. Dr.ª. Andréa Moura Bernardes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais - PPGEM
Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS



Prof. Dr. Jairo José de Oliveira Andrade
Faculdade de Engenharia- Curso de Engenharia Civil
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul-PUCRS



Prof. Dr. Sandro Campos Amico (Co-orientador)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de
Materiais-PPGEM
Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS



Prof.ª. Dr.ª. Eleani Maria da Costa (orientador)
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais-
PGETEMA
Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul-PUCRS

Aos meus pais, Ubirajara e Norma, que merecem o meu respeito e a quem devo toda
minha educação e apoio na vida acadêmica.

À minha esposa Tatiana, pelo amor, incentivo, apoio e compreensão.

Aos meus filhos, Carolinne e Carlos Eduardo, eternas fontes de inspiração alegria e
amor incondicional.

AGRADECIMENTOS

- À Prof.^a Dr.^a Eleani Maria da Costa, pela sua adjetiva orientação, incentivo e oportunidades de aprendizado.
- Ao Prof. Dr. Sandro Campos Amico, pela sua precisa co-orientação, estímulo e sabedoria.
- Aos Professores Ms. Fernando Recena e Ms. Luis Ernani, pela contribuição técnica e oportunidades de aprendizado.
- Aos professores Ms. Clementino dos Santos Filho e Ms. José Zacarias da Silva Júnior pela receptividade e colaboração na infra-estrutura para a realização dos ensaios realizados em Belém.
- A todos os professores, colegas e funcionários do PGETEMA, pelo ótimo convívio e contribuições durante o curso.
- Aos técnicos da Faculdade de Engenharia da PUCRS Eduardo Reinhardt da Cruz, Eduardo Perosa e da UNAMA Ailton dos Anjos pela ajuda e contribuição nos experimentos.
- À minha família na ajuda do beneficiamento primário das fibras a partir das sementes de açaí.

“Felix qui potuit rerum cognoscere causas”

Virgílio
[Geórgica, Livro II, linha 490]

RESUMO

O presente trabalho investiga pela primeira vez a possibilidade de utilização de fibras vegetais oriundas do subproduto da extração da polpa de açaí, fruto da estirpe *Euterpe oleracea*, como material alternativo para o setor de construção civil. O estudo envolveu aspectos relacionados à determinação de propriedades da fibra tais como morfologia e propriedades físico-químicas, à produção de corpos-de-prova com diferentes teores de fibra, além de ensaios físicos (massa específica, porosidade aparente e absorção de água) e mecânicos (ensaios de compressão axial, de tração na flexão e de tração por compressão diametral) para avaliação de desempenho do material final, bem como a proporção mais adequada de fibra em relação ao cimento Portland dentre os traços ensaiados. Os compósitos cimentícios reforçados com fibras de açaí não apresentaram perda significativa de resistência à compressão. Além disso, as fibras incrementaram de forma satisfatória a resistência à tração (aproximadamente 13% em média) de fibrocimentos produzidos com este reforço. O reforço proposto apresentou um bom desempenho de adesão com a matriz e conseqüente comportamento pós-fissura inerente aos fibrocimentos, reforçando a região adjacente à fratura. Compósitos reforçados com fibra de açaí *in natura* apresentaram boas propriedades mecânicas. Portanto, as fibras de açaí, material disponibilizado a custo zero, são passíveis de aplicação como reforço de matrizes cimentícias, proporcionando um bom desempenho mecânico e reduzindo o custo do produto final, devido ao valor das fibras incorrer somente no seu beneficiamento, que pode ser manual e inserido em contexto social.

ABSTRACT

The present work investigates for the first time the possibility of using vegetable fibers originated from the *açaí* pulp extraction, fruit of *Euterpe oleracea*, as an alternative material for the construction sector. This study comprised studies related to the determination of fiber properties such as morphology and physicochemical properties, to composites manufacturing by different fiber rates in Portland cement matrixes, besides the evaluation of properties of the final material, such as physical properties (specific gravity, apparent porosity and water absorption) and mechanical tests (compressive, flexural and split strength tests) evaluating the better fiber rate in the specimens produced. The cement based composite reinforced with *açaí* fiber did not present a significant decrease on compressive strength. Besides, these fibers increased the tensile strength (approximately 13% in average) the fibrocement materials produced with this reinforcement. The proposed reinforcement presented a good performance regarding adhesion to the matrix and consequently post-crack behavior inherent to fibrocement, strengthening the region near the fracture. Composite materials reinforced with non-treated *açaí* fiber presents good mechanical properties. In all, the *açaí* fibers, which may be obtained at near zero cost, showed the potential to be used in cement matrixes as a reinforcement providing an adequate mechanical performance and reducing the cost of the final product. Besides, the use of these fibers may be beneficial to families responsible for their extraction and preliminary treatment, and therefore social and economical aspects are also involved if new applications are found for the *açaí* fibers.

SUMÁRIO

I – INTRODUÇÃO	14
II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 - Aspectos Gerais Sobre os Materiais Compósitos.....	17
2.1.1 - Definição.....	17
2.1.2 - O Sistema Compósito e suas Propriedades.....	18
2.1.3 - Classificação e Principais Tipos.de Materiais Compósitos	23
2.1.3.1- Materiais Compósitos Fibrosos.....	26
2.1.3.2 - Compósitos com Fibras Descontínuas.....	28
2.1.3.3 - Compósitos com Fibras Descontínuas e Alinhadas.....	30
2.2.3.4 - Compósitos com Fibras Descontínuas e Aleatoriamente Orientadas	31
2.2 - Os Materiais Compósitos com Fibras Vegetais.....	32
2.2.1 - Fibras Vegetais como Material de Reforço.....	35
2.2.2 - Principais Tipos de Fibras Lignocelulósicas e Suas Propriedades.....	38
2.2.2.1 - Fibras de Quenafe (<i>Papoula-do-são-francisco</i>).....	38
2.2.2.2 - Fibras de Juta.....	39
2.2.2.3 - Fibras de Bambu.....	41
2.2.2.4 - Fibras de Coco ou <i>Coir</i>	42
2.2.2.5 - Fibras de Sisal.....	43
2.3 - Fibrocimentos Baseados em Fibras Vegetais.....	46
2.3.1 - Fibrocimentos.....	46
2.3.2 - Fibrocimentos Verdes.....	49
2.4 - O Açaizeiro, seus Produtos e a Fibra Oriunda da Semente	50
III - METODOLOGIA EXPERIMENTAL	58
3.1 - Caracterização da Fibra da Semente do Açaí.....	58

3.1.1 - Caracterização Morfológica.....	58
3.1.2 - Caracterização Físico-Química.....	60
3.1.2.1.- Análise do pH (NBR 7220/1987).....	60
3.1.2.2 - Análise Termogravimétrica.....	61
3.1.2.3 - Análise por Espectrometria de Infra-vermelho.....	61
3.1.2.4 - Massa Específica.....	61
3.1.2.5 - Dimensões Médias.....	62
3.2 - Produção dos Compósitos.....	63
3.2.1 - Composição do Fibrocimento.....	64
3.2.1.1 - Preparação das Fibras.....	65
3.2.2 - Proporções das Misturas Cimentícias.....	66
3.2.2.1 - Primeiro Lote de Corpos-de-Prova.....	66
3.2.2.2 - Segundo Lote de Corpos-de-Prova.....	69
3.2.3 - Moldagem dos Corpos-de-Prova.....	71
3.3 - Caracterização dos Compósitos.....	72
3.3.1 - Ensaio de Determinação de Propriedades Físicas.....	72
3.3.2 - Ensaio Mecânicos.....	74
3.3.2.1 - Ensaio de Compressão Simples (NBR 5739/1994 e NBR 7215/1996)....	74
3.3.2.2 - Ensaio de Tração na Flexão (NBR 12142/1991).....	75
3.3.2.3 - Ensaio de Tração por Compressão Diametral (NBR 7222/1994).....	76
IV - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	79
4.1 - Propriedades da Fibra	79
4.1.1 - Morfologia.....	79
4.1.2 - Propriedades Físico-Químicas.....	85
4.1.2.1 - O pH.....	85
4.1.2.2 - Termogravimetria.....	85
4.1.2.3 - Espectrometria de Infravermelho.....	87
4.1.2.4 - Massa Específica.....	88
4.1.2.5 - Dimensões Médias.....	89
4.1.2.6 - Coeficiente de Flexibilidade, Índice de Runkel, Índice de Enfeltramento e Fração Parede.....	92

4.2 - Propriedades dos Compósitos.....	93
4.2.1 - Propriedades Físicas	93
4.2.1.1 - Massa Específica, Porosidade Aparente e Absorção de Água.....	93
4.2.2 - Propriedades Mecânicas	96
4.2.2.1 - Resistência à Compressão Simples.....	96
4.2.2.2 - Resistência à Tração na Flexão.....	98
4.2.2.3 - Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	99
4.2.3 - Propriedades Microestruturais.....	102
V – CONCLUSÕES	104
VI - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
APÊNDICES	114
APÊNDICE A - Amostragem e tratamento estatístico das larguras da fibra.....	114
APÊNDICE B - Amostragem e tratamento estatístico do comprimento da fibra.....	115
APÊNDICE C - Amostragem, médias e desvios padrão das propriedades físicas da fibra.....	116
ANEXOS	117
ANEXO 1 - Curva termogravimétrica da fibra de sisal (Agave sisalana) obtida por Monhnacz et al.....	117
ANEXO 2 - Relatório de ensaio à compressão da mistura 01ARG aos 7 dias.....	118
ANEXO 3 - Relatório de ensaio à compressão da mistura 01ARG aos 28 dias.....	119
ANEXO 4 - Relatório de ensaio à compressão da mistura 02MIN aos 7 dias.....	120
ANEXO 5 - Relatório de ensaio à compressão da mistura 02MIN aos 28 dias.....	121
ANEXO 6 - Relatório de ensaio à compressão da mistura 03MAX aos 7 dias.....	122
ANEXO 7 - Relatório de ensaio à compressão da mistura 03MAX aos 28 dias.....	123
ANEXO 8 - Relatório de ensaio à compressão da mistura T100F aos 7 dias.....	124
ANEXO 9 - Relatório de ensaio à compressão da mistura T100F aos 28 dias.....	125

ANEXO 10 - Relatório de ensaio à compressão da mistura T203F aos 7 dias.....	126
ANEXO 11 - Relatório de ensaio à compressão da mistura T203F aos 28 dias.....	127
ANEXO 12 - Relatório de ensaio à compressão da mistura T304F aos 7 dias.....	128
ANEXO 13 - Relatório de ensaio à compressão da mistura T304F aos 28 dias.....	129
ANEXO 14 - Relatório de ensaio à compressão da mistura T405F aos 7 dias.....	130
ANEXO 15 - Relatório de ensaio à compressão da mistura T405F aos 28 dias.....	131
ANEXO 16 - Resultado de ensaio à tração na flexão aos 7 dias, p. 1 de 2 (CIENTEC)....	132
ANEXO 17 - Resultado de ensaio à tração na flexão aos 7 dias, p. 1 de 2 (CIENTEC)....	133
ANEXO 18 - Relatório de ensaio à tração por compressão diametral da mistura T100F aos 7 dias.....	134
ANEXO 19 - Relatório de ensaio à tração por compressão diametral da mistura T100F aos 28 dias.....	135
ANEXO 20 - Relatório de ensaio à tração por compressão diametral da mistura T203F aos 7 dias.....	136
ANEXO 21 - Relatório de ensaio à tração por compressão diametral da mistura T203F aos 28 dias.....	137
ANEXO 22 - Relatório de ensaio à tração por compressão diametral da mistura T304F aos 7 dias.....	138
ANEXO 23 - Relatório de ensaio à tração por compressão diametral da mistura T304F aos 28 dias.....	139
ANEXO 24 - Relatório de ensaio à tração por compressão diametral da mistura T405F aos 7 dias.....	140
ANEXO 25 - Relatório de ensaio à tração por compressão diametral da mistura T405F aos 28 dias.....	141

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - (a) Viga de concreto simples; (b) viga de concreto armado; (c) fratura da viga de concreto; (d) sistema compósito do concreto armado funcionando.....	20
Figura 2.2 - Classificação dos Materiais Compósitos segundo Agarwal.....	25
Figura 2.3 - Fibras descontínuas; (a) fibras alinhadas e (b) alinhamento aleatório.....	30
Figura 2.4 - Estrutura do mero da celulose.....	33
Figura 2.5 - Estrutura das células ou fibras da madeira simplificada.....	34
Figura 2.6 - Classificação das fibras lignocelulósicas.....	35
Figura 2.7 - Representação esquemática de uma fissura através de fibrocimento reforçado com fibras vegetais.....	47
Figura 2.8 - Ocorrência geográfica espontânea da espécie <i>Euterpe oleracea</i> no Brasil....	52
Figura 2.9 - Ilha do Combu, foto aérea (A) e de moradia ribeirinha típica (B).....	53
Figura 2.10 - Ocorrência do açazeiro em Belém e anatomia básica da planta.....	54
Figura 2.11 - Seqüência fotográfica da Feira do Açaí no complexo do mercado Ver-o-Peso em Belém.....	55
Figura 2.12 - Anatomia da semente do açazeiro	57
Figura 2.13 - Evidência das fibras nas sementes pós extração da polpa.....	57
Figura 3.1 - Fotografias ilustrando as amostras preparadas para a observação das fibras de açaí no MEV.....	59
Figura 3.2 - Fotografias ilustrando o processo de metalização das amostras para análise no MEV. (A) as amostras no equipamento de <i>sputtering</i> ; (B) tabela de controle da espessura do filme; (C) amostras recobertas com ouro; e (D) porta-amostras na bandeja de entrada do MEV.....	60
Figura 3.3 - Exemplo de medida das dimensões efetuadas com auxílio de software CAD.....	62
Figura 3.4 - Exemplo de medida do comprimento das fibras.....	63
Figura 3.5 - Fotografias das (A) fibras drenando em peneiras metálicas e (B) água residual do	

cozimento.....	65
Figura 3.6 - Fotografias das (A) fibras sendo pesadas e (B) adição de fibras à pasta de cimento e água.....	66
Figura 3.7 - Fotografias da (A) adição de água ao cimento; (B) adição de fibras à pasta; (C) moldes cilíndricos; e (D) corpos-de-prova prismáticos na forma imediatamente após a moldagem.....	68
Figura 3.8 - Fotografias da (A) argamasseira; (B) fibras e metade d'água; (C) fibras, parte d'água e parte do cimento; (D) mistura completa; (E) adensamento; e (F) corpos-de-prova moldados.....	69
Figura 3.9 - Corpo-de-prova da primeira etapa rompido e da segunda, no momento do ensaio.....	74
Figura 3.10 - Esquema do ensaio prescrito pela NBR 12142/1991.....	76
Figura 3.11 - (A) Esquema do Ensaio de Tração por Compressão Diametral e (B) Corpo-de-prova pronto pro ensaio.....	78
Figura 4.1 - Micrografia do perfil longitudinal da fibra com ampliação de 620x.....	80
Figura 4.2 - À esquerda, um microgrão e, à direita, baixo relevo impresso por outro na superfície da fibra com ampliação de 4441x.....	80
Figura 4.3 - Fibra com configuração longitudinal em “Y” e encontro dos prolongamentos com fissura (no detalhe) com ampliação de 145x.....	81
Figura 4.4 - Visão geral da amostra I (secção transversal) com ampliação de 48x.....	81
Figura 4.5 - Secção transversal com ampliação de 823x.....	82
Figura 4.6 - Lume a partir da secção longitudinal com ampliação de 1633x.....	82
Figura 4.7 - Detalhe do lume cortado longitudinalmente e camadas de microfibrilas visíveis na parte inferior com ampliação de 3265x.....	83
Figura 4.8 - Trecho do lume “suspenso” e evidência do comportamento espiralado, com aumento de 3576x.....	83
Figura 4.9 - Representação esquemática proposta da estrutura morfológica interna simplificada das fibras.....	84
Figura 4.10 - Fibras submetidas ao ensaio da NBR 7220/1987.....	85
Figura 4.11 - Curva termogravimétrica para a fibra da semente do açaizeiro.....	86
Figura 4.12 - Espectro de infravermelho das fibras da semente do açaí.....	88

- Figura 4.13 - Algumas dimensões possíveis determinadas com auxílio de software CAD. Fibra real, fibra virtual, larguras médias da seção, larguras médias do lume, área da seção e área do lume.....90
- Figura 4.14 - Imagem escaneada das fibras no papel milimetrado e dimensões obtidas em software CAD. Fibras dispostas no papel milimetrado e dimensões sobre o negativo da imagem..... 91
- Figura 4.15 - Histograma da frequência da classificação do comprimento da fibra de açai.....92
- Figura 4.16 - Corpos-de-prova Rompidos em Compressão e Detalhe do Desempenho das Fibras..... 98
- Figura 4.17 - Corpos-de-prova Rompidos no Ensaio de Tração por Compressão Diametral aos 28 dias (A) e na prensa (B) e dispostos fora do equipamento..... 100
- Figura 4.18 - Fotografias do CP2-T304F (A) e do CP2-T203F (B) com o referido defeito..... 100
- Figura 4.19 - Microestrutura da fratura dos compósitos evidenciando fibras alinhadas verticalmente..... 103
- Figura 4.20 - Microestrutura da fratura dos compósitos evidenciando fibras alinhadas no sentido horizontal..... 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades Típicas de Alguns Materiais de Engenharia.....	21
Tabela 2.2 - Avaliabilidade de Algumas Fibras Naturais na Índia e suas Aplicações.....	36
Tabela 2.3 - Propriedades Físicas e Mecânicas de Algumas Fibras Vegetais.....	45
Tabela 2.4 - Produção de Compósitos Cimentícios (Fibrocimento).....	49
Tabela 3.1 - Composição das Misturas Cimentícias – I.....	68
Tabela 3.2 - Composição das Misturas Cimentícias – II.....	70
Tabela 4.1 - Dimensões das fibras de açaí.....	91
Tabela 4.2 - Relações entre as dimensões da fibra de açaí.....	92
Tabela 4.3 - Massa Específica, Porosidade Aparente e Absorção de Água da Primeira Batelada de Compósitos.....	94
Tabela 4.4 - Massa Específica, Porosidade Aparente e Absorção de Água da Segunda Batelada de Compósitos.....	94
Tabela 4.5 - Resistência à Compressão Axial da Primeira Batelada Compósitos.....	96
Tabela 4.6 - Resistência à Compressão Axial da segunda batelada de compósitos.....	97
Tabela 4.7 - Resistência à Tração na Flexão aos 7 Dias.....	99
Tabela 4.8 - Resistência à Tração por Compressão Diametral.....	99

I - INTRODUÇÃO

As alterações ocorridas na biosfera em função da extração, utilização e degradação dos recursos naturais ao longo da evolução humana têm gerado uma corrida em busca de soluções para que se fomente uma nova era evolutiva, com a plena conscientização e prática de desenvolvimento sustentável. Nos países mais desenvolvidos, em função do nível mais alto de degradação destes recursos, têm-se políticas ambientais bastante desenvolvidas amparadas por uma legislação rígida.

Neste contexto, o papel da Engenharia de Materiais é de inovação tecnológica a fim de ampliar as opções de insumos materiais em função justamente do desenvolvimento sustentável. Projetos de engenharia devem atualmente levar em conta aspectos ambientais, visando à redução dos impactos ambientais desde a extração de recursos – que preferencialmente devem ser renováveis – até a degradação do material final processado quando de seu descarte. Um projeto de produção em série também precisa preferencialmente empregar o conceito de desenvolvimento em interdisciplinaridade com a responsabilidade social e levar em conta formas de inserção da demanda da mão-de-obra em contrapartida ao declínio social, conseqüente do processo de industrialização na evolução da humanidade.

A aplicação de novos materiais oriundos de fontes renováveis vem se tornando cada vez mais freqüente e algumas iniciativas bem sucedidas com relação à qualidade do produto e à responsabilidade social tem se tornado referência. Um exemplo é o caso da indústria automobilística da Alemanha e do Brasil que utiliza compósitos reforçados com fibras vegetais como material de estofamento de assentos dos automóveis europeu Mercedes Classe E e brasileiro Mercedes Classe A, fabricados pela Daimler Chrysler. O automóvel fabricado no Brasil utiliza fibras da casca do coco, subproduto das indústrias alimentícia e cosmética, aglutinadas em borracha natural, o látex – polímero natural obtido a partir da seringueira (*Hevea brasiliensis*) como estofamento devido a características análogas às de espumas

tradicionais ^[1]. Um outro exemplo é o projeto desenvolvido pela Agência Americana para Desenvolvimento Internacional (*United States Agency for International Development*) em Georgetow, na Guiana, que trata sobre a extração de fibra de coco (*cocus nucifera*) para produtos de jardinagem, tais como vasos autodrenantes, berçários para germinação de sementes e misturas nutrientes para solos de plantio^[1, 2, 3].

A utilização das fibras vegetais como materiais é muito antiga, sendo utilizadas sua forma primitiva na produção manual de utensílios variados desde 3.000 a.C. É crescente o número de publicações científicas sobre a utilização de fibras vegetais como materiais de engenharia. Há estudos sobre a utilização de fibras de sementes como o algodão; fibras de caule como a juta o linho e o cânhamo; fibras de folhas como a bananeira, o sisal, a piaçava, o curauá; fibras de fruto como o coco; e fibras de raiz como o zacatão e a mandioca, entre outras. O uso das fibras da casca de coco em novos materiais é bastante disseminado para a produção de produtos variados, de tapetes de porta e mantas geotêxteis para contenção de taludes escavados e margens de aquíferos à tecidos e acessórios vestuários, além dos exemplos supracitados. As fibras de sisal (*Agave sisalana*), componente tradicional de tapetes e cordas, estão sendo muito estudadas na substituição do amianto das tradicionais telhas de fibrocimento, que ainda são a mais comum e econômica solução de cobertura para habitação popular. Há de se atentar que a utilização dessas fibras vegetais no fibrocimento é sanitariamente correta, pelo fato de o amianto, nome comercial do silicato natural hidratado de cálcio e magnésio, de textura fibrosa, ser um mineral nocivo que pode causar asbestose – pneumoconiose provocada pela inalação de partículas de asbesto – em seres humanos e que pode ocorrer tanto no seu processo de fabricação como na instalação das telhas por operários ou ainda na exposição ao risco de contaminação da água de consumo humano quando reservadas em caixas d’água de cimento-amianto comercializada popularmente por muitos anos^[4, 5, 6]. Para o caso das fibras de sisal, as possibilidades para o Brasil, especialmente para o Norte e o Nordeste do país, são várias devido à extensa variedade de espécies de sua flora, resíduos de algumas indústrias – e.g. as de água e óleo de coco, cana-de-açúcar, extração de palmito – e a mão-de-obra ociosa de regiões isoladas pouco desenvolvidas. Na Amazônia brasileira, há exemplos especiais, além das fibras de coco há o curauá (*Bromelia plumieri*), bromeliácea de onde é extraída a fibra que é processada como polpa ou pasta celulósica para fabricação de papel pela Amazon Paper, fábrica do POEMAtec – extensão do POEMA – em Ananindeua, região metropolitana de Belém. Há ainda diversas espécies com potencial para extração de fibras, e.g. palmeiras de açaí (*Euterpe oleracea* Mart.) e de buriti (*Mauritia*

vinifera Mart.)^[7, 8].

O presente trabalho visa contribuir para a área de materiais compósitos reforçados com fibras, experimentando de modo inédito a possibilidade de utilização de fibras vegetais oriundas do subproduto da extração da polpa de açaí, fruto da estirpe *Euterpe oleracea*, como material alternativo para o setor de construção civil. Salienta-se que no processo de extração para comercialização de seus consumíveis primários, o fruto e o palmito, há uma grande geração de resíduos que precisam de uma destinação adequada. A *Euterpe oleracea* Mart. é uma palmeira abundante nos estuários de rios, em terrenos de várzea, igapós e terra firme, da região Norte e na parte amazônica nordestina na transição da área de divisa territorial dos estados do Pará e Maranhão, tendo suas maiores reservas naturais no Estado do Pará. A extração da polpa comercial do fruto, para consumo como alimento humano, é efetuada por meio do esmagamento e posterior filtração através de peneira. Consiste em um processo que envolve a adição de água em quantidades variadas, que depende da qualidade do produto que se quer obter em uma graduação de viscosidade. O suco, ou vinho de açaí, é um alimento muito comum semi-industrializado em mesoregiões do Norte. Existem máquinas mecânicas de pequeno porte em vários pontos comerciais de todos os bairros de Belém, capital do Pará. O litro do produto no ano de 2006 custava de R\$ 3,00 a R\$ 9,00 – em média em Belém – e chegava a R\$ 0,30 em micro regiões de vilas e povoados de municípios mais isolados da Amazônia paraense ^[8, 9].

Neste trabalho, investigou-se a possibilidade de utilização das fibras obtidas da semente do açaí a partir do processo de despulpagem do fruto em compósitos cimentícios, os quais podem ser empregados para fins diversos, como telhas, placas (ou painéis de vedação), pisos intertravados, concretos e concretos pré-moldados de cimento Portland. O estudo envolveu aspectos relacionados à determinação de propriedades da fibra e à proporção adequada de fibra em relação ao cimento Portland, além de ensaios mecânicos e físicos para avaliação do desempenho do material final como fibrocimento.

II – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 – Aspectos Gerais Sobre os Materiais Compósitos

2.1.1 – Definição

Pelo fato da ainda recente necessidade do desenvolvimento de novos materiais industrializados que combinem propriedades de materiais já existentes, estes novos materiais chamados de materiais compósitos não possuem ainda um conceito definitivo ou globalizado, embora este tipo de material seja utilizado pela humanidade desde o princípio da civilização.

Segundo Jones^[10] materiais compósitos são “dois ou mais materiais combinados em escala macroscópica formando um terceiro material”. Já Schwartz^[11] considera que “um material compósito é um sistema composto de materiais resultante de uma mistura ou combinação de dois ou mais macroconstituintes diferentes em forma e/ou composição e que são essencialmente insolúveis entre si”. Jastrzebski^[12] conceitua de uma forma bem sucinta, “materiais compósitos são aqueles constituídos de pelo menos dois diferentes tipos de materiais de tal forma a assegurar as propriedades ótimas (do material formado)”. Da mesma forma, bem generalizada, Callister^[13] considera materiais compósitos como sendo “qualquer material multifásico que exiba uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases que o constituem, de tal modo que é obtida uma melhor combinação de propriedades”. De acordo com Agarwal^[14] em uma definição simples, a palavra compósito significa “constituído de duas ou mais partes distintas”, e ainda, “compósitos consistem em uma ou mais fases descontínuas embebidas em uma fase contínua. A fase descontínua é normalmente mais dura e resistente do que a fase contínua e é chamada de material de reforço, enquanto que a fase contínua é chamada de matriz”. O autor atenta ainda para o que chama de exceção, que seria a classe de materiais conhecida como polímeros de borracha-modificada, que consistem em uma matriz rígida de polímero preenchida com partículas de borracha. Jones^[10]

e Schwartz^[11] dão ênfase ao caráter macroscópico dos materiais que constituem os compósitos, pois se assim não fosse, as ligas metálicas e os copolímeros, por exemplo, deveriam ser então chamados de materiais compósitos. Para não permitir entendimentos precipitados que tornariam todas as concepções prévias que já se conhece nulas sobre vários tipos de materiais, faz-se necessário outras ponderações, as quais estes referidos autores mencionam como “caráter macroscópico”, haja vista que em ligas metálicas, por exemplo, também há uma divisão de desempenhos no sistema entre os constituintes da mistura. Em seguida, o que mais se necessita definir no conceito de materiais compósitos é que o “material final é oriundo da combinação de propriedades de materiais conhecidas, com a finalidade de se produzir um novo material ideal para uma aplicação específica”.

Já que o material compósito é constituído de dois ou mais materiais conhecidos, por que não chamá-los de materiais compostos? Nesse questionamento está fundamentado o raciocínio para a concepção ideal do conceito dos materiais compósitos. Não se chama compostos pelo fato de que estes materiais não são formados simplesmente por dois ou mais materiais, mas há um porquê que determina a combinação de materiais, que é o funcionamento do material final como um sistema que combina as propriedades dos materiais constituintes.

2.1.2 – O Sistema Compósito e suas Propriedades

Para uma melhor compreensão do que consiste um material compósito, em termos do funcionamento do seu desempenho mecânico, é preciso que se tenha a pré-concepção de que se deve entender este novo material como um sistema. O sistema compósito funciona de acordo com a combinação das propriedades da matriz e do material de reforço.

As propriedades dos materiais compósitos são fortemente influenciadas pelos materiais constituintes, suas concentrações e distribuições e por todas as interações por estes geradas dentro do sistema. As propriedades do material compósito podem ser uma relação matemática de percentuais das propriedades dos materiais constituintes, ou estes materiais constituintes podem interagir de forma sinérgica tal que proporcione propriedades no sistema compósito, não estimáveis numericamente considerando simplesmente os volumes percentuais dos materiais constituintes^[14].

O funcionamento do sistema compósito é determinado pelos materiais constituintes,

em função das propriedades destes de forma mútua. O reforço – que é concebido como um material de estrutura – geralmente determina a forma geométrica do material compósito e também a densidade e a distribuição volumétrica específica que preferencialmente deve tender à homogeneidade. Há exceções, e.g. compósitos laminares. Contudo, é possível se obter dois materiais compósitos diferentes constituídos por reforços de geometrias idênticas. O reforço de um sistema compósito pode ser função da sua concentração simples ou em termos mais complexos, como o arranjo da distribuição espacial orientada. As combinações geradas pela especificação dos materiais constituintes e do processo de manufatura determinam as propriedades dos materiais compósitos ^[14].

Talvez o exemplo mais clássico de material compósito seja o *concreto de cimento Portland* – ou CCP. O concreto comum, de construção, constituído pela tríade cimento hidráulico, agregados miúdos e graúdos, ou seja, cimento Portland, areia e cascalhos ou pedras. Arelado ao CCP tem-se uma infinidade de variações de concretos também da construção civil – já que novas combinações surgiram em respostas aos novos desafios da engenharia –, como os concretos para execução de simples fundações superficiais até os concretos de alto-desempenho com sistema de articulação estrutural usados em pontes, com elementos de neoprene, nas modernas pontes projetadas para suportar terremotos. Outro exemplo de concreto muito comum é o CBUQ, Concreto Betuminoso Usinado à Quente, mais comumente conhecido como asfalto, com subvariações à parte, mas muito presente no dia-a-dia.

Uma combinação ideal de um sistema compósito pode ser ilustrada através da Figura 2.1, onde se tem uma viga de concreto armado – concreto de cimento Portland (CCP) e armadura de aço – com um carregamento central **F**. O CCP fraturaria facilmente, enquanto que quando da sua combinação com a armadura de aço há a combinação ideal de propriedades, compondo a propriedade do material compósito. O concreto resiste com excelência à compressão, enquanto que os esforços de tração do sistema são suportados integralmente pela armadura de aço, um reforço.

Jones^[10] também discorre sobre as possibilidades de combinações resultantes considerando-se as melhores propriedades de cada material no compósito como um todo, apontando que o sucesso do compósito, ou seja, o sucesso da perfeita combinação de propriedades em função da forma como fora arranjado o sistema, é definido pelo bom projeto de manufatura do produto final. Este autor cita como algumas propriedades que se pode combinar com o processo de materiais compósitos a fim de se obter um material de

engenharia ideal para uma aplicação específica:

- Resistência mecânica;
- Dureza;
- Resistência à fadiga;
- Resistência à corrosão;
- Resistência à abrasão;
- Densidade;
- Isolamento ou condutividade térmica;
- Isolamento acústico
- Magnetismo (para compósitos com metais).

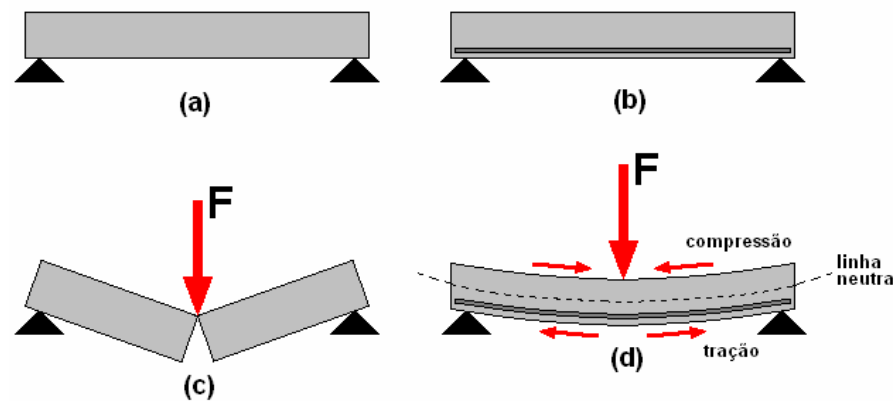


Figura 2.1 – (a) Viga de concreto simples; (b) viga de concreto armado; (c) fratura da viga de concreto; (d) sistema composto do concreto armado funcionando.

Na Tabela 2.1, a seguir, pode-se comparar as propriedades típicas de alguns materiais de engenharia produzidos em escala industrial, incluindo alguns dos compósitos mais comuns. Nota-se, a partir da Tabela 2.1, que os compósitos apresentam ótimas propriedades em relação aos outros materiais. De uma forma geral, a partir da manufatura desses novos materiais é possível reduzir mais de 50% a densidade em relação aos metais, elevando-se muito o módulo de elasticidade e a resistência à tração em relação aos polímeros. Comparando-se a liga de alumínio 6061-T6 com o compósito de resina epóxi reforçada com fibra de vidro, observa-se a redução pela metade da densidade mantendo-se o módulo de elasticidade praticamente inalterado e aumentando-se cerca de quatro vezes a tensão de ruptura.

Segundo Mazumdar^[15] o custo por peso dos materiais compósitos é muito maior que para materiais tradicionais. Por exemplo, é em torno de cinco a vinte vezes maior, comparado ao aço e ao alumínio. A seguir estão alguns custos por quilo de alguns materiais:

- fibra de vidro = US\$ 2,00 a US\$ 17,00/kg;
- fibra de carbono = US\$ 17,00 a US\$ 88,00/kg;
- resina epóxi = US\$ 3,30/kg;
- *prepreg* carbono/epóxi = US\$ 26,45 a US\$ 132,30/kg;
- aço = US\$ 0,45 a US\$ 2,20/kg;
- alumínio = US\$ 1,30 a US\$ 2,20/kg.

Tabela 2.1 – Propriedades Típicas de Alguns Materiais de Engenharia.

Material	Densidade (g/cm ³)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à Tração (GPa)	Módulo Específico (E/densidade)	Resistência Específica (resist./densidade)	Temperatura Máxima de Serviço (°C)
Metais						
Ferro fundido, grau 20	7,0	100	0,14	14,3	0,02	230 — 300
Aço, AISI 1045	7,8	205	0,57	26,3	0,073	500 — 650
Alumínio 2024-T4	2,7	73	0,45	27,0	0,17	150 — 250
Alumínio 6061-T6	2,7	69	0,27	25,5	0,10	150 — 250
Polímeros						
Nylon® 6/6	1,15	2,9	0,082	2,52	0,071	75 — 100
Polipropileno	0,90	1,4	0,033	1,55	0,037	50 — 80
Epóxi	1,25	3,5	0,069	2,80	0,055	80 — 215
Fenólico	1,35	3,0	0,006	2,22	0,004	70 — 120
Cerâmicas						
Alumina	3,80	350	0,17	92,1	0,045	1425 — 1540
MgO	3,60	205	0,06	56,9	0,017	900 — 1000
Compósitos de Fibras Descontínuas						
Fibra epoxi (35%)	1,90	25,0	0,30	8,26	0,16	80 — 200
Fibra poliéster (35%)	2,00	15,7	0,13	7,25	0,065	80 — 125
Fibra nylon (35%)	1,62	14,5	0,20	8,95	0,12	75 — 110
Fibra nylon (60%)	1,95	21,8	0,29	11,18	0,149	75 — 110
Compósitos Unidirecionais						
Fibra de vidro/epoxi (45%)	1,81	39,5	0,87	21,8	0,48	80 — 215
Carbono/epoxi (61%)	1,59	142,0	1,73	89,3	1,08	80 — 215
Aramida (Kevlar®)/epoxi (53%)	1,35	63,6	1,10	47,1	0,81	80 — 215

Fonte: Mazumdar^[15].

Porém, é fundamental lembrar que a densidade de metais é comumente muito maior

que a de materiais compósitos e que estes últimos são produzidos em larga escala, tornando então a sua produção plenamente viável em um leque de aplicações.

A concentração dos materiais constituintes, responsável direta pela densidade dos materiais compósitos, é normalmente mensurada em termos de percentual de volume ou peso dos mesmos. A contribuição de um único constituinte nas propriedades do material compósito é determinada principalmente por esse parâmetro, a qual pode ser controlada através de variações no processo de fabricação. As concentrações de materiais constituintes como partes em uma matriz representam a homogeneidade ou uniformidade do sistema. A homogeneidade do material compósito é uma característica importante que determina a extensão na qual um volume representativo de material – quer matriz, quer reforços – pode diferenciar em propriedades físicas e mecânicas a partir das propriedades que se referem ao material compósito, ou seja, as propriedades do sistema. Baixas concentrações pontuais devem ser evitadas, pois a não-uniformidade prejudica as propriedades que são governadas pela interação reforço/matriz ^[14].

A orientação do reforço influencia diretamente a isotropia do sistema compósito. Quando o reforço está na forma de partículas, com todas as dimensões aproximadamente iguais, o material compósito comporta-se essencialmente como um material isotrópico, cujas propriedades independem da direção. Quando as dimensões do reforço são desiguais, o material compósito pode ainda se comportar como um material isotrópico, desde que o reforço possa ser disposto aleatoriamente, como por exemplo, o caso de compósitos reforçados com fibras curtas. Dependendo do processo de fabricação (por exemplo, por extrusão) é possível induzir a orientação do reforço gerando anisotropia. Em compósitos reforçados com fibras contínuas, como compósitos unidirecionais ou laminares, a anisotropia pode ser desejada e obtida através da escolha do processo de fabricação adequado ^[14].

A distribuição da concentração das partículas ou fibras refere-se às suas relações espaciais, umas em relação às outras. Há a possibilidade de as partículas estarem dispersas uniformemente em um material compósito e alocadas em posições regulares sem que duas unidades de reforços se toquem. Em contrapartida, é aceitável supor que a dispersão do reforço se dê de uma forma tão bem arranjada que estas formem uma cadeia tal qual uma trama, com as partículas ligadas todas umas às outras numa trilha contínua dispersa espacialmente. Isso se dá quando ocorre a menor taxa possível de empacotamento do reforço, podendo-se fazer uma analogia ao fator de empacotamento das células unitárias de arranjos atômicos cristalinos. Tal como uma rede, a dispersão pode influenciar significativamente as

propriedades elétricas dos materiais compósitos. Um exemplo interessante de um caso desse tipo é a dispersão da grafita em borracha sintética. Acima de uma concentração de 10% a condutividade elétrica deste material compósito aumenta notavelmente, a qual é atribuída à formação da rede do reforço de grafita ^[14].

A facilidade de se manipular as propriedades dos materiais compósitos juntamente com o potencial de industrialização fazem com que estes materiais sejam muito importantes para o desenvolvimento da humanidade, somando-se ainda ao caráter financeiro e possibilidade de utilização de materiais ecologicamente corretos, a fim de minimizar os impactos ambientais, como materiais naturais. Estes últimos podem vir a ser os materiais que irão ditar o rumo da evolução dos materiais compósitos.

2.1.3 – Classificação e Principais Tipos de Materiais Compósitos

Ainda não há uma classificação universal oficial dos materiais compósitos. Existem vertentes acadêmicas que agrupam os compósitos de acordo com sua forma, processo, tipo de matriz, tipo de reforço, entre vários outros critérios. O que faz com que se tenha uma considerável variedade de classes distintas entre si. Segundo Clyne, Schwartz e Ferrante apud Gil^[16], os materiais compósitos podem ser classificados de acordo com o constituinte da matriz em: compósitos de matriz polimérica (CMP); compósitos de matriz metálica (CMM); e, compósitos de matriz cerâmica (CMC). Onde os CMP são interessantes por sua leveza e baixo custo, os CMM por suas propriedades mecânicas e os CMC por sua resistência a altas temperaturas e resistência ao desgaste. Ou ainda os materiais compósitos podem ser classificados segundo a natureza e disposição do reforço (geralmente fibras, escamas ou partículas) no interior da matriz em: compósitos fibrosos, compósitos particulados, compósitos escamados e compósitos laminares. Ou ainda, a classificação pode se dar quanto à forma do reforço, que se apresenta como partículas, *whiskers* e fibras contínuas ou descontínuas, lâminas e escamas. Designando-se assim os materiais compósitos em: compósitos fibrosos, compósitos particulados, compósitos escamados e compósitos laminares.

Segundo Jones^[10] os quatro tipos de materiais compósitos são os seguintes: materiais compósitos reforçados com fibras, que consiste em um sistema composto por fibras em uma matriz; materiais compósitos laminados, formado por camadas de vários materiais; materiais compósitos particulados, que é um sistema com partículas em uma matriz; e combinações de

alguns ou dos três tipos anteriores, também chamados por alguns autores de compósitos híbridos, normalmente quando há mais de um reforço. Já Agarwal^[14] agrupou os materiais compósitos a partir de dois grandes grupos e respectivos subgrupos, com mecanismo de reforços semelhantes, como está esquematizado na Figura 2.2. Segundo este autor, o mecanismo de reforço depende fortemente da geometria do reforço, o que faz com que seja conveniente agrupar, ou seja, classificar, os materiais compósitos com referência a mais representativa unidade de reforço.

O critério básico para a classificação da Figura 2.2 é a diferença entre os dois tipos de reforço, partícula e fibra. Onde tem-se que uma partícula é naturalmente não-fibrosa, podendo ser esférica, cúbica, tetragonal, escamada ou quaisquer outras formas regulares ou irregulares, sendo que a forma sempre será possível de se aproximar por abstrações matemáticas, que se aproximam das quatro formas supracitadas. A fibra, por sua vez, é caracterizada pelo seu comprimento ser muito maior que a sua secção transversal^[14].

Em função do escopo do presente trabalho, comentar-se-á somente materiais compósitos fibrosos.

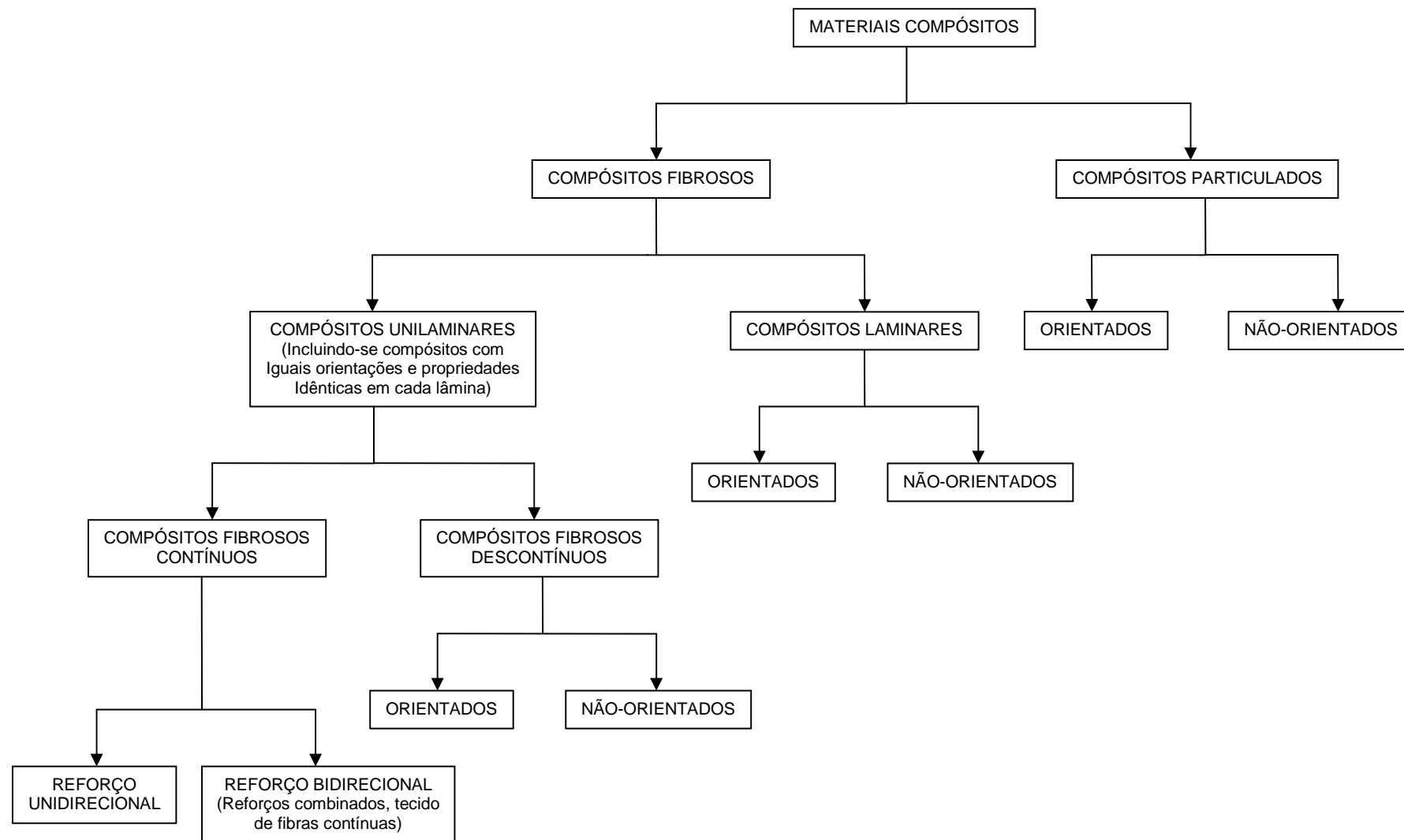


Figura 2.2 – Classificação dos materiais compósitos segundo Agarwal^[14].

2.1.3.1 – Materiais Compósitos Fibrosos

A tecnologia atual de produção de materiais considera que os compósitos mais importantes são aqueles que possuem como matéria-prima para reforço as fibras. Pois, como uma característica inerente de todos os materiais, com atenção especial aos mais frágeis, uma fibra com diâmetro pequeno é muito mais rígida e resistente do que o mesmo material em forma bruta [10, 11, 12, 13, 14, 15]

É consenso que a resistência da maioria dos materiais determinada experimentalmente é muito menor (por algumas ordens de magnitude) que sua resistência teórica. A discrepância entre esses valores de resistência é creditada à presença de imperfeições ou falhas inerentes do material. Mas, como gerar falhas é inerente à produção artificial e, logo, estas sempre estarão presentes em materiais desenvolvidos pelo homem, opta-se na concepção do projeto por resistências superdimensionadas. É comprometedor para a resistência do material falhas em forma de fraturas perpendiculares à direção das cargas aplicadas. Portanto, fazendo-se uma comparação das resistências dos materiais frente ao carregamento mecânico, as fibras sintéticas de materiais poliméricos exibem resistências muito maiores, ao longo de seus comprimentos, haja vista que as falhas inerentes ao material estarão presentes, porém minimizadas em função das pequenas dimensões da seção transversal das fibras. No caso de materiais poliméricos a orientação da estrutura molecular é responsável por altas resistências e rigidez. As propriedades de alguns tipos comuns de fibras são tão boas quanto às de alguns materiais convencionais, o que expressa a importância das fibras como fomentadora de altas resistências em materiais compósitos. A alta resistência das fibras de vidro é atribuída à superfície livre de defeitos, ao passo que fibras de grafite ou aramida alcançam suas resistências como um resultado da melhoria na orientação das suas estruturas atômicas ou moleculares. O mais importante reforço fibroso é a fibra de vidro em função do seu relativo baixo custo, mesmo sendo as fibras de boro, de grafite e as fibras poliméricas de aramida (Kevlar 49®) superiores em rigidez. Destas últimas, as fibras de grafite oferecem a maior variedade em função da facilidade do controle de sua estrutura [14].

As fibras, em função das suas pequenas dimensões de seção transversal, não são usadas diretamente em aplicações de engenharia. Elas são embebidas em matrizes para formar compósitos fibrosos. A matriz compõe o sistema compósito aglomerando as fibras umas às outras, transferindo carregamentos para as fibras e protegendo-as contra o ataque do ambiente e

avarias devido ao manuseio. Em compósitos fibrosos descontínuos, a função de transferência de carga da matriz é mais crítica que em compósitos fibrosos contínuos. Em função de os compósitos fibrosos proporcionarem altas resistências estes se tornaram a classe de materiais mais importante industrialmente.

Os compósitos fibrosos podem ser classificados de forma sucinta como, compósitos unilaminares ou multilaminares. Compósitos multilaminares podem de fato ser constituídos de várias lâminas, com cada lâmina possuindo as mesmas orientações e propriedades ou não. No caso de compósitos sem lâminas distintas, constituídos de fibras descontínuas, ainda que a orientação planar das fibras possa não ser uniforme ao longo da largura/espessura, podem ser classificados como compósitos unilaminares e não necessariamente serem chatos (esbeltos). No caso de compósitos fabricados como mantas não-tecidas (do inglês *mats*), e.g. feltro, a orientação aleatória é constante em cada camada e o compósito resultante seria unilaminar, mesmo que uma camada rica em resina se encontre entre cada lâmina de reforço.

Muitos compósitos usados em aplicações estruturais são laminados, i.e. consiste em várias lâminas de compósitos fibrosos. Cada camada ou lâmina é um compósito unilaminar e sua orientação varia de acordo com o projeto. Cada lâmina do compósito é usualmente delgada, tipicamente com uma espessura em torno de 0,1 mm e, em função disso, não é usada isoladamente. Várias lâminas iguais ou diferentes são sobrepostas para formar um compósito laminado adequado para aplicações de engenharia. Quando os materiais constituintes em cada lâmina são os mesmos, estes são chamados simplesmente de laminados. Laminados híbridos são laminados constituídos de lâminas feitas de materiais constituintes distintos. A lâmina única de um compósito unilaminar representa um bloco de construção básico para sua aplicação estrutural [14].

As fibras em compósitos unilaminares, inclusive blocos, podem ser curtas ou longas. Reforços de fibras longas determinam compósitos reforçados com fibras contínuas e os de fibras curtas, compósitos reforçados com fibras descontínuas. Uma distinção conseqüente é que compósitos de fibras descontínuas podem ser considerados os únicos em que o comprimento da fibra afeta as propriedades do compósito, pois nos compósitos de fibras contínuas pode-se assumir que a resistência mecânica cabe às fibras e que estas, alinhadas na direção do carregamento, são o principal material de sustentação de cargas. Esta última apropriação é particularmente válida quando fibras de elevados módulos de elasticidade são usadas em alta

concentração. Nesse contexto, observa-se que a matriz não tem como principal propósito sustentar cargas, i.e. desempenhar uma função estrutural, mas aglomerar e proteger superficialmente as fibras ^[14].

Ainda sobre as fibras em compósitos de uma só lâmina, chama-se reforço fibroso unidirecional o compósito que tem suas fibras contínuas todas alinhadas em uma direção. Em muitos casos de manufatura destes compósitos as fibras são dispostas lado a lado, paralelamente, e saturadas com resinas poliméricas, e.g. poliéster ou epóxi, que mantém as fibras em suas posições desempenhando função de material de matriz. Este tipo de material compósito, com fibras pré-impregnadas, são chamados de *prepregs* ^[14]. Todavia o reforço contínuo em lâmina única pode também se dar em uma segunda direção, a fim de prover propriedades mais balanceadas. O reforço bidirecional em uma camada única de compósito pode se dar em direções perpendiculares mútuas, em forma de tramas, podendo inclusive as resistências em duas direções perpendiculares serem aproximadamente iguais. Em algumas aplicações um mínimo de reforço perpendicular à direção primária é provido somente para prevenir danos e promover a separação das fibras quando do desempenho devido à baixa resistência na direção transversal – haja vista que a resistência transversal é muito menor que a resistência na direção do reforço primário.

2.1.3.2 – Compósitos Com Fibras Descontínuas

A maioria dos compósitos desenvolvidos para aplicações de engenharia é reforçada com fibras descontínuas. A partir do pressuposto de que os compósitos fibrosos têm como característica transmitir os esforços para o reforço, no caso genérico de uma fibra que não atravessasse todo o comprimento do corpo do material compósito, a ligação entre a matriz e a fibra nas extremidades da fibra não executa a transferência dos esforços gerados na matriz. Os esforços podem ser transmitidos por deformação plástica ou elástica da matriz naqueles pontos, i.e. nas extremidades da fibra. Logo, a distribuição de tensões não se dá de forma homogênea ao longo do comprimento da fibra descontínua ^[12]. A partir dessas considerações tem-se uma série de possibilidades de parâmetros matemáticos para projetos de compósitos com reforço de fibras descontínuas, por exemplo, em função do comprimento crítico das fibras, que se dá de forma inerente a cada conjunto fibra/matriz e ao mesmo tempo é mínimo para influenciar no

desempenho do sistema compósito.

O comprimento crítico (l_c) das fibras é dado por ^[13]:

$$l_c = \sigma_f^* \times d / 2\tau_c \quad (2.1)$$

onde:

d = diâmetro da fibra;

τ_c = tensão limite de escoamento cisalhante da matriz; e,

σ_f^* = limite de resistência à tração.

Sabe-se também, que o sistema compósito terá um adequado desempenho em termos de resistência se, e somente se, o módulo de elasticidade da fibra for maior que o da matriz e se os esforços aplicados no material puderem ser transferidos para as fibras, caso contrário a resistência do material final será reduzida em função de a matriz suportar então a maior proporção de esforços aplicados. Portanto, no caso das fibras a resistência ideal é alcançada quando as mesmas encontram-se alinhadas com o eixo da tensão aplicada. Logo, para compósitos com fibras descontínuas, deve haver uma ótima dispersão espacial do reforço afim de que sempre haja um número razoável de fibras, o mais homogêneo o possível, em todas as direções ^[12]. É válido salientar que a obtenção da dispersão ideal para compor um material com esta homogeneidade está intrinsecamente ligada ao processo de fabricação. Pode-se dizer ainda para o caso onde o percentual do reforço seja muito maior que o da matriz, a tendência é que as propriedades do material final sejam similares às verificadas nos desempenhos do material do reforço em questão, e.g. a densidade do material compósito quando da utilização de fibras vegetais é menor que a densidade do cimento Portland isolado.

Quanto à orientação, que no caso das fibras descontínuas é de difícil controle na manufatura, na maioria dos casos as fibras assumem orientação aleatória. Fibras curtas, muitas vezes se referem às fibras talhadas (cortadas mecanicamente), que podem ser aplicadas a ar comprimido simultaneamente com uma resina líquida contra um molde, para a produção de plásticos reforçados estruturalmente, como ocorre com a fibra de vidro. Uma outra alternativa de produção industrial de fibras curtas é aglutiná-las com mecanismos de ligação em prensa, são os chamados *mats*, que em português poderia ser neologizado por *mantas não-tecidas*, obtidas a partir de fibras que se agrupam à saída de uma máquina, formando uma unidade contínua de

espessura constante e com a largura de projeto determinada por essa máquina, através de ações bilaterais de calor, umidade, substâncias químicas e pressão, gerando um material final similar a um tecido, porém sem tramas entre as fibras, e.g. feltros e mantas. Segundo Agarwal^[14] em todos estes processos as fibras descontínuas alocam-se em paralelo ao plano da superfície do molde, de forma aleatória, logo compósitos com reforço de fibras descontínuas podem ser isotrópicos. As fibras descontínuas também podem ser combinadas com resinas, como reforço de um compósito de produção em moldes. Na produção de compósitos, quando da compressão no molde ou extrusão, pode-se induzir a orientação dessas fibras em paralelo ao fluxo de material durante o processo em questão, obtendo-se assim um sistema compósito com orientação preferencial, não isotrópicos. Suas propriedades dependem dentre outros do grau de orientação preferencial atingido durante o processo de manufatura.

Em relação à orientação mencionada, há duas possibilidades extremas, que pode se dar com um alinhamento das fibras em paralelo e na direção do eixo longitudinal das mesmas, ou um alinhamento totalmente aleatório, também chamado de randômico. A Figura 2.3 mostra as duas possibilidades de arranjos para fibras descontínuas, onde tem-se em (a) o alinhamento paralelo das fibras na direção do eixo das mesmas e (b) o alinhamento totalmente aleatório^[13].

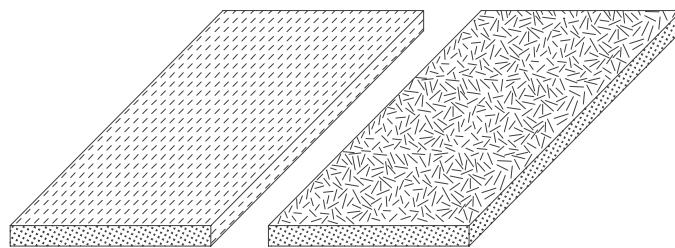


Figura 2.3 – Fibras descontínuas. (a) fibras alinhadas e (b) o alinhamento aleatório^[13].

2.1.3.3 – Compósitos com Fibras Descontínuas e Alinhadas

Mesmo sendo a eficiência do reforço, como mencionado anteriormente, menor para as fibras descontínuas em relação às contínuas, os compósitos com fibras descontínuas e alinhadas estão se tornando cada vez mais importantes no mercado comercial. Como por exemplo, no caso do uso de fibras de vidro picadas, bem como de carbono e aramida, onde este tipo de compósito é

produzido com módulo de elasticidade e resistência à tração que se aproxima de 50% a 90% dos seus análogos com fibras contínuas ^[13].

Levando-se em conta o comprimento crítico, já mencionado, e uma distribuição uniforme das fibras onde o comprimento médio destas é maior que o crítico, para um compósito com fibras descontínuas e alinhadas a resistência longitudinal pode ser obtida a partir da relação matemática similar a Equação 2.1. Entretanto, as fibras descontínuas e alinhadas são normalmente induzidas em compósitos de fibras sintéticas, como as fibras vegetais são comumente orientadas de forma aleatória por motivos óbvios.

2.1.3.4 – Compósitos com Fibras Descontínuas e Aleatoriamente Orientadas

Para o caso de fibras descontínuas aleatoriamente orientadas como reforço de compósitos, normal às fibras vegetais por sua produção simples, obtém-se o módulo de elasticidade do material final através de uma expressão de “regra de misturas”, da seguinte forma ^[13]:

$$E_{cd} = (K \times E_f \times V_f) + (E_m \times V_m) \quad (2.2)$$

onde:

E_{cd} = módulo de elasticidade do material compósito;

K = parâmetro de eficiência da fibra (que depende de V_f e da razão E_f / E_m);

E_f = módulo de elasticidade da fibra;

E_m = fração volumétrica da matriz;

V_f = fração volumétrica de fibras; e,

V_m = fração volumétrica da matriz.

Note-se a variável K , que representa um parâmetro de eficiência da fibra, sua magnitude é sempre menor que a unidade – geralmente no intervalo entre 0,1 e 0,6 – e, para um reforço com fibras aleatórias o módulo aumenta de acordo com uma proporção específica da fração volumétrica das fibras, exatamente como ocorre para as fibras orientadas.

Logo, pode-se concluir que em relação à orientação e ao comprimento da fibra para um compósito para uma específica aplicação, deverá considerar o nível e a natureza da tensão a qual este material estará sujeito e, não menos importante, os custos de processamento. No caso de

aplicações nas quais as tensões são aplicadas de forma multidirecional deve-se optar por um compósito com fibras descontínuas e aleatoriamente orientadas, pois estes possuem características mecânicas isotrópicas ^[13].

2.2 – Os Materiais Compósitos com Fibras Vegetais

Ultimamente ouve-se muito falar em “produtos verdes”, que são os que de alguma forma levam em conta uma ou mais atitudes ecologicamente corretas, quer no processamento, na economia de materiais ou na reciclagem, entre uma infinidade de modos alternativos de contribuir para a preservação da natureza. Já é muito comum, inclusive, o uso do termo *compósito verde*, no qual pelo menos um dos materiais constituintes é um material natural. Em outros casos podem-se obter materiais compósitos constituídos totalmente de materiais *verdes*, o que contribui ainda mais para a não agressão do meio ambiente quando do término da vida útil destes materiais. Há também a possibilidade de se obter materiais verdes a partir de matérias-primas oriundas da reciclagem. Enfim, a cada passo que a humanidade der em direção à evolução, a responsabilidade ambiental deverá estar atrelada, através de novas alternativas de preservação ambiental, inclusive no que diz respeito à engenharia a qual caberá a produção de novos materiais.

Na indústria automotiva, por exemplo, as matérias-primas naturais depois de serem substituídas por seus sintéticos correlatos nas décadas de 60 e 70 estão reconquistando espaço, especialmente pelo surgimento da conscientização a respeito dos materiais renováveis durante a década de 90.

Como já foi mencionado anteriormente, as fibras naturais vegetais podem ser consideradas um compósito fibroso natural, constituído de fibras de celulose – polímero natural, $C_6H_{10}O_5$ – alinhadas em paralelo em relação aos seus eixos, dispersas em lignina – resina polimérica natural –, entre outros materiais constituintes variáveis que diferenciam as espécies vegetais. A celulose, que é a principal substância de todos os vegetais, é composta por meros de anidro-glicose formando uma longa cadeia, possuindo de 3000 a 4000 unidades de glicose com estrutura do mero mostrada na Figura 2.4 ^[12].

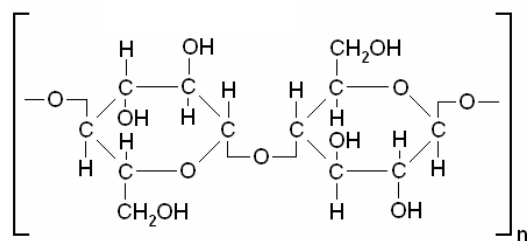


Figura 2.4 – Estrutura do mero da celulose ^[12].

Como se pode observar na Figura 2.4 tem-se três grupos de hidroxilas em cada unidade de glicose. Em cada uma destas há duas ligações intermoleculares por ponte de hidrogênio e o terceiro grupo hidroxila possui uma ligação covalente com uma unidade de glicose, fazendo com que a estrutura por pontes de hidrogênio e o peso molecular do mero em questão promova forças intermoleculares significativas entre as cadeias. Isto por sua vez gera altas rigidez e cristalinidade no polímero, prevenindo a fusão e dissolução abaixo de sua temperatura de decomposição ^[12].

Faz-se pertinente um breve comentário, de forma genérica, sobre a estrutura da madeira, que muito se assemelha a todos os tipos de fibras vegetais. A madeira tem como principais componentes químicos substâncias polares, como celulose, de 45 a 50%; hemicelulose (polioses), de 20 a 25%; e lignina, de 20 a 30%; e pequenas quantidades de outros carboidratos como pentosanas, resinas, gomas e substâncias minerais chamadas extrativos. Estruturalmente a celulose é um polímero linear de unidades de glicose variando no comprimento de 2.500 a 5.000 nm, o que corresponde a um grau de polimerização acima de 15.000. A Figura 2.5 mostra a estrutura simplificada das células da madeira, que são as fibras que constituem o material ^[12].

As letras de A, B e C da Figura 2.5, indicam o seguinte: (A) parede celular composta por celulose, hemicelulose e lignina. Moléculas de celulose arranjadas em paralelo e agrupadas, chamadas de *microfibrilas*, que podem conter de 50 a 80 moléculas de celulose alinhadas com o eixo da *microfibrila*; (B) Cavidade, chamada de lume, ao redor do qual há várias camadas de *microfibrilas* espiraladas em vários ângulos; (C) Lamelas intermediárias, constituídas – entre outros – principalmente de lignina, unindo a células ou fibras da madeira.

O esquema da Figura 2.5 mostra a estrutura das fibras vegetais, onde cada fibra – denominada fibra técnica – é constituída de várias fibras elementares fortemente ligadas entre si por um material de cimentação constituído na sua maioria de lignina, unindo as microfibrilas e a hemicelulose ^[17]. Pode-se dizer também que as outras fibras naturais possuem estrutura muito similar à apresentada acima. O presente trabalho trata da fibra oriunda da semente de açaí, uma

fibra natural de origem vegetal. Para estas fibras também se utiliza o termo fibras lignocelulósicas, adotado por muitos autores. Aliás, tal termo expressa melhor a natureza do material em questão. A estrutura das fibras lignocelulósicas será discutida mais adiante neste trabalho, quando da caracterização morfológica da fibra da semente do açaí.

As fibras lignocelulósicas oferecem as seguintes vantagens em relação às fibras sintéticas: fonte natural abundante e renovável, baixo custo e baixa densidade, ótimas propriedades específicas tais como resistência e módulo de elasticidade, menor abrasividade – comparando-se às fibras de vidro são não-tóxicas e biodegradáveis. Dentre as desvantagens pode-se citar a falta de uniformidade das propriedades – que são em função da origem das fibras, como condições regionais onde a planta de extração for cultivada, habilidade manual ou processo mecânico da extração e a absorção de umidade, entre outros^[17].

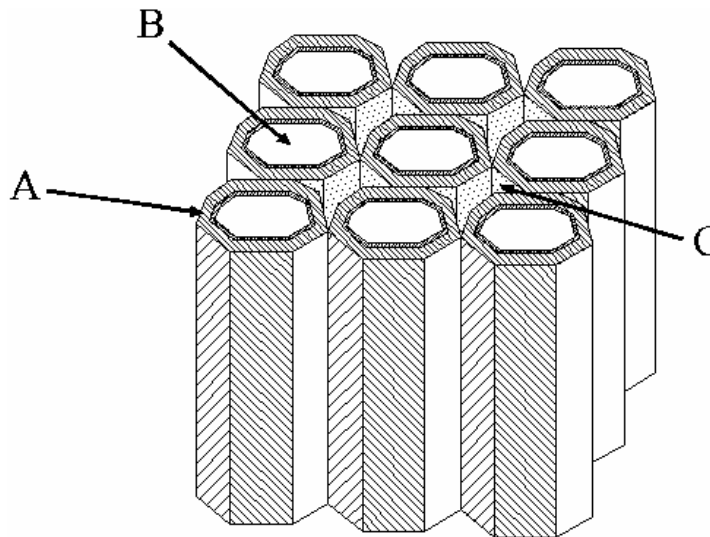


Figura 2.5 – Estrutura das células (microfibrilas) da madeira simplificada^[12].

Segundo Morassi apud Silva^[17] as fibras lignocelulósicas podem ser classificadas segundo a sua origem, como fibras de sementes (e.g. algodão), fibras de caule (e.g. juta, linho, cânhamo), fibras de folhas (bananeira, sisal, piaçava, curauá, abacá, henequém), fibras de fruto (e.g. coco) e fibras de raiz (e.g. zacatão, mandioca). O organograma da Figura 2.6, adaptado de Schuh^[1], mostra as principais categorias de fibras lignocelulósicas de boa disponibilidade e relativo baixo custo.

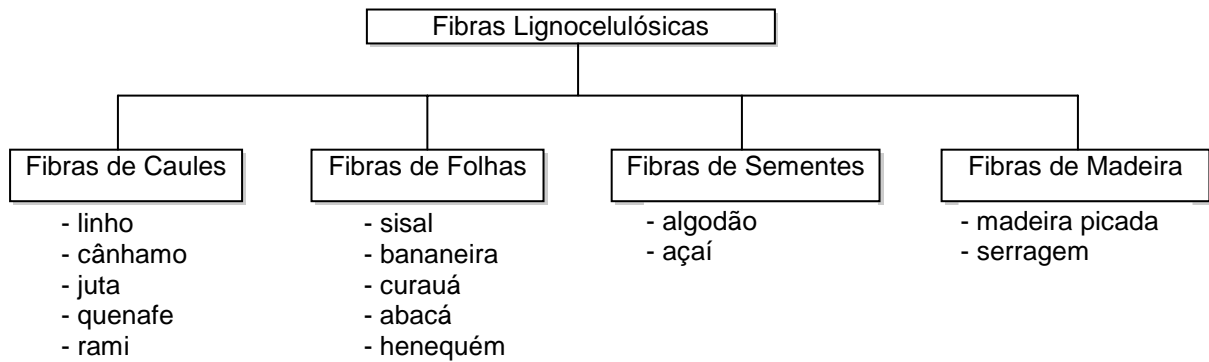


Figura 2.6 – Classificação das fibras lignocelulósicas, adaptada de Schuh^[1].

2.2.1 – Fibras Vegetais como Material de Reforço

As fibras lignocelulósicas como matérias-primas para reforço, usadas em materiais compósitos podem ser agrupadas em dois grandes grupos. No primeiro, encontram-se resíduos agrícolas (e.g. cascas de arroz, palhas de cereais, cascas de coco, entre outros subprodutos de alimentação ou da indústria alimentícia), que podem servir de reforço em compósitos para aplicações como materiais estruturais, para vários fins – em especial, dentro da própria indústria, como no caso do bagaço da cana-de-açúcar como material combustível para o refino do açúcar e instalações para acomodação rural. Se esses materiais lignocelulósicos forem considerados pelo homem resíduos sólidos, podem ser desidratados naturalmente ou queimados para redução de massa e ter sua deposição final, de acordo com a legislação ambiental contextual. O segundo grupo amplo é constituído de lignocelulósicos cultivados para extração de fibras – como o linho (*Linum usitatissimum*), sisal (*Agave sisalana*), cânhamo (*Cannabis indica*), juta (*Corchorus capsularis*), rami (*Boehmeria nivea*) e inúmeros outros –, e que também geram resíduos no beneficiamento podem também ser usados em compósitos ou como combustível ^[18].

De fato, há séculos a humanidade vem usando fibras naturais em várias aplicações, inclusive em materiais de engenharia. Vários países exploraram as possibilidades de fibras naturais a partir de várias plantas, todavia a maioria dos materiais ainda é em forma de chapas (*hard board* e *particle board*). O surgimento dos polímeros no início do século XX proveu à Inovação Tecnológica novas, dimensões para o uso de fibras vegetais nos mais diversos campos. Devido ao baixo peso, alta resistência específica (alta relação resistência/peso), resistência à

corrosão, entre outros, os compósitos com fibras lignocelulósicas estão se tornando cada vez mais importantes nos campos de materiais de engenharia e da construção civil. Além disso, sempre é válido lembrar o caráter ambiental na comparação das fibras naturais em relação às sintéticas quando do término de suas vidas úteis como materiais ^[19].

Na Europa a fibra mais importante comercialmente ainda é o linho, em função da grande quantidade disponível oriunda do subproduto da indústria têxtil, principalmente por causa do seu baixo preço. De fato, o uso destas fibras está se difundindo sendo que as mesmas já estão sendo obtidas a partir de plantas cultivadas especificamente para atender aplicações industriais ^[1].

No o cenário indiano, Rai & Jha ^[19] destacam que aplicações de fibras lignocelulósicas em matrizes para compósitos, e.g. cimento e polímeros, estão chamando mais atenção para vários materiais finais de baixo custo e que as fibras vegetais têm disponibilidade em abundância e são provenientes de recursos naturais. Em seu trabalho os autores citam uma produção total de fibras anual média de mais de 400 milhões de toneladas na Índia, para materiais artesanais em geral e para aplicações em materiais de engenharia. As produções aproximadas de vários tipos de fibras, no país supra, estão em conformidade com a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Avaliabilidade de Algumas Fibras Naturais na Índia e suas Aplicações.

Fibra	Origem	Produção (Milhões de toneladas/ano)	Aplicações em materiais
Casca de arroz	Indústria de arroz	20	Como combustível, para a manufatura de materiais e produtos da produção de aluminador (matriz) de casca de arroz, painéis de fibras, tijolos, cimento antiácido (como pozolana)
Folha e caule de banana	Bananeiras	0,2	Na manufatura de chapas compensadas, chapas de fibras resistentes ao fogo
Casca de coco	Indústria de <i>coir</i> (fibra de coco)	1,6	Na manufatura de chapas compensadas, chapas insuladas, painéis estruturais, telhas, como agregado leve, compósitos de <i>coir</i> , chapas cimentícias, geo-têxteis, <i>coir</i> emborrachado
Juta	Indústria de juta	1,44	Para painéis <i>OSB</i> , telhas, fechamentos de portas
Palhas de cereais	Fazendas agroindustriais	12	Manufatura de coberturas e painéis de painéis <i>dry-wall</i>
Fibra de sisal	Plantações de sisal	0,023 (Ásia)	Reboco de paredes e para telhas, chapas compósitas com casca de arroz, manufatura de papel e polpa celulósica

Fibra	Origem	Produção (Milhões de toneladas/ano)	Aplicações em materiais
Caule de algodoeiro (<i>Gossypium hirsutum</i>)	Plantação de algodão	1,1	Chapas de fibras, painéis, fechamentos de portas, telhas, compósitos de cimento autoclavados, papéis, reboco de paredes

Fonte: Adaptado de Rai & Jha^[19].

A produção mundial de fibras de plantas estimada em 2004 foi de aproximadamente 3,1 milhões de toneladas, na qual a participação das fibras de algodão é em torno de 1,75 milhões de toneladas e fibras do caule do algodoeiro 1.300 milhões. Mesmo sendo estes insumos pertinentes, na sua imensa maioria, à indústria têxtil, a produção que sobra das demais fibras é consideravelmente elevada, levando-se ainda em conta a sua baixa densidade. Quanto à produção restante, as outras fibras que lideram o mercado interno são as de linho (*Linum usitatissimum*), abacá (*Musa textilis*), sisal (*Agave sisalana*), coco (*Cocos nucifera*) e juta (*Corchorus capsularis*). Todavia as palhas provenientes da indústria de cereais são ímpares no quesito custo, dentre todas as fibras vegetais.

A USDA – *United States Department of Agriculture* conduz pesquisas sobre compósitos baseados em fibras lignocelulósicas. Seu Laboratório de Produtos identificou que a maioria dos tipos concebíveis de fibras provenientes da agroindústria podem ser consideradas como algum tipo de material de engenharia dos mais utilizados em todo o mundo na atualidade. Os países norte-americanos consomem cerca de 700 mil metros cúbicos anuais de agro-fibras na manufatura de chapas de madeira compensada, chapas aglomeradas e chapas MDF (*Medium Density Fiberboard*). Não só na América do Norte, mas em todo o mundo há o progresso de trabalhos de pesquisa para o desenvolvimento de tecnologias apropriadas para compósitos reforçados com fibras naturais^[19].

Rowell et al.^[18] citam que todo material lignocelulósico oriundo de resíduos agrícolas pode ser considerado material em potencial para a manufatura de painéis laminares, porém para o uso de alguns tipos de fibras há algumas restrições, no que diz respeito à qualidade e à economia. Pode-se observar em relação o uso desses materiais, que algumas dessas fibras possuem vasta disponibilidade, cultivo multi-regional, ótimo valor de comércio e outros fatores oportunos específicos, para que sejam consideradas ocasionalmente comercializáveis.

Talvez a qualidade mais importante das fibras naturais seja, além do seu bom desempenho

como material, possuir ainda o caráter sócio-ambiental. Por exemplo, o caso do material de fibras de coco em matriz látex do Projeto Poema nos automóveis Mercedes Classe A. Além do conforto há o aumento do espaço interno do veículo, devido à espessura final do assento com a espuma compósita natural em relação à do assento de espuma de poliuretano. Engenheiros utilizam as fibras naturais na indústria automotiva em vários componentes internos, e.g. painéis, forros de portas, pára-choques. Dentre estas se encontram o rami, o sisal, o linho, a juta, o cânhamo, a de bananeira, de abacaxi e de coco. Por exemplo, o Mercedes Classe E, comercializado na Europa, possui pelo menos 10 itens internos baseados nessa tecnologia. Em consequência do material, a utilização de tecnologias de fibras vegetais em automóveis diminuem o consumo das reservas de petróleo e facilita a reciclagem dos materiais ou decomposição dos resíduos quando da deposição final do carro descartado, na proporção destes materiais de reforço no compósito em relação à matriz. A única desvantagem é o alto preço, devido o beneficiamento de fibras vegetais ser ainda uma atividade artesanal. O produto da fibra de coco, por exemplo, ainda é de 10% a 15% mais caro que o similar de espuma, mas a tendência é a redução deste custo, através do incentivo fiscal, por exemplo, devido ao caráter social que tal extração pode propiciar através da geração de rendas para a imensa demanda de mão-de-obra de países subdesenvolvidos [1, 2, 3, 18, 19, 20, 21 22, 23, 24].

A seguir, tratar-se-á sucintamente sobre as fibras de quenafe, juta, bambu, coco e sisal, por se entender que são algumas das fibras mundiais com potenciais de aplicações mais discutidos e passíveis de plantio produtivo no Brasil, de características dentro de um grupo de aplicações comuns, nas quais se enquadra a fibra proposta por esta pesquisa, discutida ao final dos comentários a seguir.

2.2.2 – Principais Tipos de Fibras Lignocelulósicas e suas Propriedades

2.2.2.1 – Fibras de Quenafe (*Papoula-do-são-francisco*)

O quenafe (*Hibiscus cannabinus*), conhecido internacionalmente como *kenaf* e no Brasil como papoula-do-são-francisco ou cânhamo brasileiro, é similar à juta e aos cânhamos tradicionais – asiático (*Cannabis indica*) e afro-americano (*Cannabis sativa*). É da mesma família

que estes últimos, porém sem o efeito narcótico da parte não-fibrosa e apresentam também suas fibras no entorno de seus galhos. Suas fibras representam de 20 a 25% do peso de material seco da planta, cresce sem maiores problemas em climas quentes, podendo chegar à 5 metros de altura. O quenafe é nativo da Pérsia, introduzido na Indochina, naturalizou-se na África e Ásia e é geralmente cultivado na Índia, de onde partiu para as Américas do Norte e do Sul. Sua distribuição se compreende entre 45° Norte e 30° Sul de longitude ^[17, 19, 20].

Segundo a AARC – *Alternative Agricultural Research & Comm. Center* apud Rowell et al.^[18], o uso do quenafe está gerando muito interesse por parte do governo e da indústria norte-americana. O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) está incentivando o plantio do quenafe e outros agro-produtos não-comestíveis, por não requererem subsídios. Foi criada a Associação Internacional do *Kenaf* para incentivar a promoção e estudo do quenafe, bem como, segundo o USDA apud Rowell et al.^[18], o quenafe fora citado em 241 publicações científicas até 1997.

A papoula-do-são-francisco é tradicionalmente cultivada para cordoaria na África e na Ásia, mas também obtém-se polpa celulósica, para papel comum e estruturado (papela), em países como China, Índia e Tailândia. A percepção do potencial do hibisco como recurso renovável para a indústria papelaria nos Estados Unidos e em outros países se deu na década de 60. A partir da década de 90, no sul do Texas pequenas plantas industriais de papel para jornal a partir da celulose do hibisco alcançaram notoriedade na América do Norte. No presente, fibras de hibisco encontram-se mundialmente no mercado como misturas ricas para solos, forragem para alojamentos de animais, óleo-absorventes, mantas geotêxteis, tramas têxteis para artesanato, indústrias celulósica e têxtil, estando presentes também em pesquisas para uso industrial, com potencial para compósitos resinados, que resultou em uma conseqüente indústria de sementes no sul do Texas para atender a demanda americana e além-mar. Spehar apud Pimentel^[21], observou que o quenafe produz uma fibra ideal para compósitos na indústria automobilística. Devido a sua similaridade com o cânhamo, adiciona-se às suas possibilidades a potencialidade de utilização destas em compósitos fibrocimentícios ^[19, 21, 25].

2.2.2.2 – Fibras de Juta

A juta (*Corchorus capsularis*) é uma herbácea da qual se obtém outra qualidade de fibra têxtil vegetal. Erva lenhosa que pode alcançar uma altura de 3 a 4 metros com caule de aproximadamente 20 milímetros. Cresce, em larga escala, principalmente na Índia e em Bangladesh (antigo Paquistão Oriental), com safra de dois a três meses onde se tem o crescimento de 3 a 5 metros de caule a cada ciclo. Exige um solo fértil e bem drenado e um clima quente e úmido. As altas temperaturas das regiões nas quais a juta é cultivada favorecem a fermentação e desta forma consegue-se a maceração em 8 a 10 dias, facilitando a separação da fibra da parte lenhosa do caule. Introduzida no Brasil por Riyota Oyama, a cultura foi difundida por imigrantes japoneses e hoje é uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da região amazônica, sendo um fator fundamental da permanência de mais de 50 mil famílias no campo ^[24].

As fibras de juta são extraídas em um processo denominado *retting*, que é realizado com a colocação de galhos/arbustos em um tanque por várias semanas, onde há uma ação por micróbios que amolece os galhos e enfraquece as ligações entre fibras e a matriz natural que as une. Em seguida as fibras são retiradas manualmente e colocadas para secar. Longas fibras podem ser obtidas dessa forma e comumente são tratadas com vários óleos ou agentes condicionadores para favorecer a flexibilidade ^[18].

Compósitos baseados nessas fibras exploram o longo comprimento das mesmas. Industrialmente, tanto fibras têxteis tramadas e não-tramadas são impregnadas com resinas ou epóxi e moldadas com conformação complexa, e são usadas como camadas superficiais para materiais, na indústria automotiva inclusive. Compósitos com reforço híbrido de juta e coco provêm alternativas econômicas para a indústria de madeira compensada, envolvendo a produção painéis sanduíche de lâminas de fibras de juta orientadas, sobrepostas entre lâminas de resíduos da fibra de coco com látex. Vários desses compósitos são produzidos comercialmente na Índia pela *Natural Fibretech Pvt. Ltd.*, de Bangalore. O Instituto Nacional de Pesquisas e Aplicação Tecnológica de Fibras de Juta (NIRJAFT – *National Institute of Research on Jute and Applied Fibre Technology*), neste país, produz várias tecnologias que mantém a extensa comercialização de compósitos baseados nestas fibras ^[18, 19].

A fibra de juta é uma das fibras vegetais mais utilizadas como reforço de matrizes poliméricas. Inclusive na indústria automotiva brasileira – juntamente com outras fibras, e.g. algodão, rami e coco – tem sua utilização em compósitos para revestimentos internos, painéis,

teto e portas à base de resina fenólica (novolaca) reforçada com tecidos híbridos de juta e algodão utilizando técnica de moldagem por compressão [22].

2.2.2.3 – Fibras de Bambu

Na sub-família *Bambusoideae*, da família *Gramineae*, há duas qualidades de gênero, a *Bambuseae* (bambus lenhosos) e a *Olyrae* (bambus herbáceos). As referências científicas variam em demasia e novas espécies e variedades são acrescentadas ano a ano, entretanto estima-se que existam cerca de 1.250 espécies no mundo, espalhadas entre pelo menos 90 gêneros, presentes de forma nativa em todos os continentes menos na Europa. São de cultivo em uma variedade de condições climáticas (zonas tropicais e temperadas) e topográficas (até 4.000 metros do nível do mar). Os caules lenhificados do bambu comum (*Bambusa vulgaris*) são utilizados na fabricação de diversos objetos, e.g. cestos, móveis artesanais, instrumentos musicais, edificação artesanal e da construção civil [24].

O bambu é um material de engenharia muito conhecido nos trópicos, particularmente nas regiões de culturas ricas desta espécie. É a planta de mais rápido crescimento e possui ainda excelentes propriedades físicas e mecânicas. Seu módulo de elasticidade em relação ao peso é mais elevado que o da fibra de aço. É uma fibra de grande domínio na utilização em materiais compósitos [19, 24].

O IPIRTI – *Indian Plywood Industries Research & Training Institute* de Bangalore, em associação com o BMTPC – *Building Materials and Technology Promotion Council*, desenvolve tecnologias de manufatura de vários produtos comercializáveis, e.g. *bamboo mat board* (BMB), *bamboo mat veneer composites* (BMVC), *bamboo mat corrugated sheets* (BMCS). Tal ação de pesquisa em conjunto resultou no cultivo de uma nova espécie de planta comercial, em Meghalaya na Índia, para a fabricação de um excelente sistema de cobertura ecologicamente correto com capacidade de 3.000 telhas por mês [19]. No Brasil pesquisas desta área estão em andamento há alguns anos, como por exemplo, trabalhos desenvolvidos por Anjos [26] e Anjos et al. [27] para se obter um compósito cimentício reforçado com polpa celulósica de bambu, ou ainda no desenvolvimento de elementos estruturais utilizando-se bambu, do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, conduzido

pelo professor Khosrow Ghavami, com trabalho inclusive de concreto armado com bambu [26, 27, 28].

2.2.2.4 – Fibras de Coco ou *Coir*

A fibra de coco, mundialmente conhecida como *coir*, provém do coqueiro comum (*Cocos nucifera*). O cultivo de coqueiros é feito na Índia desde a antiguidade, onde tal palmeira é chamada de “Árvore do Bem-Estar” ou “Árvore do Céu”. Seu plantio é feito em larga escala desde 1840. Do coco a humanidade consome vários insumos importantes, como a água, o leite, o óleo e as fibras. O coqueiro se encontra em todos os países tropicais e em inúmeras variedades. Na Índia, Indonésia e Ceilão (Sri Lanka) dá-se mais a extração das fibras, enquanto que em outros países aproveita-se mais a parte comestível do coco, como em Porto Rico, no Marrocos, na China, nas Filipinas e inclusive no Brasil [24].

Dentre os maiores produtores mundiais de coco tem-se Filipinas, Indonésia, Índia, Ceilão e Tailândia. Nas américas o México, o Brasil e a Venezuela lideram a produção. Todavia a Índia é líder mundial na comercialização de fibra de coco, com 1,02 bilhão de toneladas de fibra produzidas anualmente, rendendo US\$ 70 milhões com a exportação. A produção ainda é incipiente no Brasil, onde se tem cerca de 40 milhões de toneladas de fibra produzidas por ano. Entretanto, atualmente os coqueiros vêm sendo cultivados em regiões sem tradição no país. No estado de São Paulo, toma espaço da laranja e do café nas regiões de São José do Rio Preto, Marília e Garça [24].

A fibra extraída do mesocarpo do coco, ou simplesmente *coir*, é considerada uma fibra longa, variando em comprimento entre 15 e 35 centímetros. Esta matéria-prima é oriunda da casca do coco maduro, que representa 80% do peso do fruto. Sua extração é mundialmente difundida. Há uma indústria muito grande de extração destas fibras na Ásia. Várias empresas especializadas comercializam estas fibras tramadas ou trançadas em cordas, processando produtos domésticos ou para exportação, que servem para aplicações na indústria de decoração e utensílios diversos. A Daimler-Chrysler do Brasil, em parceria com o Programa Pobreza e Meio Ambiente na Amazônia, fabrica os automóveis Mercedes Classe A com espumas de assentos de compósitos de fibra de coco em matriz de látex natural, gerando fonte de renda em um trabalho

social que engloba várias famílias, desde a extração até a produção [1, 2, 3, 4, 18].

Mais tradicionalmente as fibras são submetidas a processo semelhante à espadelagem do linho, obtendo-se dois grupos de fibras: longas, denominadas “*bristles*”, para a indústria de escovas; e fibras curtas, denominadas “*matress*”, usadas como material de enchimento e para almofadas. O material residual gerado durante este processamento têm o nome de “*combings*”, que são outro tipo de fibras curtas [19].

As fibras de coco têm sido usadas para produzir uma grande variedade de compósitos, incluindo aí laminares particulados e laminares fibrosos. Savastano Jr. apud Rowell et al. [18], desenvolveu várias pesquisas com compósitos de fibras lignocelulósicas para aplicações na construção civil, inclusive baseados em fibras de coco, e afirma que “quando usado como reforço em matrizes inorgânicas, as fibras são bastante resistentes à alcalinidade e variações de umidade quando comparadas a outras fibras lignocelulósicas”.

Algumas das propriedades mais comuns, que tornam esta fibra especial são: a alta elasticidade, maior que na maioria das outras fibras vegetais conhecidas; a alta resistência à umidade e às condições climáticas; e alta resistência ao desgaste. A partir do intenso uso desta fibra na Índia, maior abundância mundial de coco depois das Filipinas, suas características foram mais profundamente estudadas naquele país. E um dos fatos mais importantes, é o seu reconhecimento como uma fibra altamente durável em várias matrizes, e.g. polímeros, betume, cimento Portland, gesso, escória de alto-forno (EAF), barro, etc. [19, 24].

2.2.2.5 – Fibras de Sisal

O sisal (*Agave sisalana*) é cultivado em regiões semi-áridas. Em nosso país os principais produtores são os estados da Paraíba e da Bahia, com a utilização principalmente da fibra das folhas que, após o beneficiamento, é destinada majoritariamente à indústria de cordoaria (e.g. cordas, cordéis, tapetes). Dentre compósitos onde o sisal pode ser utilizado de maneira bastante satisfatória tem-se a substituição de algumas peças com diferentes aplicações na indústria automobilística. Revestimentos internos da cabina de caminhões (teto, parede traseira e portas), apoio de cabeça e encosto de assentos, pára-sol externo, painel de instrumentos, bolsa de ferramentas, encapsulamento de cabina/motor e pára-choque. Várias indústrias fornecedoras de

peças para as montadoras de automóveis, ônibus e caminhões já vêm utilizando estas fibras vegetais em suas formulações ^[24].

O Instituto Central de Pesquisas de Construção (*Central Building Research Institute*) de Roorkee e o Laboratório Regional de Pesquisas de Bhopal, na Índia, experimentaram diversas técnicas de tratamento superficial das fibras de sisal para uso em telhas de cobertura. O sisal é uma das fibras vegetais mais extensamente utilizadas no mundo, sendo responsável por metade da produção total de fibras têxteis extraídas de folhas.

Joseph et al. ^[29] reportaram que já foram produzidos vários trabalhos científicos sobre os aspectos estruturais e propriedades das fibras de sisal que atestaram que estas fibras podem ser utilizadas em compósitos, e.g. na manufatura de chapas planas e corrugadas que, além de resistentes e baratas são resistentes à chama. Emergem estudos visando melhoramentos no rendimento e qualidade das fibras produzidas, bem como tratamentos superficiais para melhor adequá-las a determinadas aplicações.

Há também várias pesquisas que reportam a incorporação de fibras de sisal a vários polímeros, dentre as quais destacam-se pesquisas sobre: as propriedades mecânicas, reológicas, elétricas e viscoelásticas de compósitos de polietileno de baixa densidade reforçados por fibras curtas de sisal em função do processamento utilizado, teor, orientação e comprimento das fibras; sobre a influência da adição de fibras curtas de vidro nas propriedades mecânicas de compósitos de polietileno de baixa densidade reforçado por sisal (onde 3% em volume de fibras de vidro levou a um aumento de mais de 80% na resistência longitudinal, para fibras orientadas, do compósito); sobre as propriedades mecânicas de compósitos baseados em polipropileno, preparados por extrusão reativa com anidrido maléico, reforçados por fibras de sisal; sobre o efeito do teor, comprimento, orientação e benzoetilação das fibras nas propriedades tênsis de compósitos PP/sisal; entre várias outras. Pesquisadores brasileiros, inclusive, atuam nesta linha de pesquisa em conjunto com os indianos ^[19, 29].

Entretanto, no Brasil, na pesquisa acadêmica o sisal tem sido estudado mais comumente como reforço de fibrocimentos. Mundialmente, estes compósitos cimentícios com reforço de fibras de sisal fazem parte de diversos trabalhos científicos. A USP – Universidade de São Paulo, através de pesquisadores da Escola Politécnica e da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, vem há alguns anos desenvolvendo várias pesquisas a respeito da manufatura, aplicação e desempenho de telhas de fibrocimento com sisal ^[30, 31, 32, 33]. Coutts & Warden ^[34], na

Austrália, atentaram para o fato de que apesar do estudo de sisal em cimento e argamassas ser bastante amplo, há poucas informações técnicas a respeito da utilização do reforço em forma de polpa, ou pasta, celulósica destes materiais, o que demonstra o quanto está se desenvolvendo o estudo desta fibra. Tolêdo Filho^[30] publicou trabalho significativo, numa pesquisa em conjunto de duas universidades do Rio de Janeiro com outras da Inglaterra e França, sobre a durabilidade de argamassas com fibras de sisal^[30, 31].

Savastano Jr.^[33] estudou a zona de transição entre fibras e pasta de cimento (cimento Portland e água), inter-relacionando as principais características com as propriedades mecânicas do compósito. Savastano Jr. & Devito^[32] desenvolveram pesquisas de moldagem de fibrocimentos de sisal por drenagem de pasta. Savastano Jr.^[33] coordenou a produção de 700 telhas fibrocimentícias com reforço de polpa de sisal, com apoio da Prefeitura Municipal de Descalvado, São Paulo, pela Escola de Engenharia de São Carlos da USP, para a cobertura de um protótipo residencial com cerca de 50 m².

Algumas propriedades físicas e mecânicas das fibras retromencionadas estão apresentadas em uma tabulação comparativa na Tabela 2.3. Todavia, é válido ressaltar que se nota diferenças consideráveis de valores obtidos por autores diferentes para as mesmas fibras (vide *coir* e sisal). Também se deve levar em conta os métodos diferentes utilizados para a obtenção destes dados, bem como as grandes discrepâncias de valores para fibras do mesmo vegetal intrínsecas aos materiais naturais.

Tabela 2.3 – Propriedades Físicas e Mecânicas de Algumas Fibras Vegetais.

Propriedades Físicas	Algumas Fibras Vegetais					Fonte	
	Quenafe	Juta	Bambu	Coir	Sisal	a	BIBLIOGRÁFICAS
Massa Específica	0,71 g/cm ³	1,00 g/cm ³	-	1,00 g/cm ³	1,17 g/cm ³		
	-	-	-	1,18 g/cm ³	1,37 g/cm ³	b	
	-	-	1,16 g/cm ³	1,18 g/cm ³	1,37 g/cm ³	c	
Absorção de Água	285%	281%	-	180%	200%	a	
	-	-	-	93,80%	110,00%	b	
	-	-	145%	93,80%	110,00%	c	
Tensão Máxima	76,04 MPa	60,14 MPa	-	50,89 MPa	58,16 MPa	a	
	-	-	-	118 MPa	378 MPa	b	
	-	-	575 MPa	118 MPa	458 MPa	c	
Deformação Máxima	6,70 mm	13,10 mm	-	17,60 mm	6,00 mm	a	
	-	-	-	51,40%	5,40%	b	
	-	-	3,20%	51,40%	4,30%	c	

Fontes: (a) Ramakrishna^[35]; (b) Arsène et al.^[36]; e (c) Savastano Jr.^[31].

2.3 – Fibrocimentos Baseados em Fibras Vegetais

2.3.1 – Fibrocimentos

Um tradicional dicionário ^[6] de língua portuguesa aponta o significado da palavra fibrocimento como sendo o mesmo que cimento-amianto – proibido em vários países – de tão popular e difundido que se tornou este compósito a partir do processo desenvolvido por Ludwig Hastchek em 1900 ^[37, 38]. Apenas para fins de introdução ao assunto pertinente do fibrocimento baseado em fibras vegetais, abordar-se-á a seguir somente as principais características do material fibrocimentício tradicional.

A indústria da construção civil emprega vários compósitos com matrizes frágeis. Os concretos, argamassas e pastas são derivados de aglomerantes minerais, que são frágeis, pois se rompem sem deformação plástica. Estes possuem considerável resistência à compressão, mas não suportam grandes solicitações de tração e cargas dinâmicas. Todavia tais matrizes são geralmente reforçadas, e.g. o concreto armado ilustrado na Figura 2.1. Os fibrocimentos são materiais desenvolvidos a partir da necessidade de industrialização de alguns materiais comuns de construções enxutas. Na busca da redução do tempo de obra, a construção civil desenvolveu materiais componentes, como painéis, telhas e divisórias. Tais elementos somaram-se às estruturas de concreto armado pré-moldado e introduziram o conceito de produção em série na construção civil. Estes novos componentes tendiam a ser esbeltos, como por exemplo, as telhas cerâmicas (telha colonial comum) que foram substituídas pelas telhas de chapa ondulada (de fibrocimento), onde para 1 m² de cobertura consome-se 33 telhas cerâmicas e uma única telha de fibrocimento tem 1,22 m² (dimensões comerciais médias - 2,44 m × 0,50 m).

Sabe-se que é possível se obter elementos de cimento Portland pós-reativos (aditivados), com resistência à compressão da ordem de 200 MPa. Entretanto, quando do comportamento na flexão, uma vez iniciado o processo de fissuração, esta se propaga de forma direcional e contínua, reduzindo a resistência abruptamente (tendendo à verticalidade no gráfico *tensão × deformação*) e levando ao colapso da estrutura. Fibras dispersas na matriz cimentícia reforçam a região adjacente à fissura, melhorando o desempenho do material na flexão ^[39].

A Figura 2.7 ilustra uma fissura em um fibrocimento, onde: o número (1) representa uma fibra rompida; (2) representa uma fibra arrancada; e, (3) representa uma fibra íntegra atravessando a fissura, o que indica que a mesma absorveu parcialmente a energia a qual o material foi submetida ^[39]. A Engenharia logo observou o desempenho das fibras como material e adquiriu os componentes de construção esbeltos, que requerem a consideração da massa específica, materializados nos compostos fibrocimentícios. Em 1900 Hatschek desenvolveu processo industrial homônimo (patenteado) para a produção de chapas de cimento-amianto, que é até hoje o método tecnológico mais aplicado comercialmente. Pouco depois, Norton, um engenheiro norte-americano, idealizou, a pedido de uma companhia de seguros, um processo por prensagem de pasta sobre chapa filtrante ^[38].

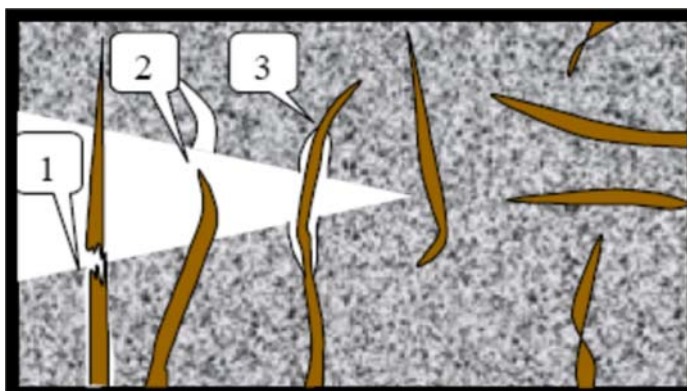


Figura 2.7 – Representação esquemática de uma fissura através de fibrocimento reforçado com fibras vegetais ^[39].

O fibrocimento industrializado tradicional tem como aglomerante o cimento Portland comum, aglomerante mineral, podendo ser usados ainda cimentos pozolânicos ou de escória de alto forno ^[38]. O processo Hatschek baseia-se no uso de misturas altamente fluidas, permitindo a distribuição ideal das fibras no interior da matriz, a qual após sua moldagem é feita drenagem para a retirada do excesso de água. Para o produto de fibrocimento comercial mais produzido, no caso as telhas, o processo básico de fabricação consiste das seguintes etapas: mistura e agitação do cimento e das fibras, empregando teor reduzido de sólidos (por volta de 30%); transferência da pasta de alta fluidez para uma correia através da rotação do primeiro cilindro da linha automatizada de produção – onde comumente se induz uma determinada orientação das fibras em função da rotação desse –; passagem por uma central de pressão reduzida (sistema composto por dois cilindros de compressão) na qual o excesso de água é retirado; prensagem sob cilindro que

funciona como calandra e é dotado de um sistema circulante de corte, estabelecendo a dimensão final da chapa plana e lisa mas ainda plástica e posterior projeção da forma ondulada na chapa. Outros produtos (e.g. tubos e caixas d'água) são geralmente obtidos por extrusão. O processo Hatscheck deu origem a algumas adaptações, como o processo semi-úmido desenvolvido por *Magnani* ou para produção de tubos de fibrocimento por *Mazza*, ambos italianos ^[38]. É também possível a obtenção de peças pequenas por processos que envolvam prensagem e filtragem ^[40, 41, 42]. A proporção reforço/matriz mais comum é de 1:6 a 1:10, o que corresponde em média algo em torno de 125 g de amianto para cada quilo de cimento Portland. Algumas de suas propriedades são ^[38]:

- massa específica real de 2,5 kg/dm³;
- massa específica aparente de 1,5 a 2,0 kg/dm³;
- resistência à compressão de 500 a 1000 kgf/cm²;
- resistência à tração direta de 100 a 200 kgf/cm²;
- resistência à flexão de 300 a 500 kgf/cm³;
- módulo de elasticidade à tração de 280.000 kgf/cm²;
- módulo de elasticidade à compressão 220.000 kgf/cm²;
- absorção de água de 4 a 6%; e
- condutibilidade térmica de 0,33 cal/hora/m²/m.

A espessura de telhas comerciais variam de 6 à 8 mm, a permeabilidade (líquidos e gases) é praticamente nula e as mesmas podem ainda ser pintadas ou aplicado corante na argamassa ^[38].

2.3.2 – Fibrocimentos Verdes

Na década de 70 iniciou-se o estudo sistemático de fibras vegetais em matrizes frágeis e em 1980 pesquisadores do Ceped (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento), em Camaçari na Bahia, relataram o primeiro estudo no Brasil ^[39].

O uso de fibras lignocelulósicas em matrizes frágeis à base de materiais cimentícios já foi considerado uma alternativa para a fabricação de telhas de fibrocimento, substituindo o amianto – material presente na extrema maioria dessas telhas comercializadas. Já há inclusive solicitação de patente para telhas de fibrocimento à base de fibras lignocelulósicas fabricadas pelo processo

Parry Associates, do Reino Unido, no trabalho da parceria entre a Prefeitura Municipal de Descalvado (SP) e a Escola de Engenharia de São Carlos da USP [33].

Coutts apud Savastano Jr.[31] relata que em países desenvolvidos a produção de fibrocimentos que utilizam fibras celulósicas como reforço tem sido consagrada em função de constantes aperfeiçoamentos de processos, desde a obtenção das matérias-primas, passando pelos processos produtivos e consumo racionalizado de energia, o que eleva o potencial comercial devido à redução do custo de investimento. Heinrichs et al. apud Savastano Jr.[33] levantaram dados em vários trabalhos para estimar valores referentes à produção mundial de placas de fibrocimento, mostrados na Tabela 2.4, onde grande parte da produção de fibrocimentos verdes estimada é oriunda dos EUA e Europa.

Observa-se que a produção de fibrocimentos baseados em fibras vegetais na América do Sul é incipiente. O presente trabalho pode se somar às pesquisas realizadas e às recentes, visando melhorar o desempenho do continente, em especial no nosso país, perante o quadro acima.

Tabela 2.4 – Produção de Compósitos Cimentícios (Fibrocimento).

Localidades	Produção de compósitos fibrocimentícios (milhões de m ² ao ano)			
	Com amianto	Sem amianto	Total	Fração sem amianto (%)
Ásia e Austrália	610	80	690	12
Europa	100	190	290	66
América Central e do Sul	140	50	190	26
América do Norte	0	100	100	100
África	20	10	30	33
Total	870	430	1.300	33

Fonte: Savastano Jr.[33].

É válido salientar que os processos convencionais como mistura em betoneira, moldagem e adensamento por vibração têm-se mostrados inadequados para a produção de fibrocimentos ecológicos. O desempenho aceitável das fibras lignocelulósicas nesses compósitos pode ocorrer se forem utilizados métodos de moldagem adequados. A alta absorção de água pelas fibras gera a necessidade de acréscimo na quantidade de água, a fim de melhorar a trabalhabilidade da argamassa a ser moldada, elevando o fator *a/c* (relação água/cimento), que por sua vez influencia negativamente nas propriedades físicas e mecânicas do conjunto. Isso ainda sem considerar a má

distribuição de concentração das fibras dispersas na matriz cimentícia, prejudicando sua função de reforço ^[39].

2.4 – O Açaizeiro, seus Produtos e a Fibra Oriunda da Semente

O número de espécies do gênero *Euterpe* não é claramente definido e tem sido objeto de constantes revisões ^[43]. De acordo com Mac Fadden ^[43] há 30 espécies do gênero *Euterpe* na América Central e do Sul. Este gênero de palmeiras (*Palmae*) é amplamente distribuído na América Central e do Sul, ocupando florestas de terras baixas e montanhas úmidas. As variações e respectivas denominações vulgares presentes no Brasil são: *Euterpe oleracea* Martius, açaizeiro; *Euterpe edulis* Martius, palmitreiro ou jussara; *Euterpe precatória* Martius, açai-do-Alto-Amazonas; *Euterpe catinga* Wallace, açai-mirim; e, *Euterpe longibracteata* Barbosa Rodrigues, açai-da-terra-firme ^[6, 43]. Schoeninger & Kirchner apud Mac Fadden^[43] citam 28 espécies que se distribuem ao longo das Antilhas e América do Sul, nas regiões com Florestas Tropicais.

Da *Euterpe oleracea* se obtém mais tradicionalmente, e inclusive em escala industrial, a polpa do fruto denominado açai, que por sua vez é uma palavra oriunda do vocábulo tupi *iwasa'i*, que significa: a planta que chora ^[6, 44]. Desta espécie se obtém polpa de melhor sabor e rendimento do que das demais palmeiras deste gênero. O presente trabalho trata desta variação, açaizeiro. Segundo Canto^[44] “o açaizeiro ocupa um largo espaço na vida amazônica, principalmente no estuário do rio Amazonas. É um alimento abundante, barato, de consumo diário e tradicional. Tornou-se um símbolo da cultura nortista e está presente no cotidiano tanto do ribeirinho como do cidadão, independente das posses. Esta influência é refletida na economia, nas paisagens, nos cartões postais, nos dizeres populares, nas manifestações artísticas, nas estratégias de ocupação do solo. O registro do início desta íntima relação está perdido no tempo. Mas há uma obviedade de ter sido um legado indígena”. A Figura 2.8 explicita a distribuição geográfica onde a espécie *Euterpe oleracea* ocorre espontaneamente no Brasil.

Segundo Nogueira et al. apud Canto^[44] o açaizeiro é uma espécie tropical, típica da Amazônia que ocorre espontaneamente nos estados do Pará, Amazonas, Maranhão e Amapá. Desenvolve-se bem em condições de clima quente e úmido e não suporta períodos de seca

prolongada. Nas regiões onde o açazeiro é nativo as chuvas são abundantes, atingindo 2.000 a 2.700 mm anuais e bem distribuídas durante o ano, e a umidade relativa do ar comumente ultrapassa 80%. A temperatura média gira em torno de 28°C. O açazeiro pode se desenvolver bem em regiões com temperaturas médias mensais acima de 18°C, já temperaturas inferiores podem causar atrasos no desenvolvimento das plantas.

O palmito retirado do açazeiro foi a principal fonte de renda dos ribeirinhos do baixo Amazonas e de outros estados brasileiros produtores até a década de 1980. O manejo adequado para a exploração do palmito e incentivo para novos plantios, tornaram a exploração comercial de frutos para extração de polpa prioritária, pois estudos mostraram que a exploração predatória e sem um manejo adequado de corte provocam danos no desenvolvimento das plantas e na sua frutificação. A retirada de cada palmito significa o corte de uma planta, que se dá em touceiras de 3 a 25 estipes. Estima-se uma produção de 10 a 12 toneladas de frutos por hectare com densidade de 400 plantas. São necessários cerca de 2,5 quilos de frutos maduros para a produção de um litro de suco de açaí, em média. Atualmente, encontra-se facilmente a polpa congelada nas grandes cidades brasileiras ^[45]. Segundo Canto^[44], em função da informalidade, a quantidade exata comercializada é controversa. Para Mourão apud Canto^[44] a produção pouco se elevou do ano de 1976 a 1992. Rogez apud Canto^[44] estimou uma produção na ordem de 480.000 t para o ano de 1992. O IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) oficializa que a comercialização no Brasil atingiu 123.832 toneladas em 1995, quase 95% no Pará. Já a prefeitura Municipal de Belém estimou, para 2001, o consumo diário na capital paraense em torno de 100.000 litros de suco, ou 220 toneladas de fruto maduro, correspondendo a um consumo per capita de 10,411 kg/ano, ou 28,523 g/capta. No Pará o consumo diário é de 76 g/capta, ou 27,74 kg/capta/ano ^[44].



Figura 2.8 – Ocorrência geográfica espontânea da espécie *Euterpe oleracea* no Brasil ^[44].

A pesar de o açazeiro também ser encontrado em outros estados, o Pará é o maior produtor nacional, seguramente com mais de 90% do que é consumido no país. A capital paraense é o local que mais consome açaí no Brasil, possuindo cerca de 3 mil pontos-de-venda onde o suco é comercializado. São produzidos em torno de 440 mil litros por dia, processados com frutos provenientes das ilhas ao redor da cidade, como por exemplo, Ilha do Combu, evidenciada na Figura 2.9, e na região metropolitana. O açazeiro está presente também na região urbana da capital do Pará, como mostra a Figura 2.10 em (A) a presença do açazeiro em zona residencial, (B) em uma praça da cidade, (C) em zona periférica e (D) no quintal de uma residência; que traz ainda a anatomia básica da *Euterpe oleracea*, esquematizados na montagem feita a partir de Canto^[44].



Figura 2.9 - Ilha do Combu, foto aérea (A) e de moradia ribeirinha típica (B) ^[44].

Na madrugada de todos os dias canoas atracam no cais do mercado Ver-o-Peso – tradicional e conhecido ponto turístico de Belém – e desembarcam seus paneiros (cestas artesanais de fibras vegetais), fomentando um comércio livre há dezenas de anos. A Feira do Açaí, localizada no complexo do Ver-o-Peso, é o principal centro de comercialização do produto e responde por mais de 70% do comércio na cidade, onde em 2005 passou 31,1 mil toneladas do fruto ^[45]. A Figura 2.11 documenta a chegada do açaí nas primeiras horas do dia no Ver-o-Peso, a comercialização do fruto e a venda para consumo em bancas de refeições locais.

Nos últimos anos o suco de açaí passou a ser apreciado também em outras regiões brasileiras, especialmente no sudeste, para onde se encontra em forma de polpa congelada. Em São Paulo o consumo atinge cerca de 150 toneladas por mês e no Rio de Janeiro em torno de 500

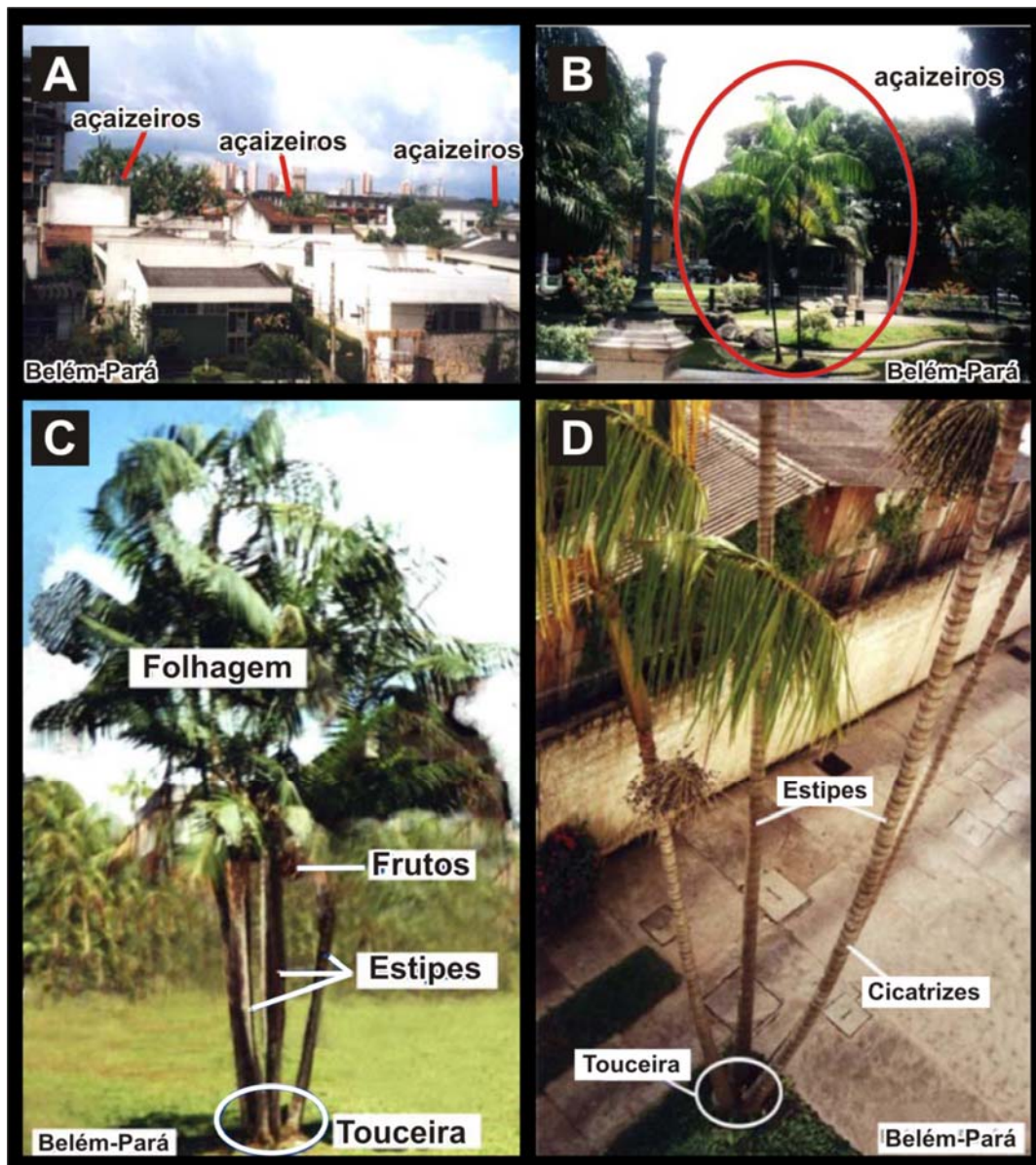


Figura 2.10 – Ocorrência do açaizeiro em Belém e anatomia básica da planta ^[44].

toneladas mensais são consumidas. Segundo Alfredo Homma, pesquisador da Embrapa Amazônia Oriental, não se trata de modismo. "O açaí vai ocupar um nicho de mercado no contexto nacional e internacional" fora uma afirmação do pesquisador, embasada no sucesso da nova bebida ao de outra fruta da Amazônia, o guaraná, lançado como refrigerante em 1907, em Manaus, e que se tornou depois uma bebida internacional^[46]. De fato, cápsulas com complexos vitamínicos baseados no fruto do açaizeiro já são amplamente comercializadas na Internet. Na Amazônia o açaí é um alimento diário presente em qualquer refeição, já no restante do país a

maior parte dos consumidores busca um complemento alimentar rico em vitaminas e minerais, de alto valor calórico. O fruto possui cerca de 13% de proteína, superando o leite (3,5%) e até o ovo (12,49%). Também é rico em potássio, cálcio, ferro e vitamina E [46].



Figura 2.11 – Seqüência fotográfica da Feira do Açaí no complexo do mercado Ver-o-Peso em Belém [24, 45].

Aproveita-se quase tudo do açaizeiro. Dos frutos maduros é extraída a polpa que é consumida na forma de sucos, creme, licor, geléia, mingau, sorvetes e doces. O palmito é de excelente qualidade culinária. O estipe é usado para assoalho, forro em barracões, lenha, construção de cercas, pontes e currais. As folhas verdes servem de alimento para animais e secas para artesanato de utensílios domésticos. A planta pode ser usada no paisagismo, devido sua bela arquitetura. Há considerável demanda mercadológica de seus produtos. Um quilo de sementes sem as fibras comercializadas para artesanato, em média 500 unidades, vale cerca de R\$ 1,00. Os frutos colhidos para a despolpa valem em média R\$ 0,30 o quilo. A polpa congelada custa para a indústria entre R\$ 1,50 e R\$ 2,00 o quilo e no varejo chega a R\$ 8,00 em 10 embalagens de 100 gramas. Cultivada com técnica apropriada, em adensamentos de matas ciliares e capoeirões naturais, vistos como áreas de preservação ambiental, seu manejo traz lucros garantidos ao investidor, suporte alimentar para o homem e animais silvestres, proteção ambiental e muita beleza paisagística. Um colhedor de frutos pode juntar até 300 quilos por dia, com rendimento de R\$ 90,00 diários [46, 47]. Em Janeiro de 2007, em Belém, o açaí processado em gradação tradicional (com as qualidades denominadas popular, médio, grosso e papa) variava de R\$ 3,00 a R\$ 9,00 o litro.

No campo científico o açaí está presente em promissoras pesquisas. A descoberta de um tratamento dentário que tem como identificador visual de placas pigmentos baseados no açaí

mereceu rápido reconhecimento, destaque em congressos e até prêmios, culminando com o patenteamento, pela UFPA e pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), de um produto denominado "composição evidenciadora de placa dental com corantes naturais". Pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP), em Ribeirão Preto, experimentaram exames de ressonância magnética do aparelho digestivo com o produto oriundo do fruto do açaizeiro, conduzidos pelos físicos Draulio Barros de Araújo e Tiago Arruda Sanchez, do Departamento de Física e Matemática. O "brilho" dos órgãos digestivos garantem melhor qualidade do contraste, com imagens mais conclusivas, devido a presença de ferro e outros metais no açaí que alteram o campo magnético nos exames. O mérito está no fato de que o uso do contraste artificial comumente gera estímulos indesejáveis no estômago que podem prejudicar o diagnóstico. Além de excelente contraste, o açaí tem sabor agradável e alimenta. No quesito custo, enquanto três doses do contraste tradicional custam R\$ 210,00 a mesma quantidade de açaí não passa de R\$ 6,00^[47].

Pesquisadores da Universidade Federal do Rio de Janeiro investigam outras propriedades da polpa, que teria um promissor princípio ativo com possibilidades de prevenir e combater o câncer de próstata, além da capacidade de proteger a pele e retardar o envelhecimento ^[47].

As fibras da semente do açaizeiro encontram-se fixadas ao redor da semente do fruto do açaí após o beneficiamento do suco, pois elas se localizam no mesocarpo do fruto, justamente onde se localiza a polpa. São, portanto, um subproduto da extração do suco ou polpa do açaí. Depois de desidratadas naturalmente podem ser facilmente removidas com as mãos. Possuem um comprimento médio da ordem de 12 mm. A disposição das fibras pode ser melhor visualizada nas Figuras 2.12 e 2.13.

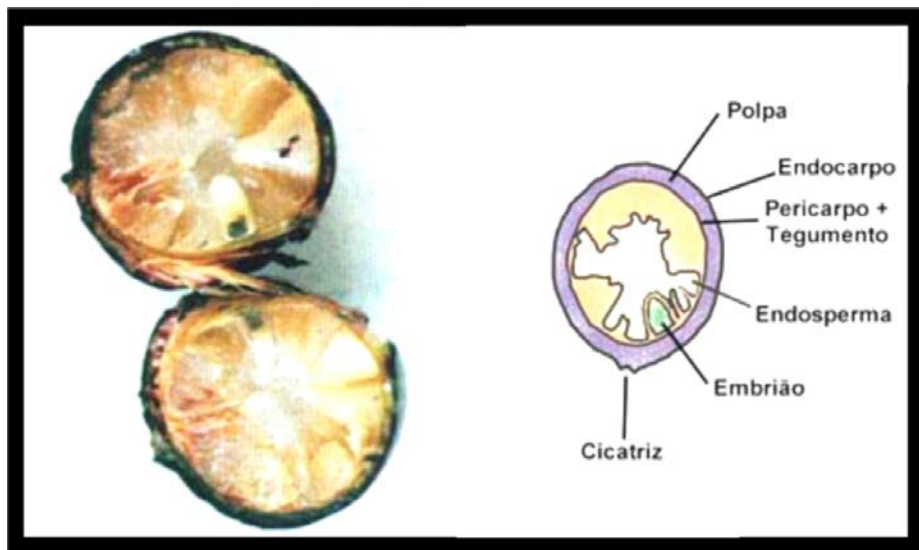


Figura 2.12 – Anatomia da semente do açazeiro ^[45].



Figura 2.13 – Evidência das fibras nas sementes pós extração da polpa.

III – METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 – Caracterização da Fibra da Semente do Açaí

3.1.1 – Caracterização Morfológica

Para a análise morfológica da fibra de açaí no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), as amostras foram preparadas de maneira a se obter diferentes vistas das mesmas, como ilustra a Figura 3.1. Onde temos em (A) uma fotografia evidenciando os arranjos das fibras na semente de açaí; em (B) a fotografia das amostras retiradas da semente para análise com arranjo linear e aleatório das fibras, respectivamente; em (C) o preparo prévio das fibras para observação da seção transversal; em (D) a amostra para observação da seção transversal; em (E) o corte das fibras com bisturi para observação da seção longitudinal interna da fibra; e em (F) a amostra para observação da seção longitudinal interna da fibra.

Em seguida, as amostras foram submetidas ao processo de *sputtering*, Figura 3.2 (A), que consiste na metalização a fim de induzir uma condutividade elétrica superficial nas amostras para a observação das mesmas no MEV. O equipamento utilizado foi o aparelho BAL-TEC - SCD 005 Sputter Coater, onde primeiramente os porta-amostras foram fixados na câmara do equipamento e submetidas a um vácuo de 5 Pa (5×10^{-2} mBar), para então iniciar a deposição de ouro, com uma corrente de 60 mA durante 90 s, que gerou um filme fino de ouro com espessura de aproximadamente 30 nm sobre as mesmas, como mostrada através da coloração característica na Figura 3.2 (C). O controle da espessura fora feito a partir da tabela da Figura 3.2 (B), que relaciona tempo em segundos e espessura em nanômetros para uma pressão de 0,05 mBar (5 Pa, aproximadamente), atingida com 1,5 minutos. O Microscópio Eletrônico utilizado é da Philips

EV, modelo XL30, do CEMM-PUCRS.

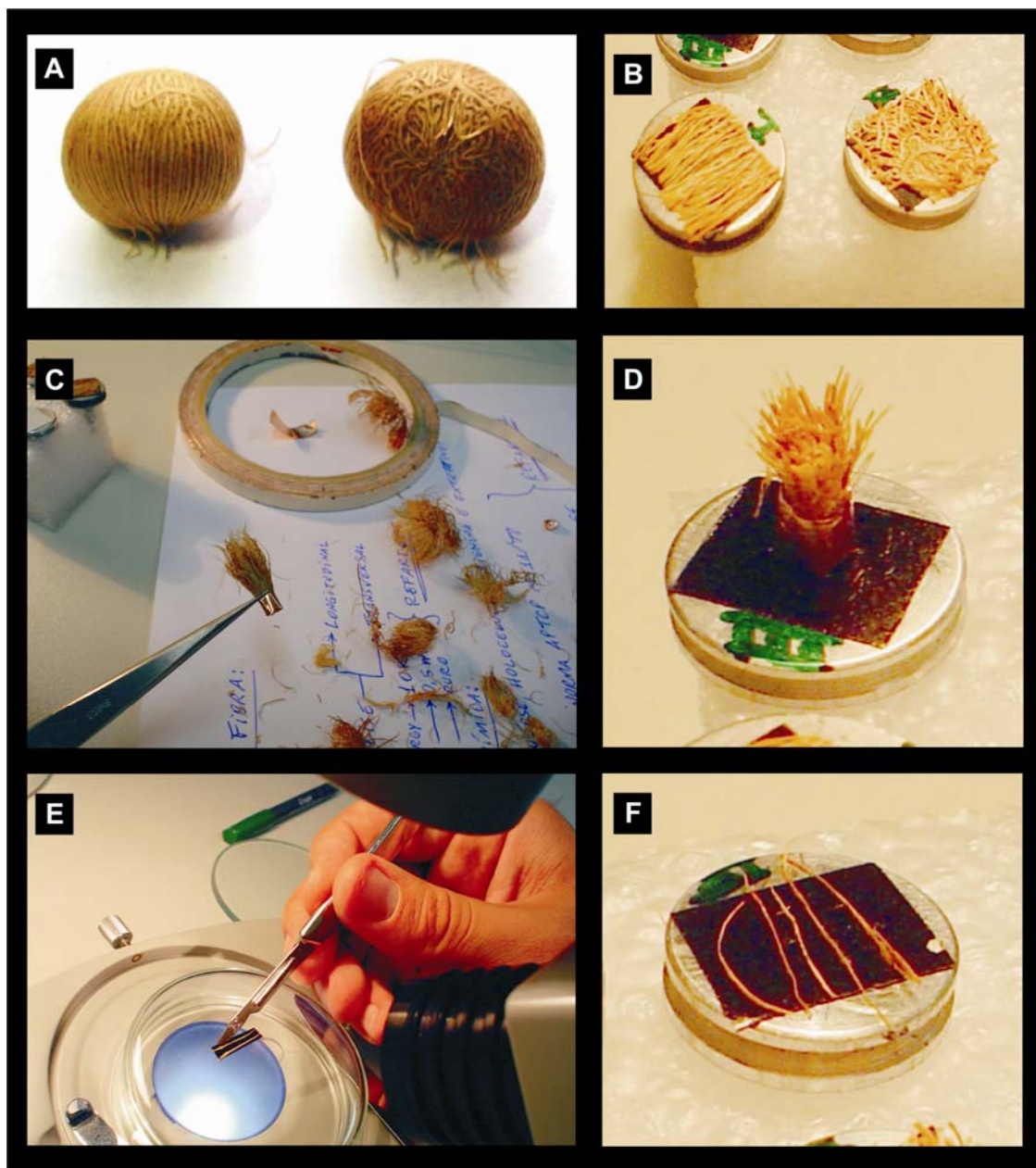


Figura 3.1 – Fotografias ilustrando as amostras preparadas para a observação das fibras de açaí no MEV.

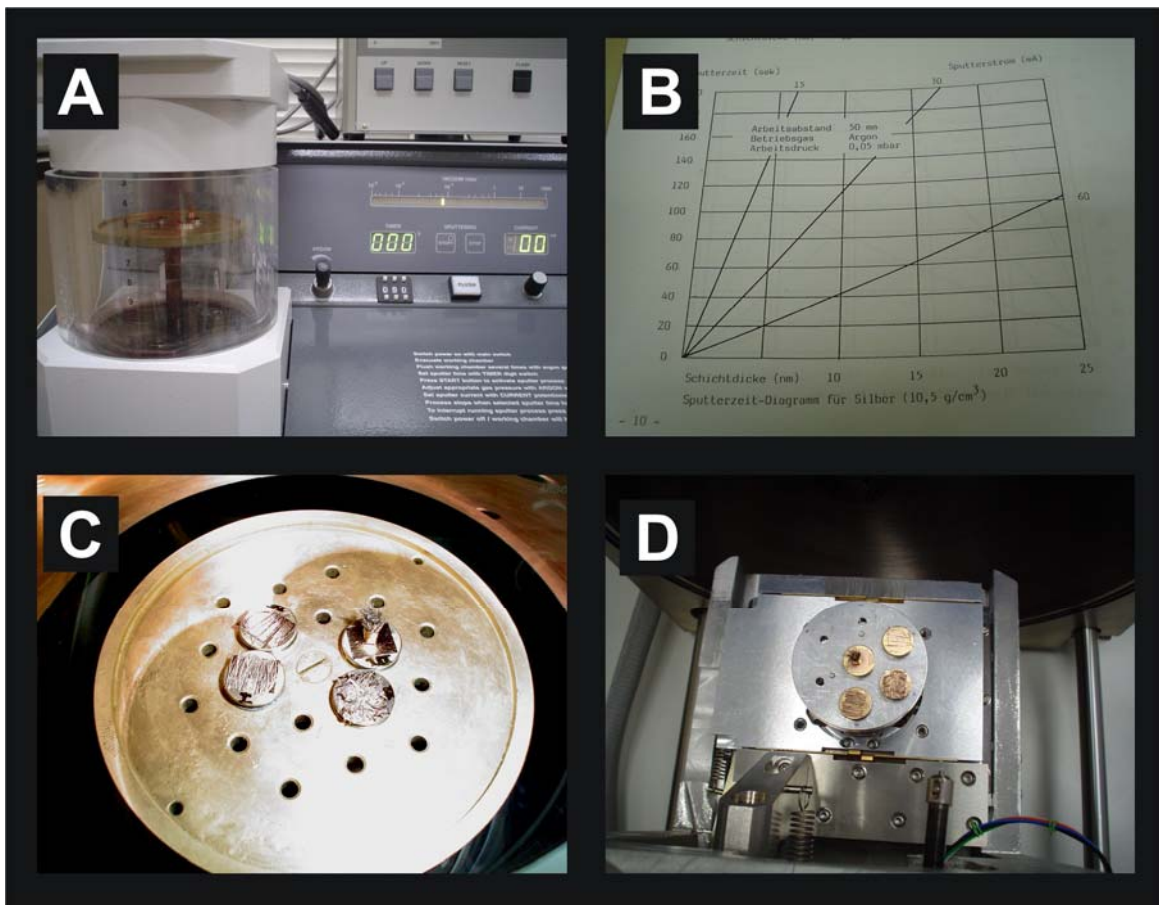


Figura 3.2 – Fotografias ilustrando o processo de metalização das amostras para análise no MEV. (A) as amostras no equipamento de *sputtering*; (B) tabela de controle da espessura do filme; (C) amostras recobertas com ouro; e (D) porta-amostras na bandeja de entrada do MEV.

3.1.2 – Caracterização Físico-química

As análises físico-químicas foram realizadas a partir das fibras da semente do açaí como agregado de mistura cimentícia (i.e. pasta, argamassa, concreto etc.) comum em materiais de construção civil.

3.1.2.1 – Análise do pH (NBR 7220/1987)

Foi utilizada como referência a norma NBR 7220 - Agregados: Determinação de Impurezas Orgânicas Húmicas em Agregado Miúdo^[48] de 1987, da Associação Brasileira de

Normas Técnicas (ABNT). Este método consistiu na adição 200 g de fibras secas ao ar e 100 mL de solução de hidróxido de sódio (30 g de hidróxido de sódio e 970 g de água) em um béquer, em seguida o frasco foi agitado vigorosamente e deixado em repouso por 24h. Após esse período, a solução que esteve em contato com as fibras foi filtrada, sendo recolhida em um tubo Nessler, empregando-se papel de filtro qualitativo, determinando-se o pH por colorimetria.

A solução padrão para referência foi preparada pela adição de 3 mL de solução de ácido tânico (2 g de ácido tânico; 10 mL de álcool e 90 mL de água) a 97 mL da solução de hidróxido de sódio.

3.1.2.2 – Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica das fibras foi realizada no Laboratório de Materiais Poliméricos (LaPol) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em aparelho da marca TA Instruments, modelo TGA 2050, a uma taxa de 20°C/min.

3.1.2.3 – Análise por Espectrometria de Infra-vermelho

Obteve-se o espectro de infra-vermelho das fibras da semente do açaizeiro em um espectrofotômetro FTIR (Infra-vermelho por Transformada de Fourier) modelo Spectrum One com acessório HATR, da marca Perkin Elmer, do Laboratório de Análises Químicas da PUCRS.

3.1.2.4 – Massa Específica

Determinou-se a massa específica das fibras através do volume deslocado de álcool etílico em uma proveta a partir da inserção de uma quantidade de fibra com sua massa previamente determinada, conforme o procedido por Sarmiento & Freire^[49] para fibras de bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). A opção pelo álcool etílico é em função de sua relativa baixa densidade, para se evitar que as fibras bóiem durante o ensaio, por não se conhecer a densidade

das mesmas.

Foram pesadas em uma balança digital, modelo BG 4000 da marca GEHAKA – com resolução de 0,01 g – porções de fibras com 1,00 g de massa. Em seguida, foram inseridas, para um total de três aferições, em uma proveta com resolução de 0,5 mL, contendo 15 mL de álcool etílico, anotando-se as variações de volume. Para verificação dos resultados, o ensaio foi repetido em outra proveta com resolução de 0,1 mL, onde foi introduzido uma quantidade de fibra de 0,5 g de massa, previamente reservadas em três amostras, em 6,00 mL de álcool etílico, para comparar os dados obtidos com as aferições na proveta de menor resolução.

3.1.2.5 – Dimensões Médias

As dimensões médias (comprimento e diâmetro) foram determinadas por:

- (i) Mensuração direta, a partir de imagens de MEV da seção transversal, que foram tratadas por um *software CAD (Computer Assisted Drawing)*, o que possibilitou dimensionar suas principais medidas com referência na escala gerada pelo MEV – exemplificada na Figura 3.3.
- (ii) Mensuração direta do comprimento das fibras alinhadas e afixadas com fita adesiva em papel escalonado – como mostra a Figura 3.4. A partir de dez sementes, escolheu-se aleatoriamente 5 fibras de cada e para o caso de fibras “Y” (conceituadas na seção 4.1.1) aferiu-se a distância entre dois extremos.

Os processos foram feitos com 50 repetições cada.

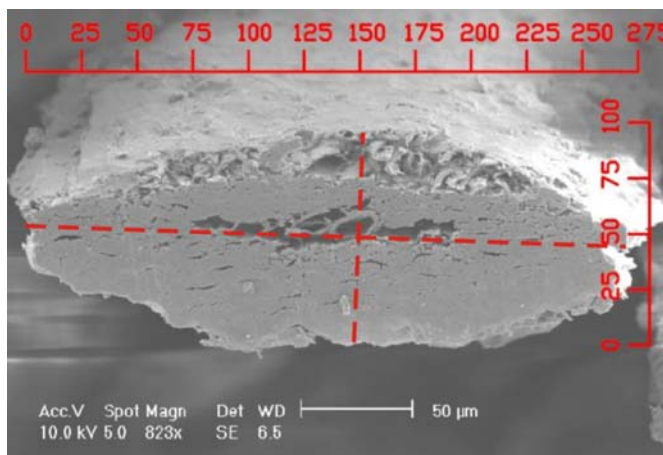


Figura 3.3 – Exemplo de medida das dimensões da fibra efetuada com auxílio de *software CAD*.

A partir da relação entre as dimensões, determinou-se algumas propriedades comuns às fibras de celulose, como o Coeficiente de Flexibilidade, o Índice de Runkel, o Índice de Enfeltramento e a Fração Parede, que são apropriações matemáticas quanto à flexibilidade, potencial de ligação entre si, enfeltramento (aglomeração em conjunto) e porcentual de microfibrilas (parede celular) ^[50]. Esta análise anatômica levou em conta a largura da fibra e o diâmetro do lume médios. Tais parâmetros foram apropriados como sendo a média aritmética das 50 aferições de comprimento e largura da fibra, de espessura de parede e do diâmetro do lume.

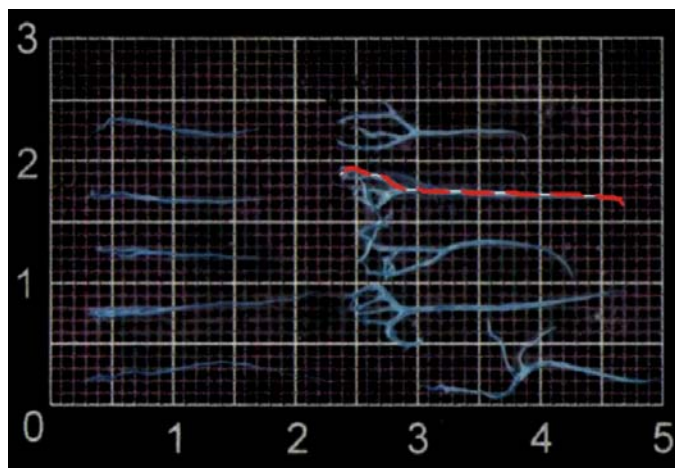


Figura 3.4 – Exemplo de medição do comprimento das fibras.

3.2 – Produção dos Compósitos

Foram produzidos corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos de compósitos cimentícios reforçados com fibras da semente do açaizeiro. Cada mistura das variações de materiais do compósito idealizado foi denominada em função da relação matriz/reforço, i.e. o traço da argamassa como a proporção *cimento:fibras* (em massa). Para a água, foi seguida a nomenclatura padrão para as argamassas tradicionais da construção civil, expressa quantitativamente como um fator percentual, oriundo da relação da quantidade (massa) de água pela de cimento, o denominado *relação água-cimento* (*a/c*). O material resultante da mistura de cimento e água, somente, é denominado pasta cimentícia.

A partir da Fundamentação Teórica, para o caso das fibras utilizadas como reforço de fibrocimentos, i.e. coco e sisal, têm-se majoritariamente estudos para casos de 0% a 5% (volume)

de reforço em relação à matriz, em média, com alguns trabalhos extrapolando estes valores em até duas vezes. Idealizou-se a priori trabalhar com o intervalo de volumes retro mencionado, entretanto, em função dos recursos disponibilizados para este trabalho, não se obteve uma pasta cimentícia com boa trabalhabilidade para teores de fibras maior que 0,6%. Isso pode ser explicado pelo fato de que os trabalhos supra mencionados utilizaram para a obtenção dos compósitos uma tecnologia mais adequada, e.g. drenagem por sucção etc., enquanto o presente trabalho foi concebido para a avaliação de uso da fibra de açáí, prioritariamente. Os valores inferiores a 1% não interferiram nas análises dos comportamentos mecânicos avaliados.

Esta pesquisa teve duas etapas de produção de compósitos, a primeira realizada na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) em Porto Alegre e a segunda na Universidade da Amazônia (UNAMA) em Belém.

3.2.1 – Composição do Fibrocimento

Os fibrocimentos foram constituídos de pasta de cimento Portland e fibras da semente do açazeiro^[38]. Para a escolha da matriz do compósito levou-se em conta critérios de praticidade, economia e desempenho final do material cimentício. No Brasil tem-se vários cimentos hidráulicos aditivados comercializados do Norte ao Sul do país. São variedades de cimentos Portland com aditivos que conferem propriedades no cimentício final, fabricados por várias marcas industriais, nacionais e regionais. Optou-se oportunamente no presente trabalho pelos: CP-IV-32 da marca gaúcha Cimbagé (Cimpor do Brasil) e CP-II-Z da cearense Cimento Poty (Votorantim Cimentos). Ambas, cimentos Portland comerciais que consistem no Portland comum, derivado de microgrãos finamente pulverizados a partir do produto do cozimento de calcário e argila, com adições de pozolana por substituição proporcional desse clínquer de 15% a 50% e com mais de 5%, respectivamente, sendo o primeiro produzido segundo a NBR 5736. Estes cimentos hidráulicos com pozolana, além do incremento anti-sulfatante, é mais impermeável e por isso relativamente mais durável. O CP-IV-32 está entre os Portlands comerciais com proporções maiores de adições, já o CP-II-Z está entre os com menores.

3.2.1.1 – Preparação das Fibras

Na primeira etapa de produção, as fibras *in natura*, removidas manualmente das sementes de açaí, foram lavadas e secas por exposição ao sol durante doze horas e armazenadas em ambiente de laboratório até a moldagem dos corpos-de-prova. Os resultados deste grupo de amostras serviram como referência para comparação com o segundo lote de corpos-de-prova.

Na etapa posterior, as fibras foram pré-tratadas visando reduzir o efeito dos extrativos (substâncias extra-celulósicas), que sofrem ataque alcalino na presença do cimento. O procedimento escolhido, bastante simples e prático, seguiu a proposta de Racines & Pama apud Sarmiento & Freire^[49], em que as fibras foram imersas em água fervente, mantendo a temperatura de fervura por 30 minutos. Posteriormente, as fibras foram colocadas em recipientes de drenagem (peneiras de aço inoxidável), onde secaram naturalmente por doze horas de exposição ao sol em bandejas plásticas, com sobreposição periódica das porções mais úmidas até o tempo completo de secagem. Ressalta-se, entretanto, que desde o tratamento químico mais simples como o utilizado até outro mais sofisticado, e.g. cozimento em solução de hidróxido de sódio (polpação soda), todos geram efluentes líquidos.

A Figura 3.5 mostra a drenagem imediata pós-cozimento e a água residual do processo termoquímico. Nota-se na fotografia (B), através da coloração da água no término do cozimento que uma parcela visível de extrativos foi removida. Todavia, a parcela de material eliminado torna-se importante para estudos de durabilidade, como será discutido posteriormente.

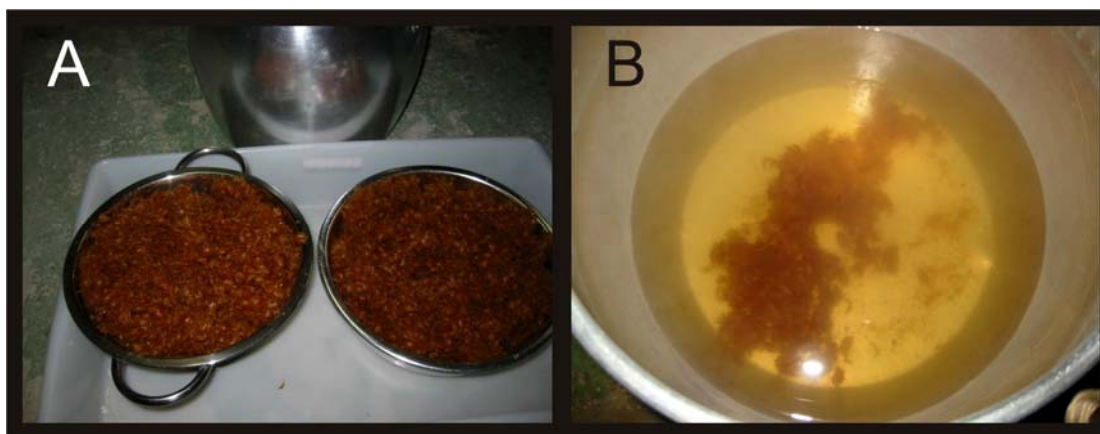


Figura 3.5 – Fotografias das (A) fibras drenando em peneiras metálicas e (B) água residual do cozimento.

3.2.2 – Proporções das Misturas Cimentícias

Na primeira etapa de produção de corpos-de-prova visou-se a execução de ensaios para determinação de absorção de água, porosidade aparente, massa específica, resistência à compressão axial e tração na flexão. Na segunda etapa, os ensaios foram os mesmos, porém ao invés do último obteve-se resistência à tração por compressão diametral. A Figura 3.6 mostra em (A) a quantidade de fibras para uma mistura e em (B) as mesmas sendo incorporadas na pasta cimentícia na primeira etapa de produção de compósitos.

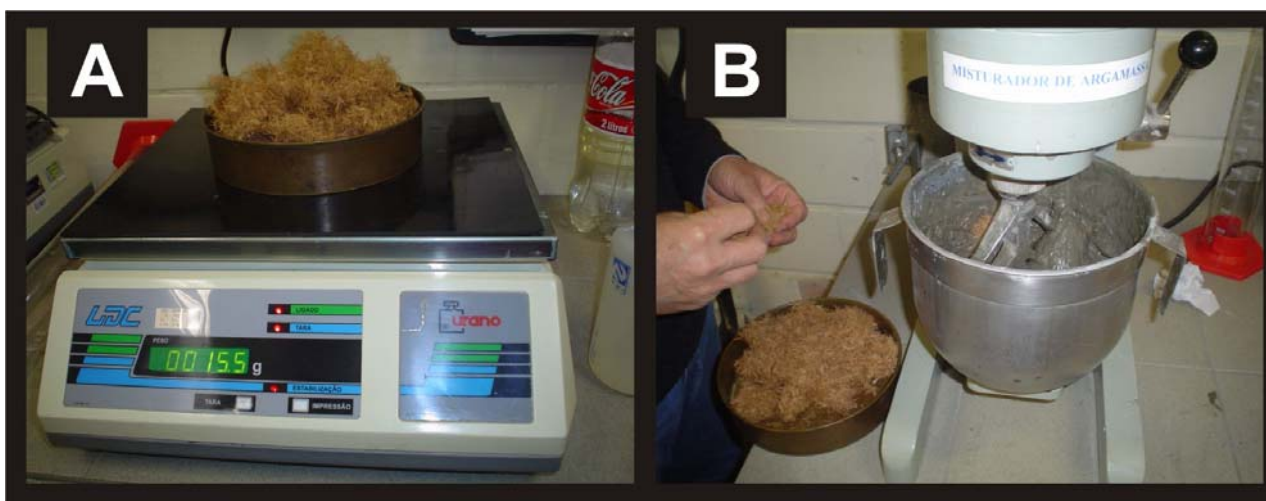


Figura 3.6 – Fotografias das (A) fibras sendo pesadas e (B) adição de fibras à pasta de cimento e água.

3.2.2.1 – Primeiro Lote de Corpos-de-Prova

A relação água-cimento (a/c) foi escolhida através de análise reológica tátil-visual durante esta primeira batelada dos compósitos com o manuseio da pasta fibrocimentícia utilizando colher de pedreiro, por tentativa-e-erro, até se obter uma boa trabalhabilidade manual da mistura. Foram feitos três tipos de mistura cimentícia, conforme descrito a seguir.

Para o primeiro traço, a referência (0% de fibra), foi primeiramente pesado 2.500 g de cimento e colocado em um misturador de argamassas Emic, modelo 5025. Esta quantidade foi escolhida em função da capacidade volumétrica do recipiente do equipamento. Pesou-se também 1.000 g de água em uma proveta milimetrada e 50 g de fibras, após pesagem prévia. À

argamasseira foi adicionado o cimento e imediatamente começou-se a adição gradativa de água, observando-se a reologia da mistura. Também de forma gradativa foi adicionada pequena quantidade de fibra (0,3-0,5% de teor de fibra), com o mesmo controle visual.

Foi alcançado uma relação água-cimento (a/c) de 0,28, ou seja, 700 mL de água, por comparação com o valor inicial de 1.000 g e a quantidade máxima de fibras obtida foi de 15 g. Obteve-se três traços de mistura de cimento Portland e fibra, com relação água-cimento (a/c) igual a 0,28:

- (i) Traço 1 (01PASTA), a referência, 1:0 (0% de fibras);
- (ii) Traço 2 (02FMAX), com uma quantidade de fibras de 15 g, 1:0,006 (0,5% em volume de fibras); e
- (iii) Traço 3 (03FMIN), com uma quantidade de fibras de 7,5 g, 1:0,003 (0,3% de fibras, em volume).

Assim, obteve-se as três misturas elencadas na Tabela 3.1, que também apresenta as quantidades de corpos-de-prova produzidos nesta etapa. O ensaio de tração na flexão, em função das dificuldades expostas em 3.2.2.2, dos custos de realização deste e, ainda, por terem sido procedidos na época da transição regional a qual este trabalho foi submetido, teve apenas o rompimento de corpos-de-prova aos sete dias de idade.

A quantidade de reforço em relação volumétrica com a matriz, denominada teor de fibras (T_f), foi calculada de acordo com a equação (3.1):

$$T_f = \frac{\frac{m_f}{\mu_f}}{\frac{m_c}{\mu_c} + \frac{m_a}{\mu_a}} \quad (3.1)$$

Onde:

m_f = massa de fibras (g);

μ_f = massa específica da fibra (1,1 g/cm³);

m_c = massa de cimento (g);

μ_c = massa específica do cimento (1,4 g/cm³);

m_a = massa de água (g), e

μ_a = massa específica da água (1,0 g/cm³).

Para um saco comercial de 50 kg, a literatura sobre cimento Portland sugere para sua massa específica aparente os valores da ordem de $1,50 \text{ kg/dm}^3$ e 35 dm^3 , o que equivale a $1,43 \text{ kg/dm}^3$. Foi adotado o valor de $1,4 \text{ g/cm}^3$ para os cálculos da Equação 3.1.

Tabela 3.1 – Composição das Misturas Cimentícias – I.

Mistura	Cimento (g)	Água (g)	Fibras (g)	Teor de Fibras (% em volume)	Quantidades de Corpos-de-Prova				
					Compressão Axial		Tração na Flexão		Propriedades Físicas (CPs prismáticos)
					7	28	7	28	
01PASTA	2500	700	0	0,0%	3	3	3	3	3
02MAX	2500	700	15	0,5%	3	3	3	3	3
03MIN	2500	700	7,5	0,3%	3	3	3	3	3

A Figura 3.7 ilustra alguns passos do procedimento de produção dos corpos-de-prova moldados na primeira etapa de produção de compósitos realizada no LAMAT (Laboratório de Materiais de Construção) da PUCRS.

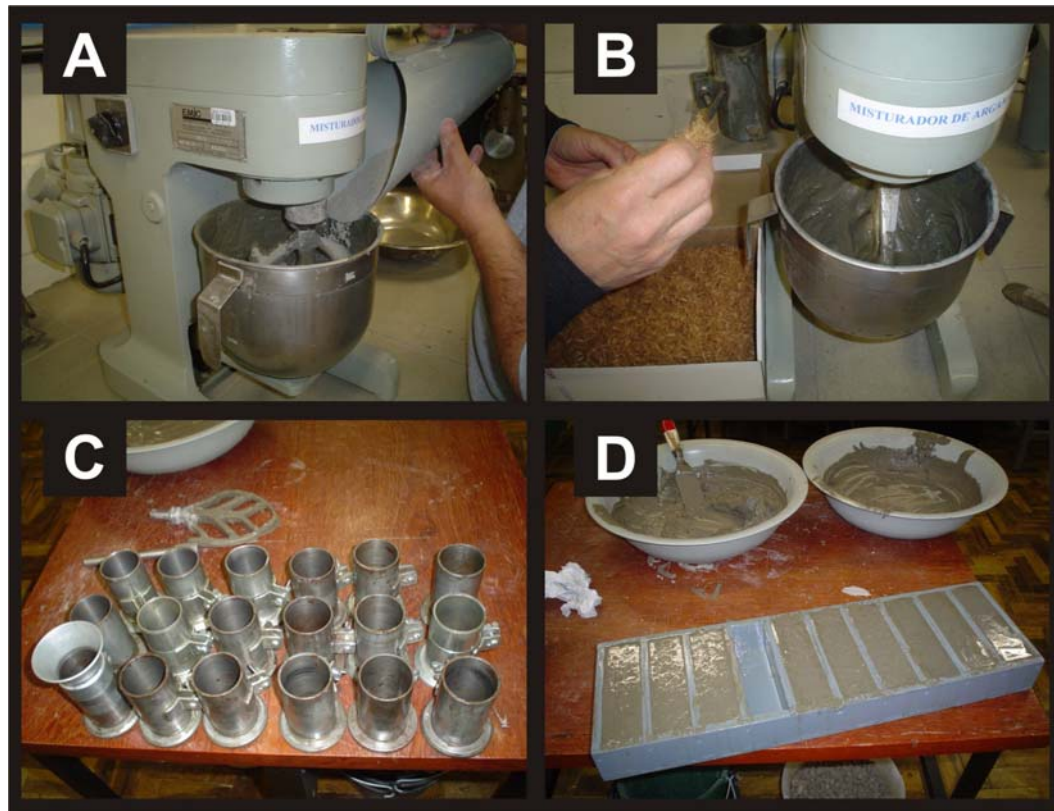


Figura 3.7 – Fotografias da (A) adição de água ao cimento; (B) adição de fibras à pasta; (C) moldes cilíndricos; e (D) corpos-de-prova prismáticos na forma imediatamente após a moldagem.

3.2.2.2 – Segundo Lote de Corpos-de-Prova

Para este lote, manteve-se a relação água/cimento em 0,28 e optou-se por teores de fibra de 0,2%, 0,3% e 0,4%, além da referência (0%), buscando-se um maior detalhamento do intervalo entre nenhuma fibra (amostra de referência) e o teor máximo (0,5%) da batelada do Primeiro Lote. Entretanto, desta vez optou-se pelo CP-II-Z como cimento, por critério de oportunidade e regionalidade.

Nesta etapa, realizada no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade da Amazônia, em Belém, modificou-se a ordem de adição de cimento da mistura. Assim, na produção dos compósitos, nesta produção se optou pela adição de metade da água às fibras previamente dispostas no recipiente de um equipamento modelo 5010, da Emic. Então, parcelas de massa de cimento Portland e da outra metade de água foram adicionadas em intervalos variáveis. A Figura 3.8 mostra os principais passos utilizados para a produção de compósitos na segunda etapa.



Figura 3.8 – Fotografias da (A) argamaseira; (B) fibras e metade d'água; (C) fibras, parte d'água e parte do cimento; (D) mistura completa; (E) adensamento; e (F) corpos-de-prova moldados.

As quantidades de massa inseridas por vez na argamaseira foram alteradas, em relação à Primeira Batelada, para que se obtivesse em um traço produzido todos os corpos-de-prova para

um mesmo ensaio mecânico, com repetição para as duas idades, de sete e vinte e oito dias, e para os espécimes ensaiados para determinação de propriedades físicas, i.e. quinze corpos-de-prova.

Em função dos resultados dos ensaios mecânicos da primeira etapa, optou-se nesta etapa pela produção de corpos-de-prova cilíndricos somente, inclusive para a determinação de resistência à tração – no caso, por relação matemática entre as cargas de ruptura por compressão diametral e as dimensões dos espécimes ensaiados. Foram produzidos 60 corpos-de-prova, sendo 48 para os ensaios mecânicos e 12 para os de propriedades físicas. A Tabela 3.2 mostra a massa de fibras com as proporções das misturas produzidas nesta etapa.

Tabela 3.2 – Composição das Misturas Cimentícias – II.

Mistura	Cimento (g)	Água (g)	Fibras (g)	Teor de Fibras (% em volume)	Quantidades de Corpos-de-Prova				
					Compressão Axial		Tração na Flexão		Propriedades Físicas (CPs cilíndricos)
					7	28	7	28	
T1-00F	2600	728	0,00	0,0%	3	3	3	3	3
T2-02F	2600	728	5,69	0,2%	3	3	3	3	3
T3-03F	2600	728	8,53	0,3%	3	3	3	3	3
T4-04F	2600	728	11,37	0,4%	3	3	3	3	3

$$m_f = \left(\frac{m_c}{\mu_c} + \frac{m_a}{\mu_a} \right) \times T_f \times \mu_f \quad (3.2)$$

Onde:

m_f = massa de fibras (g);

m_c = massa de cimento (g);

μ_c = massa específica do cimento (1,4 g/cm³);

m_a = massa de água (g);

μ_a = massa específica da água (1,0 g/cm³);

T_f = teor de fibras (volume), e

μ_f = massa específica da fibra (1,1 g/cm³).

3.2.3 – Moldagem dos Corpos-de-Prova

Os corpos-de-prova para os ensaios mecânicos e de determinação de propriedades físicas, foram moldados de acordo com a norma brasileira NBR 5738 - Concreto: Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova^[51] de 2003, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que prescreve o procedimento para produção de corpos-de-prova cilíndricos, utilizados nos ensaios de compressão axial e de tração por compressão diametral, e de corpos-de-prova prismáticos, utilizados no ensaio de tração na flexão.

As dimensões das amostras adotadas foram de 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, para os espécimes cilíndricos, e de 5 cm por 5 cm na secção quadrada por 17 cm (15 cm de vão útil para o ensaio) de comprimento, para os prismáticos, de acordo com o exigido pelas normas em referência^[48, 51, 52, 53, 54]. Foram utilizados moldes cilíndricos de aço, padrões, de cada laboratório e, na Primeira Etapa, moldes prismáticos manufaturados especialmente para este trabalho, de madeira compensada ($e = 12$ mm) revestida com pintura esmalte sintética não-absorvente e não-reagente com o cimento Portland e suficientemente resistente para manter sua forma durante a operação de moldagem.

O procedimento descrito a seguir foi adotado nas duas etapas de produção dos compósitos e para ambos corpos-de-prova, cilíndricos e prismáticos. Antes da moldagem, os moldes foram convenientemente revestidos internamente com fina camada de óleo mineral. A partir das argamassas, foi realizada remistura manual prévia no recipiente da argamasseira removido do equipamento, para garantir a sua uniformidade. Na introdução da massa, a espátula foi deslocada ao redor da borda do molde, a fim de assegurar uma distribuição simétrica, seguida imediatamente de nivelamento com haste de adensamento em movimentos circulares. A introdução das misturas no molde foi feita em três etapas com volumes aproximadamente iguais e adensados por 30 golpes, efetuados pelo mesmo operador (visando manter condições de força e intensidade), com a haste de adensamento, de aço, cilíndrica, com superfície lisa, diâmetro de 16 mm, comprimento de 60 cm e com os dois extremos em forma semi-esférica com diâmetro igual ao da haste.

No adensamento, a primeira camada foi atravessada em toda a sua espessura, evitando-se golpear a base do molde. As outras duas camadas foram também adensadas em toda a sua espessura, com a haste penetrando aproximadamente 20 mm na camada anterior – o controle foi

visual a partir da marcação no comprimento da haste. Os golpes foram distribuídos da forma mais uniforme possível em toda a secção dos moldes. A cada camada adensada, foram efetuados golpes nas faces externas dos moldes, a fim de se eliminar possíveis vazios na massa. A última camada foi moldada com quantidade em excesso da mistura, de forma que, quando adensada, completou-se todo o volume do molde e possibilitou-se o seu rasamento com colher de pedreiro, eliminando o material em excesso.

Durante as primeiras 24 h para os espécimes cilíndricos e 48 h para os prismáticos, os corpos-de-prova foram armazenados em local protegido de intempéries, devidamente cobertos com material não reativo e não absorvente, com a finalidade de evitar perda d'água, dispostos sobre superfície horizontal rígida para cura. Após o período de 24 h e 48 h, para os cilíndricos e prismáticos respectivamente, os corpos-de-prova foram desmoldados, identificados e armazenados em tanque de cura até o momento de cada ensaio, obedecendo-se a NBR 9479 - Câmaras Úmidas e Tanques para Cura de Argamassa e Concreto^[52] de 1994.

Após a cura, pouco antes dos ensaios mecânicos foi feito o capeamento normatizado nos corpos-de-prova cilíndricos, na Primeira Batelada, e na Segunda, foi feita a retificação de todos os corpos-de-prova (identicamente cilíndricos). Este último processo consiste na remoção, por meios mecânicos, de uma fina camada de material do topo do espécime preparado, proporcionando uma superfície lisa e livre de ondulações e abaulamentos. Ambos os procedimentos foram efetuados de acordo com a NBR 5738/2003^[51].

3.3 – Caracterização dos Compósitos

3.3.1 – Ensaio de Determinação de Propriedades Físicas

As propriedades físicas dos compósitos produzidos como massa específica, porosidade aparente e absorção de água, comumente monitoradas no controle tecnológico de misturas cimentícias (ASTM C 948/1981), foram determinadas.

A massa específica, a porosidade aparente e a absorção de água foram obtidas através de cálculo entre os valores de massas seca, saturada com superfície seca e imersa, obtidas por pesagem dos corpos-de-prova mantidos por 24 h em estufa a 105°C, em seguida em tanque

d'água para saturação também por 24 h, sendo pesados ao final de cada processo, com os valores de massa anotados para cada corpo-de-prova individual.

- **Massa Específica** (i.e. densidade seca): A massa específica (μ_{CP}), em g/cm^3 , foi determinada de acordo com a equação (3.3).

$$\mu_{CP} = \frac{m_{seca}}{m_{saturada} - m_{imersa}} \quad (3.3)$$

Onde:

m_{seca} = massa seca do CP;

$m_{saturada}$ = massa saturada do CP, e

m_{imersa} = massa imersa do CP.

- **Porosidade Aparente**: A porosidade aparente (P_a) foi determinada de acordo com a equação (3.4).

$$P_a = \frac{m_{saturada} - m_{seca}}{m_{saturada} - m_{imersa}} \times 100\% \quad (3.4)$$

Onde:

$m_{saturada}$ = massa saturada do CP;

m_{seca} = massa seca do CP, e

m_{imersa} = massa imersa do CP.

- **Absorção de Água**: A absorção de água (Ab_a) dos corpos-de-prova foi determinada de acordo com a equação (3.5)..

$$Ab_a = \frac{m_{saturada} - m_{seca}}{m_{seca}} \times 100\% \quad (3.5)$$

Onde:

$m_{saturada}$ = massa saturada do CP, e

m_{seca} = massa seca do CP.

3.3.2 - Ensaio Mecânicos

Foram conduzidos três dos ensaios mecânicos efetuados para o controle tecnológico de materiais cimentícios para aplicação na construção civil, separadamente descritos a seguir.

3.3.2.1 - Ensaio de Compressão Simples (NBR 7215/1996 e NBR 5739/1994)

A resistência à compressão axial foi determinada através da NBR 7215 - Cimento Portland: Determinação da Resistência à Compressão ^[53] de 1996 e da NBR 5739 - Concreto: Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos ^[54] de 1994. Este ensaio foi realizado em duas etapas, a primeira em Porto Alegre na PUCRS e a segunda em Belém na UNAMA (Figura 3.9). Os ensaios foram realizados em uma prensa PC 200 I, modelo 5633, de marca Emic, na primeira fase. Já na segunda, utilizou-se o mesmo tipo de prensa, porém de modelo 5500. Nos dois casos, os equipamentos atendem os requisitos da NBR 6156 - Máquina de Ensaio de Tração e Compressão - Verificação: Método de Ensaio ^[55] de 1983.



Figura 3.9 – Corpo-de-prova da primeira etapa rompido e da segunda, no momento do ensaio.

Em ambas as etapas, os corpos-de-prova foram centralizados no prato inferior da prensa com auxílio dos círculos concêntricos de referência, para cada rompimento individual. A resistência à compressão é fornecida pelo *software* do equipamento, da forma teórica de que a

tensão (σ) é igual à carga aplicada (F) sobre a área (A) da seção transversal da amostra ensaiada ($\sigma = \frac{F}{A}$).

3.3.2.2 – Ensaio de Tração na Flexão (NBR 12142/1991)

Na primeira etapa de ensaios mecânicos, em Porto Alegre, os corpos-de-prova foram rompidos por ensaio de tração na flexão. Foram ensaiados primeiramente dois corpos-de-prova de duas misturas, chamadas 01ARG e 02MAX, denominados CP1-01ARG e CP1-02MAX, prismáticos, na mesma máquina universal de ensaios do ensaio de compressão desta etapa. Entretanto, houve dificuldade de se adequar o tamanho do corpo-de-prova à prensa mecânica da PUCRS. Em função disso, optou-se por realizar os demais ensaios na Fundação de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) do RS por método análogo à ASTM C293/1994.

A Figura 3.10 esquematiza o ensaio prescrito pela NBR 12142 - Concreto: Determinação da Resistência à Tração na Flexão em Corpos-de-Prova Prismáticos^[56] de 1991. Salienta-se o fato de que, em geral, os ensaios de flexão são idealizados basicamente da mesma maneira, carregamentos cisalhantes em três ou mais pontos de carga, ou seja, o esquema abaixo é semelhante ao procedimento da norma da *American Society For Testing and Materials* (ASTM) supracitada.

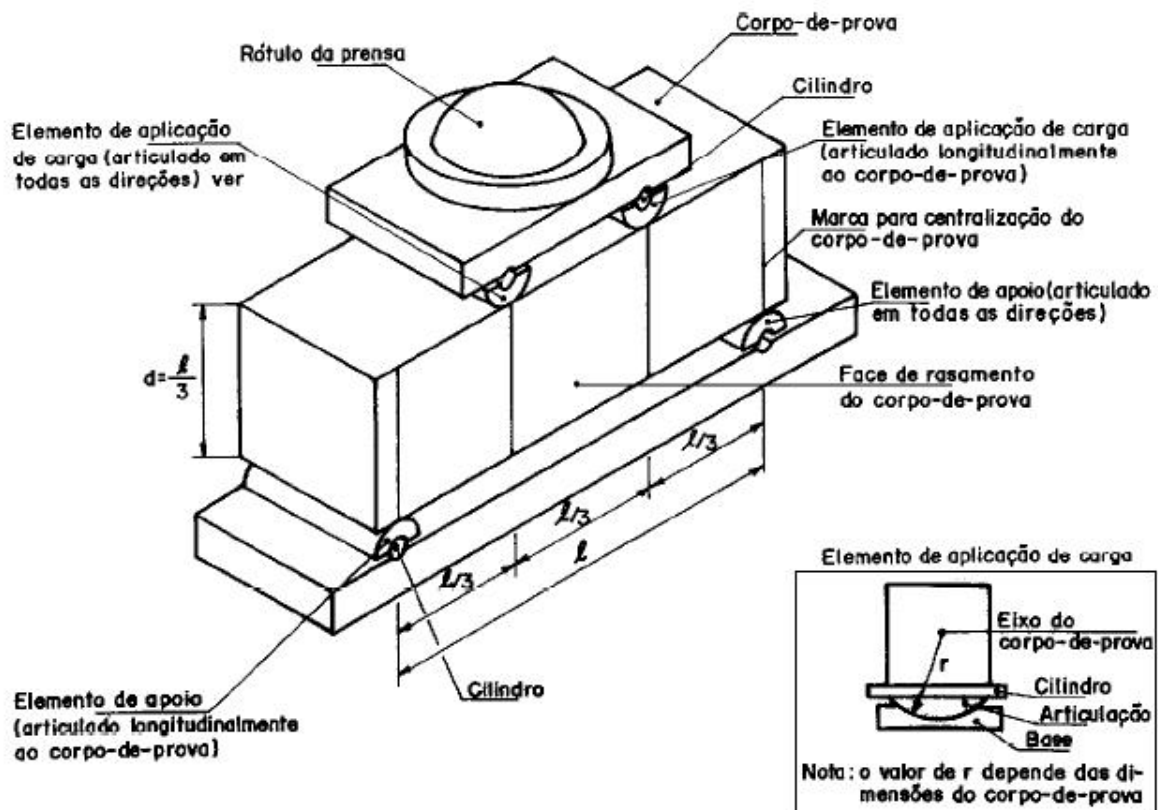


Figura 3.10 - Esquema do ensaio prescrito pela NBR 12142/1991^[56].

3.3.2.3 - Ensaio de Tração por Compressão Diametral (NBR 7222/1994)

Optou-se por realizar este ensaio em decorrência das observações referentes ao ensaio de tração na flexão realizado e da presente revisão bibliográfica. As dificuldades e os valores de difícil análise do ensaio anterior, podem estar relacionados às dimensões dos corpos-de-prova produzidos e com o fato que as normas da ABNT e ASTM destinam-se a Concretos de Cimento Portland (CPP) e que os fibrocimentos têm seu melhor desempenho após a primeira fissura para corpos esbeltos – sem nenhuma influência do peso próprio – e que muito provavelmente o ensaio de resistência à tração na flexão de seção quadrada não devesse ser utilizado para o compósito fibrocimentício pertinente à presente pesquisa.

De fato, caso se considere apenas o fator da escala desses corpos prismáticos, que possuem seção quadrada e comprimento (vão útil do ensaio) três vezes maior que o lado da seção, pode se conceber a aplicação desses espécimes para o ensaio idealizado. Entretanto, levando-se em consideração o diâmetro muito reduzido das fibras em relação ao lado da seção

destes corpos-de-prova, percebe-se que a menor escala possível que atenda à norma (4 × 4 × 12 cm) não resulta em um comportamento de um corpo esbelto à flexão – devido à influência do peso próprio ser superior ao desempenho de rigidez inerente aos corpos esbeltos (i.e. flexibilidade).

Pela norma NBR 7222 - Argamassa e Concreto: Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral^[57] de 1994, equação (3.6), percebe-se que a resistência à tração dos espécimes não sofre influência do peso próprio de um corpo-de-prova cilíndrico. Por isto, e pelo fato de que esta norma inclui em sua aplicação argamassas, mais similares aos fibrocimentos em questão, utilizou-se esta norma para obtenção da resistência à tração dos compósitos desta pesquisa.

$$R_{t(CD)} = \frac{2 \times P}{\pi \times D \times L} \quad (3.6)$$

Onde:

$R_{t(CD)}$ = resistência à tração por compressão diametral (MPa);

P = carga de ruptura (kgf);

D = diâmetro do corpo-de-prova (CP), e

L = altura do CP.

O procedimento foi realizado em Belém, no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade da Amazônia. Para cada ensaio os corpos-de-prova foram colocados de modo a repousar ao longo da geratriz do cilindro, sobre o prato inferior do equipamento de compressão. A norma exige que sejam colocadas entre os pratos e o corpo-de-prova duas tiras de chapa dura de fibra de madeira de comprimento igual ao da geratriz do espécime e seção transversal de acordo com a Figura 3.11, neste caso $b = 7,5$ mm e $h = 3,5$ mm.

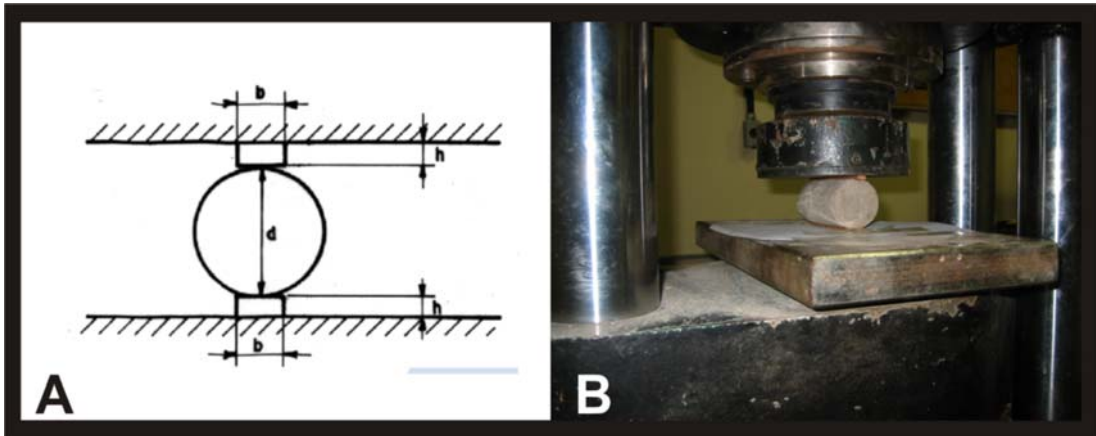


Figura 3.11 – (A) Esquema do Ensaio de Tração por Compressão Diametral^[55] e (B) Corpo-de-prova pronto para o ensaio.

IV – APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 – Propriedades da Fibra

4.1.1 – Morfologia

É válido lembrar que nesta amostragem as fibras que foram analisadas morfológicamente no MEV não sofreram nenhum tratamento prévio. A estrutura morfológica estudada neste capítulo está assim focada na forma estrutural lignocelulósica da fibra, i.e. da estrutura da celulose arranjada espacialmente com a lignina.

A Figura 4.1, mostra a superfície da fibra da semente do açazeiro obtida a partir da Amostra III (Figura 3.1-C). Nota-se a presença de alguns círculos com uma saliência interna em relevo espalhados aleatoriamente sobre a superfície da fibra, que são microgrãos da polpa do fruto, sensíveis ao tato na degustação. Pelo fato de as fibras de açaí se encontrarem no mesocarpo juntamente com a polpa, têm-se vários extrativos no material lignocelulósico, i.e. resíduos da polpa não removidos na despolpa do fruto, visto que tais fibras analisadas no MEV não terem sido submetidas ao tratamento das fibras da Primeira Etapa deste trabalho.

Na Figura 4.2 se pode notar que o baixo relevo à direita da imagem tem o resultado da forma de um microgrão impresso, que foi extraído da superfície da fibra.

Macroscopicamente é possível notar que as fibras retiradas da parte superior da semente (Amostra IV na Figura 3.1-C) apresentam bifurcações em seus prolongamentos, tomando a forma de um “Y”, longitudinalmente. Pode-se visualizar este tipo de fibra na Figura 4.3, em um aumento pequeno (145x) e inclusive uma pequena fissura no encontro dos prolongamentos bifurcados. Esta característica pode levar esta região da fibra a apresentar baixa resistência mecânica, dependendo da direção do esforço.

Como mencionado na metodologia, a amostra para análise da seção transversal (Amostra I na Figura 3.1-C) foi obtida através de corte com estilete. Em função desse corte

era de se esperar uma deformação na amostra, i.e. um achatamento da secção transversal em função da pressão inicial da lâmina com as fibras até o início do corte. Porém, a visualização das amostras no MEV (Figura 4.4) indicou que o achatamento da secção transversal não existia somente na região de corte, prolongando-se ao longo da fibra e, portanto levando a crer que as fibras originalmente possuem uma secção transversal mais próxima de uma forma elíptica, característica não identificável macroscopicamente. O formato elíptico da fibra é também perceptível pelo tato, fazendo-se movimentos de rolamento da fibra entre o polegar e o indicador.

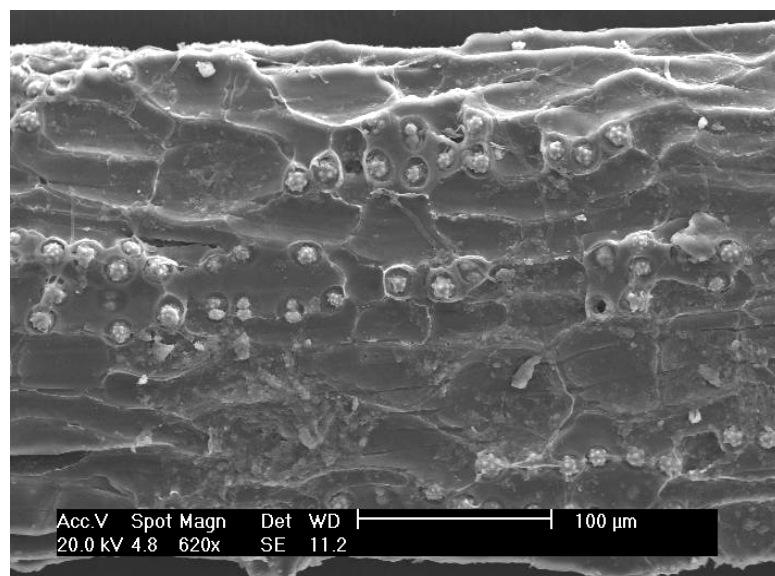


Figura 4.1 - Micrografia do perfil longitudinal da fibra com ampliação de 620x.

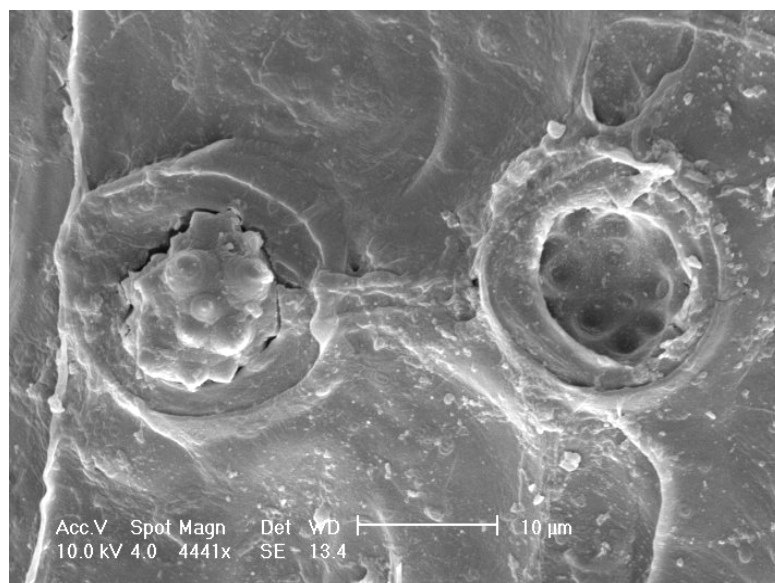


Figura 4.2 - À esquerda, um microgrão, e à direita, baixo relevo impresso por outro na superfície da fibra com ampliação de 4441x.

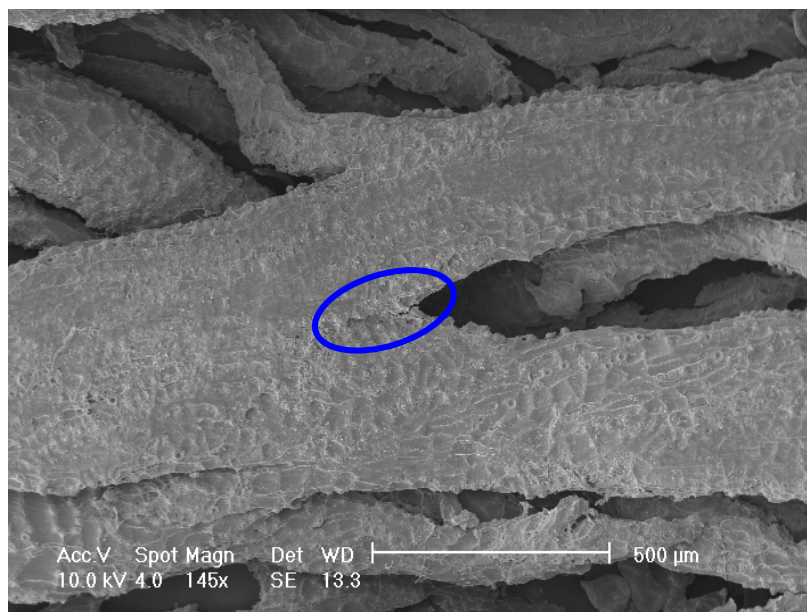


Figura 4.3 - Fibra com configuração longitudinal em “Y” e encontro dos prolongamentos com fissura (no detalhe) com ampliação de 145x.

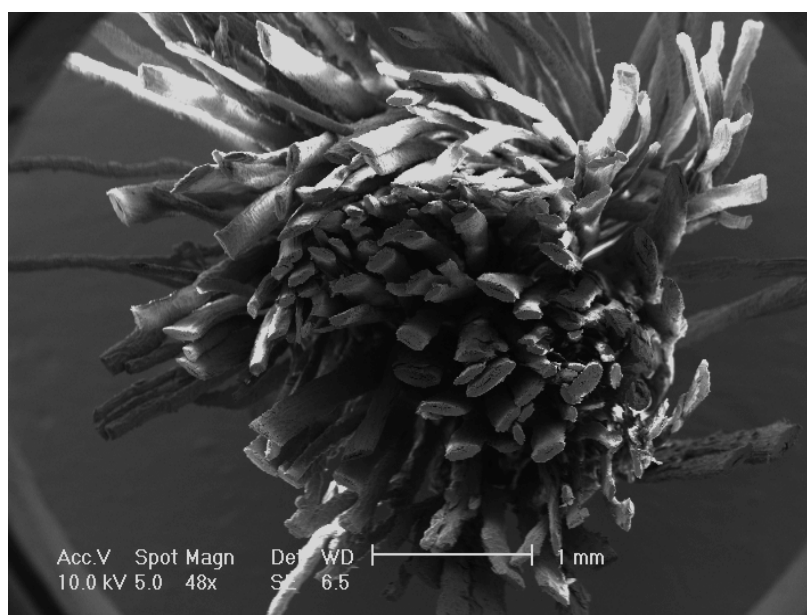


Figura 4.4 - Visão geral da Amostra I (secção transversal) com ampliação de 48x.

Na Figura 4.5, com uma ampliação maior, pode-se ver que as secções transversais obtidas estão bem próximas das seções originais, tendo então sofrido pouca deformação em função do corte, a não ser pela possível criação de vazios em volta do lume com maior prolongamento na direção axial.

Na micrografia da Figura 4.6, pode-se ver parte do lume – no lado esquerdo da imagem, sobreposta por cima e por baixo por aglomerados de microfibrilas (cadeia polimérica de celulose linear). Isso indica que nesse ponto houve a mudança da posição do corte em

relação ao eixo do lume, passando do lado espacial posterior ao plano do papel para o lado espacial entre o plano do papel e o leitor.

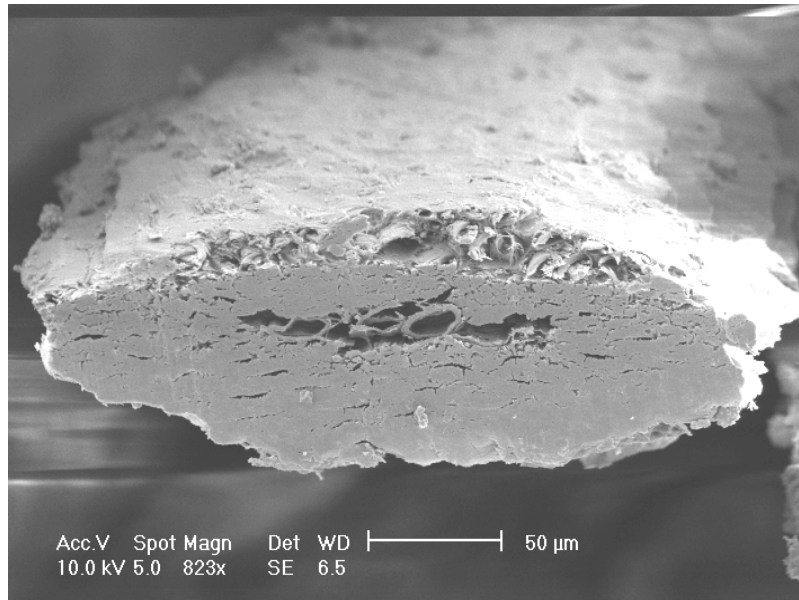


Figura 4.5 - Seção transversal (Amostra I) com ampliação de 823x.

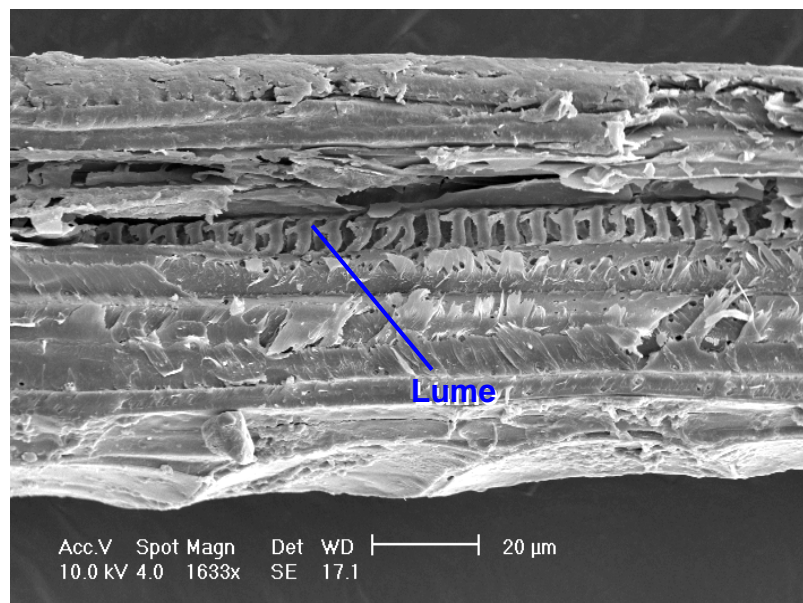


Figura 4.6 – Lume a partir da seção longitudinal (Amostra II) com ampliação de 1633x.

Na Figura 4.7, pode-se ver as camadas de microfibrilas compreendidas entre intervalos da altura da fotomicrografia. Esta imagem corresponde à mesma região da secção longitudinal da Figura 4.6, com camadas de microfibrilas visíveis na parte inferior, diferenciadas pela alteração da orientação das fibrilas.

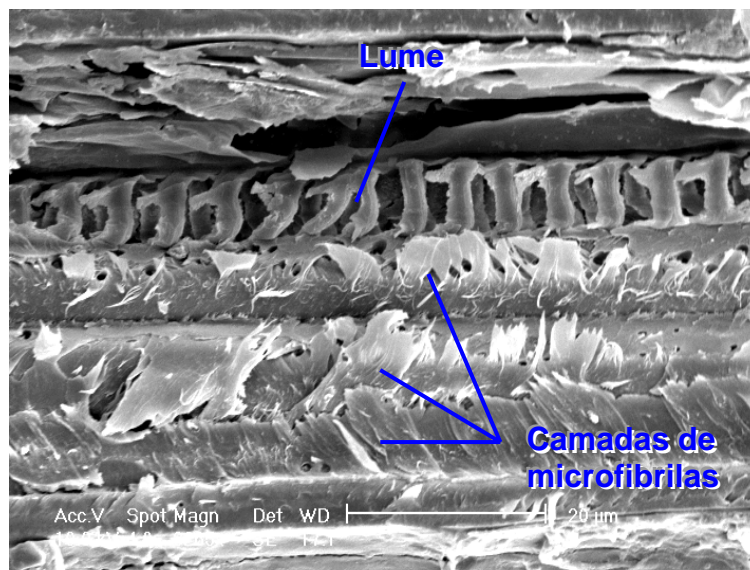


Figura 4.7 – Detalhe do lume cortado longitudinalmente e camadas de microfibrilas visíveis na parte inferior com ampliação de 3265x.

Na micrografia da Figura 4.8 pode-se notar um trecho do lume que foi extraído quase que intacto da sua situação natural, onde se pode notar o comportamento espiralado do mesmo, traduzindo a direção helicoidal de desenvolvimento deste.

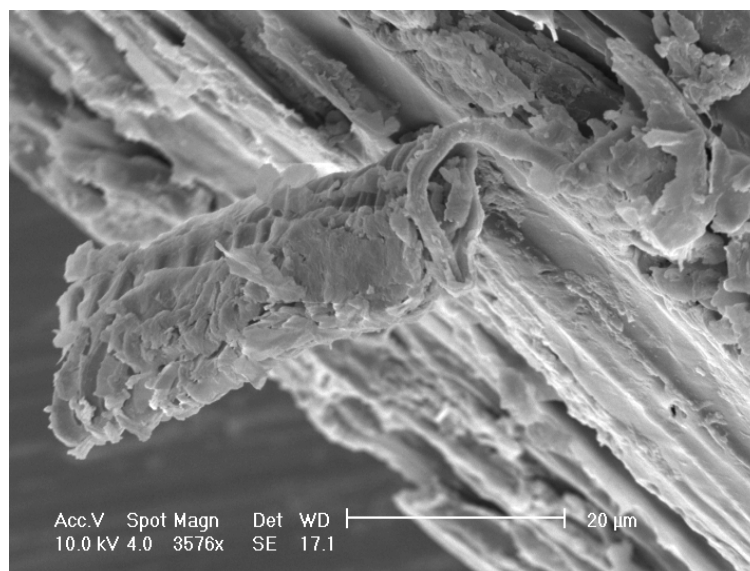


Figura 4.8 - Trecho do lume “suspenso” e evidência do comportamento espiralado, com aumento de 3576x.

A Figura 4.9 apresenta, de forma infográfica básica, a proposta de estrutura morfológica lignocelulósica interna, simplificada, da fibra de semente de açaí, não estando representados no desenho os detalhes superficiais e as variações de orientação longitudinal da fibra.

Concebeu-se o desenho a partir da projeção da secção transversal elíptica na terceira dimensão e a abstração matemática geométrica encontra-se na Figura 4.9 nas formas de F_1 e F_2 , os focos da elipse, e de D e d , diâmetro maior e diâmetro menor, respectivamente. Entretanto, é válido ressaltar que as secções naturais reais destas fibras não são perfeitamente elípticas, sendo mais achatadas que estas e não possuindo, portanto, as constantes matemáticas de focos e diâmetros de elipse, o que levou a adoção de outras referências dimensionais que serão expostas em 4.1.2.5. Em 3D idealizou-se cortes retangulares perfeitos das camadas, desde a camada superficial até a camada adjacente ao lume, separadas neste intervalo por várias camadas de microfibrilas orientadas em espiral.

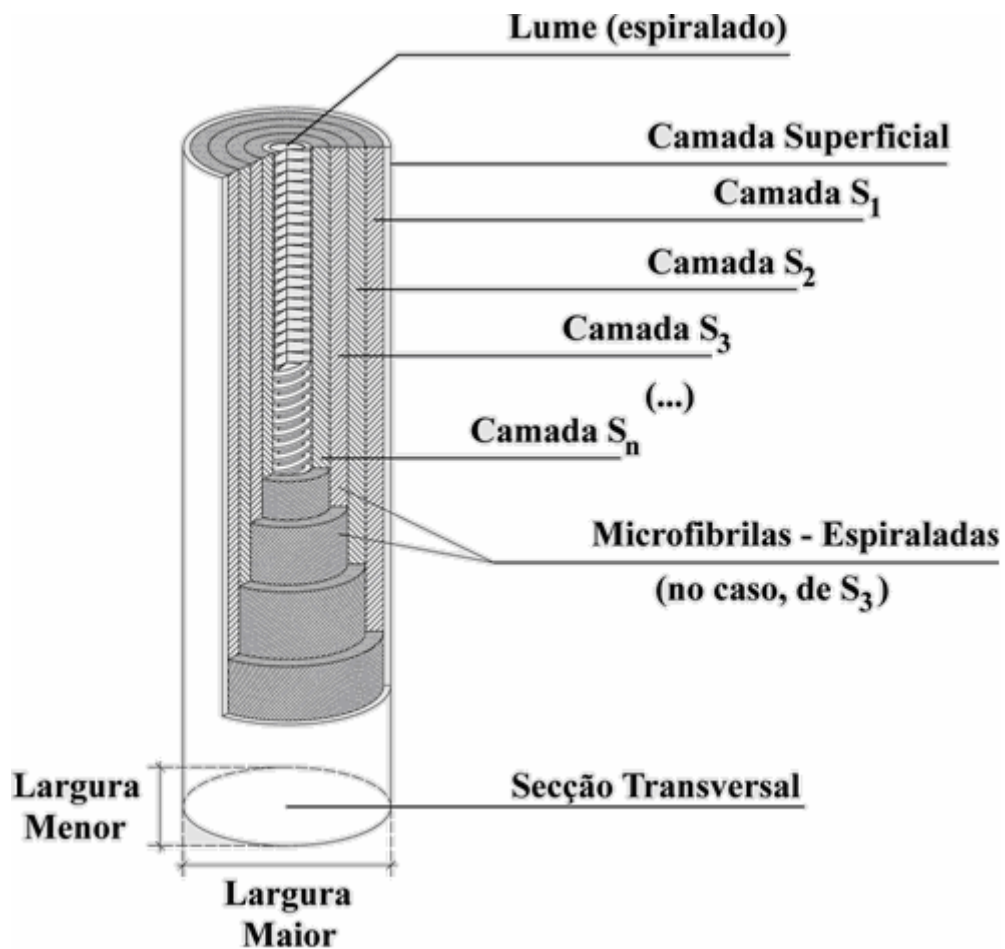


Figura 4.9 - Representação esquemática proposta da estrutura morfológica interna simplificada das fibras de açaí.

4.1.2 – Propriedades Físico-Químicas

4.1.2.1 – O pH

Conforme descrito em 3.1.2.1, foi determinado o pH da fibra da semente do açazeiro por colorimetria, a partir da coloração da solução onde as fibras ficaram imersas durante o ensaio comparou-se com gradiente de cores e obteve-se o pH igual a 6 (seis). A Figura 4.10 mostra a coloração da solução resultante da submissão das fibras ao ensaio prescrito pela NBR 7220^[48]. Assim, pode-se inferir que se trata de uma fibra de baixa alcalinidade. Há indicações, a partir disto, que um tratamento químico de ataque à lignina provavelmente reduziria ainda mais a alcalinidade das fibras, visto que a fibra pós-tratamento seria constituída em sua maior parte de celulose.



Figura 4.10 – Fibras submetidas ao ensaio de pH segundo a NBR 7220/1987.

4.1.2.2 – Termogravimetria

A Figura 4.11 mostra a curva termogravimétrica para a fibra da semente de *Euterpe oleracea*. Alguns comentários iniciais sobre as reações específicas desta fibra serão discutidos a seguir, levando-se em consideração curvas de outra fibra lignocelulósica, o sisal, muito utilizada como reforço para materiais de engenharia.

Já que as fibras analisadas não sofreram nenhum tipo de tratamento que não a lavagem em água corrente, outros materiais não-celulose compõem a amostra. Os fenômenos implícitos na curva termogravimétrica da Figura 4.11 incluem processos de degradação de celulose, hemicelulose, lignina e pectina, entre outros materiais constituintes dos vegetais em geral, além de açúcares e outros, devido às fibras de açaí serem provenientes do mesocarpo, onde se encontra a polpa frutífera.

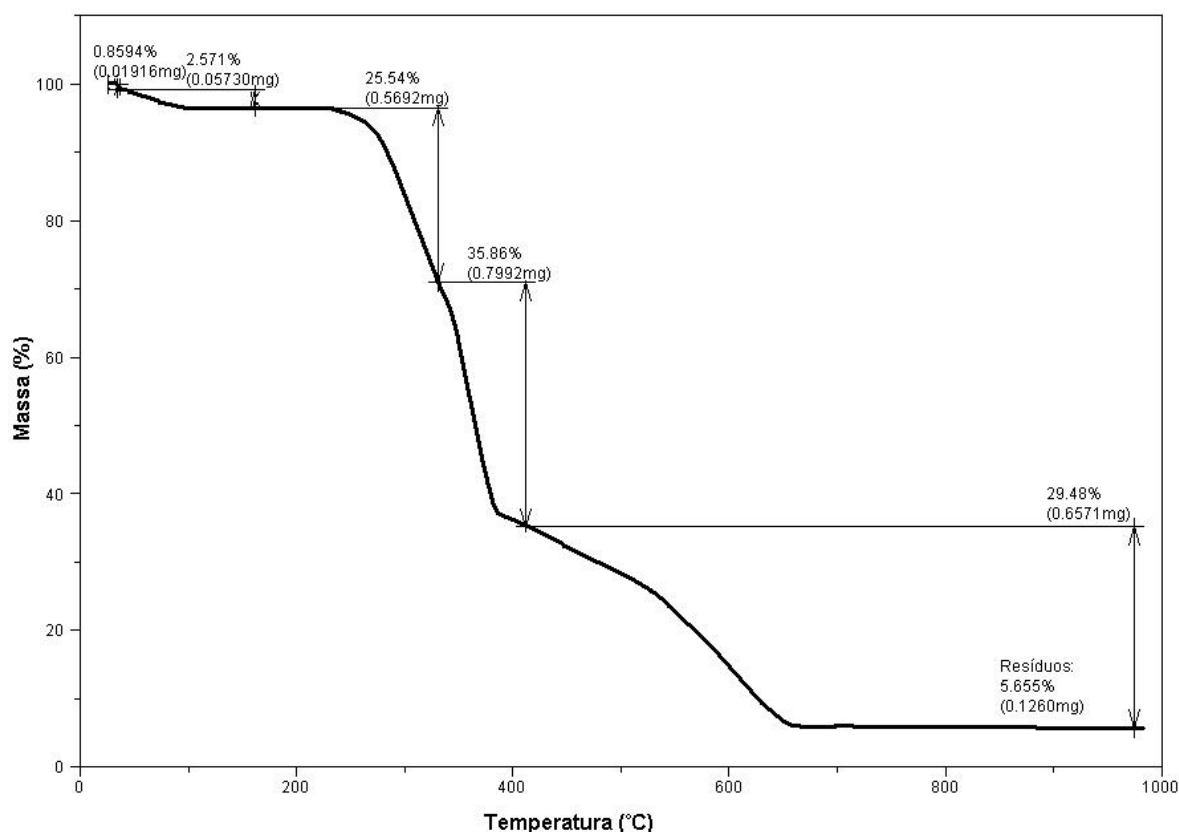


Figura 4.11 - Curva termogravimétrica para a fibra da semente do açaízeiro.

Assim como na curva termogravimétrica para o sisal, de trabalho publicado por Monhnacz et al.^[58], observa-se pelo menos três estágios de degradação em ambas as curvas. Após a remoção da umidade, o primeiro estágio está relacionado com a degradação superficial, pertinente à parede celular mais externa (com poucas microfibrilas de celulose em uma matriz mais volumosa de lignina e hemicelulose, basicamente^[59]). A decomposição do material celulóxico (presente em maior parte^[59]) na curva do açaí se dá após os 350°C e na curva do sisal a partir dos 360°C.

Nas duas curvas termogravimétricas supramencionadas observa-se, além dos estágios final e inicial, uma subdivisão no intervalo entre os estágios extremos por uma variação

relativamente abrupta do coeficiente angular da curva, i.e. alteração da cinética de degradação. Contudo, Monhnacz et al., opus citatum, detectaram que as fibras de sisal submetidas a tratamento químico superficial apresentam maior resistência térmica, o que leva à suposição de que para as fibras de açaí, o tratamento, além da possibilidade real do aumento, contribuiria para uma melhor definição do comportamento termogravimétrico do material, visto que o tratamento químico removeria parcelas de material não-celulose. Todavia o presente trabalho não contemplou estudos pertinentes a tratamentos químicos precipuamente, nem de forma paralela ao objetivo principal desta pesquisa, por questões de praticidade e por não dispor de um tempo mais extenso e verba para pesquisas mais avançadas.

Pode-se observar ainda na Figura 4.11, que a maior parcela de material tem sua degradação iniciada com mais de 300°C, o que leva ao fato de que estas fibras de açaí apresentam razoável resistência térmica até a degradação total (cerca de 650°C), superior inclusive às de sisal obtidas por Monhnacz et al.^[58] (vide Anexo 1).

4.1.2.3 – Espectrometria de Infravermelho

O espectro obtido a partir da exposição das fibras de açaí à radiação infravermelha encontra-se apresentado na Figura 4.12. A presente análise foi idealizada para uma simples identificação de ligações químicas comuns aos materiais lignocelulósicos, e.g. celulose, hemicelulose e lignina.

Como comentado no Capítulo II, a celulose é composta por meros de anidro-glicose. Dentre os polímeros naturais amorfos presentes nas plantas terrestres, encontra-se a lignina, que é formada pela polimerização dos álcoois cumarílico, coniferílico e sinapílico, a variação da proporção resulta diferentes tipos de lignina. Também se encontra a hemicelulose (“meia celulose”), que é um polissacarídeo da parede celular primária e constituída de uma mistura de polímeros de hexoses, pentoses (com fórmulas gerais de $C_5H_8O_4$ e $C_6H_{10}O_5$) e ácidos urônicos^[23, 59].

A presença do reforço (celulose) e da matriz naturais (lignina, hemicelulose e pectina) no espécime ensaiado pode ser inferida a partir do estudo dos picos representados na Figura 4.12. Em função da vibração molecular da hidroxila (OH) do mero celulósico ocorrer inclusive com número de onda de 3.200 a 2.500 cm^{-1} , possivelmente o pico P_1 (2.862 cm^{-1}) atesta a presença da hidroxila da celulose. A banda de 1.760 a 1.710 cm^{-1} (P_2) se refere à ligação C=O de ácidos carboxílicos (hemicelulose). A banda de 1.600 a 1.450 cm^{-1} (P_3 , forte)

se refere à ligação C=C de aromáticos (lignina). A banda de 1.400 a 1.200 cm^{-1} , se refere à ligação C-O também de ácidos carboxílicos. Entretanto, nenhuma informação foi encontrada na literatura consultada^[60, 61, 62] para o número de onda referente ao pico P5 (1.014 cm^{-1}).

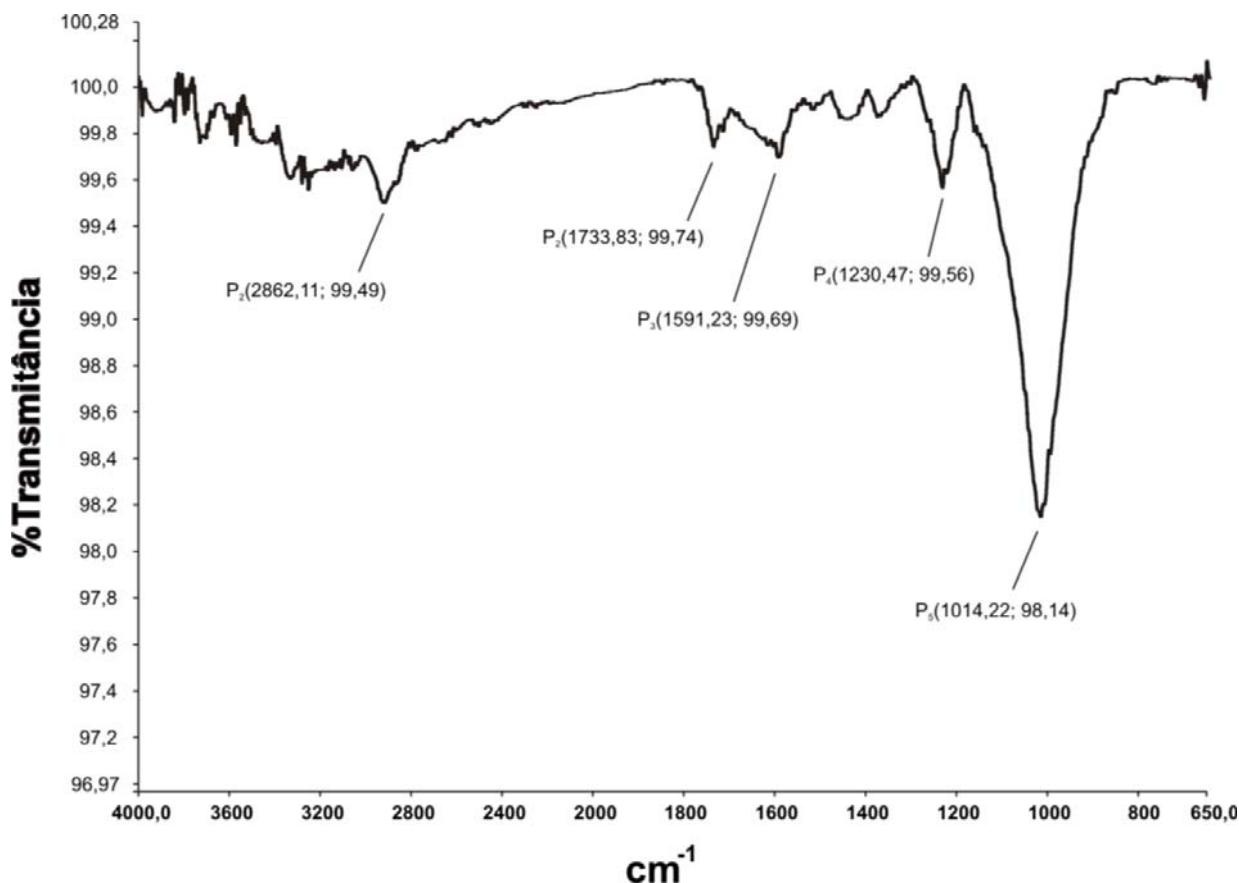


Figura 4.12 – Espectro de infravermelho das fibras da semente do açaí.

4.1.2.4 – Massa Específica

As três repetições do ensaio de imersão de 1 g de fibra em 15 mL de álcool etílico apontaram o mesmo deslocamento visual, com o menisco do nível do líquido imediatamente abaixo de 16,0 mL, na proveta com resolução de 0,5 mL, i.e. um deslocamento de aproximadamente 0,9 mL. Já para o caso da proveta com resolução de 0,1 mL, a quantidade de 0,5 g de fibra em 6,0 mL de álcool, também com o mesmo valor para as três repetições, resultou no deslocamento do nível de líquido para a linha intermediária entre as marcas de 6,4 e 6,5 mL, i.e. cerca de 0,45 mL. Tais valores se confirmam a partir da relação de 1 : 2 entre as resoluções das duas provetas utilizadas.

A partir do valor de deslocamento volumétrico de ambas provetas, idêntico em todas as três repetições de cada, foi então estimado que as fibras da semente do açazeiro possuem uma massa específica levemente mais elevada que a da água, em torno de $1,11 \text{ g/cm}^3$ ($d = 1,11 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$).

4.1.2.5 – Dimensões Médias

As dimensões da seção transversal para as fibras de açai, determinadas conforme descrito na seção 3.4.2, estão exemplificadas na Figura 4.13. Nesta figura, apresenta-se a imagem obtida no MEV (Figura 4.13-A), a apropriação em desenho vetorial (Figura 4.13-B), o cálculo das larguras maior “L” e menor “l” para a fibra (Figura 4.13-C), diâmetro de lume maior “D” e menor “d”, área da seção transversal para a fibra (Figura 4.13-E) e para o lume (Figura 4.13-F). Foram efetuadas 50 mensurações para cada dimensão da seção transversal.

Devido à proximidade do formato da seção transversal a uma elipse achatada, adotou-se a largura média da fibra, dada pela média das larguras maior “L” e menor “l” (Figura 4.13), por tal elipse deformada não ser passível de apropriação matemática. Esta adoção idealizou as dimensões virtuais de uma seção circular média para a fibra real.

A determinação do comprimento médio, também a partir do *software* CAD, está exemplificada na Figura 4.14, onde se vê à esquerda a imagem fotodigitalizada (escaneada) de fibras afixadas com cola em papel milimetrado (Figura 4.14-A) e a mesma, com as cores invertidas, apropriada vetorialmente com as medidas (Figura 4.14-B).

A Tabela 4.1 apresenta as dimensões médias da fibra de açai, as amostragens e tratamentos estatísticos destas médias estão dispostos nos Apêndices A e B.

O comprimento médio das fibras da presente amostragem foi de 18,41 mm, variando de 11,17 a 25,27 mm. A classe de maior frequência (24%) foi de 22,92 a 25,27 mm, com uma moda de 20,57 mm e mediana de 18,22 mm.

A classificação das fibras, tradicionalmente feita do ponto de vista papeleiro, denomina de “fibras muito longas” quando estas possuem comprimento médio entre 2 e 5 mm^[50]. O histograma da frequência da classificação do comprimento da fibra de açai (Figura 4.15) extrapola tais medidas para todas as classes da amostragem. Entretanto, na recente literatura de fibras vegetais abordadas como material de reforço para compósitos, a fibra de açai se encontra na classe das fibras curtas. Concomitantemente, o intervalo de fibras curtas se aproxima do máximo considerado para produção de papel para a Ciência dos

Materiais, acordando com a Engenharia de Materiais, onde fibras que não atravessam toda uma direção do compósito são denominadas descontínuas (curtas) ^[13], conforme o tratado em 2.1.3.2.

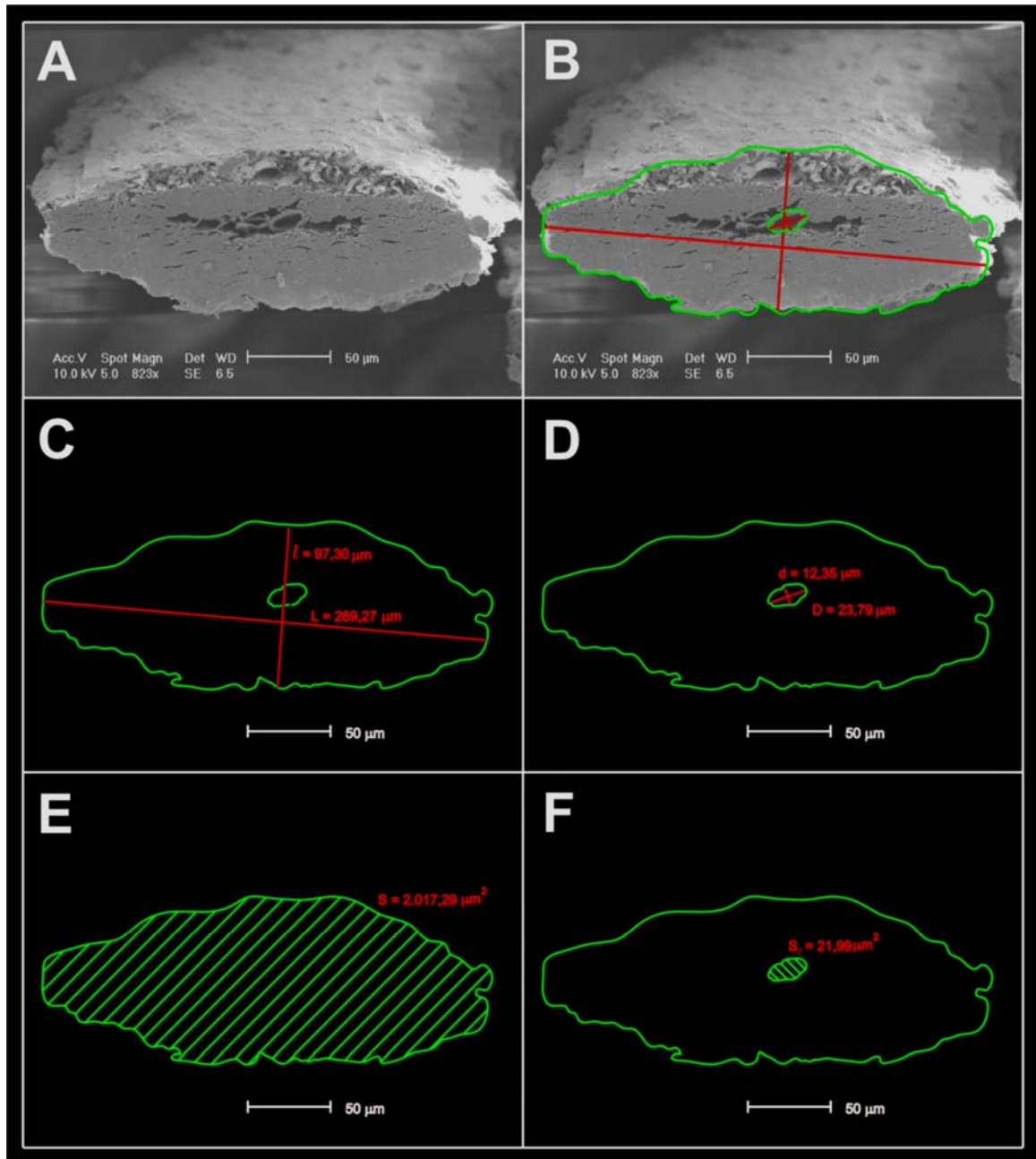


Figura 4.13 – Algumas dimensões possíveis determinadas com auxílio de *software* CAD. (A) Fibra real, (B) fibra virtual, (C) larguras médias da seção, (D) larguras médias do lume, (E) área da seção da fibra e (F) área da seção do lume.

A classificação tradicional, quanto à largura, visa correlacionar tal dimensão com a resistência ao arrebentamento. Entretanto, esta propriedade só é válida para produtos papeleiros, pois o comprimento das fibras é induzido a padrões ^[50]. Para o caso de compósitos

cimentícios, a largura não tem significado prático, a não ser sua relação às outras dimensões, caracterizando sua esbeltez. A largura média encontrada da fibra de açaí foi de 129,93 μm . A presente amostragem constatou uma largura mínima de 73,54 μm e máxima de 227,32 μm , sendo que a maior frequência ocorreu entre 124,80 e 150,43 μm , com moda de 133,34 μm .

O diâmetro de lume também não tem significado prático, porém interessa para a determinação da espessura de parede, que é dada pela metade da diferença entre a largura da fibra e o diâmetro de lume, resultando no raio da seção transversal efetiva das microfibrilas de celulose. O diâmetro de lume e a espessura de parede para a fibra oriunda do açaizeiro nesta amostragem foram de 12,75 e 58,60 μm , respectivamente. Os outros valores encontrados foram: mínimos de 7,28 e 21,92 μm , máximos de 33,05 e 102,71 μm , moda de 12,65 e 60,14 μm e mediana de 12,54 e 150,43 μm , para o diâmetro de lume e a espessura de parede, respectivamente.

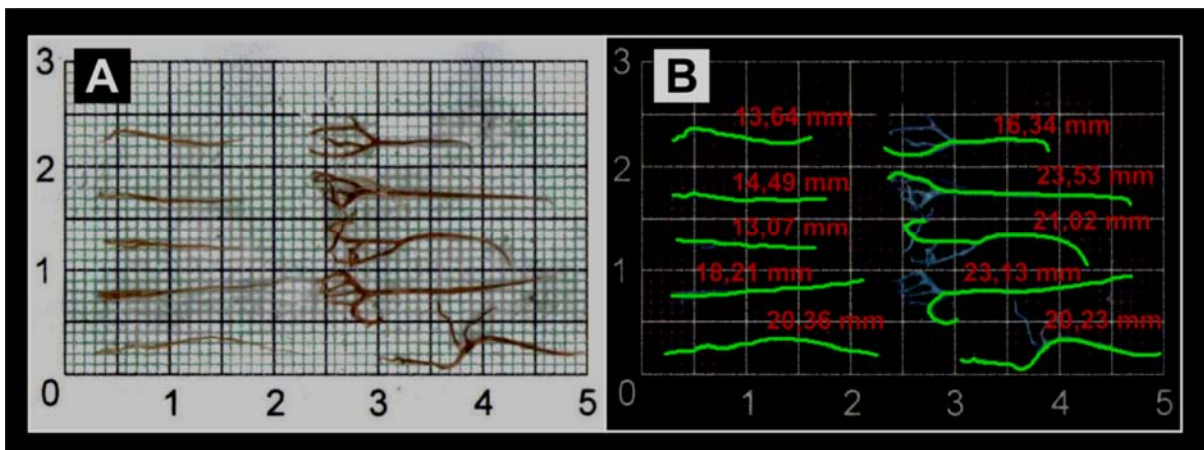


Figura 4.14 – Imagem escaneada das fibras no papel milimetrado e dimensões obtidas em *software* CAD. (A) Fibras dispostas no papel milimetrado e (B) dimensões sobre o negativo da imagem.

Tabela 4.1 – Dimensões das fibras de açaí.

Dimensões	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
Comprimento (mm)	18,41	4,38	23,79
Largura (μm)	129,93	35,21	27,10
Diâmetro de lume (μm)	12,75	3,34	26,20
Espessura da parede (μm)	58,60	15,95	27,22

Os valores dos desvios padrão e dos coeficientes de variação obtidos, estão coerentes com resultados tidos como satisfatórios na literatura correlata às fibras vegetais abordadas como material de reforço de compósitos.

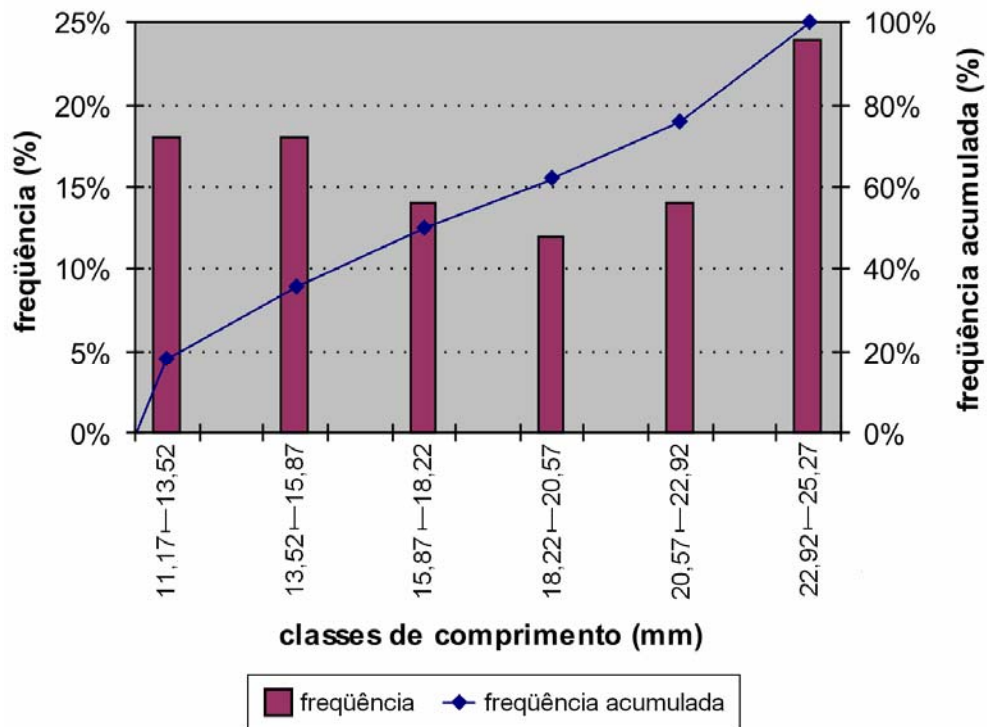


Figura 4.15 – Histograma da frequência da classificação do comprimento da fibra de açaí.

4.1.2.6 – Coeficiente de Flexibilidade, Índice de *Runkel*, Índice de Enfeltramento e Fração Parede

Outros parâmetros relacionados às dimensões das fibras, normalizados e tradicionalmente determinados para as fibras utilizadas na produção papelreira, estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Relações entre as dimensões da fibra de açaí.

Parâmetros	Média
Coeficiente de flexibilidade (CF)	9,81
Índice de Runkel (IR)	9,19
Índice de enfeltramento (IE)	141,69
Fração parede (FP)	90,20

Onde:

$$CF = (DL \div L) \times 100$$

$$IR = (2 \times E) \div DL$$

$$IE = (C \div L) \times 1000$$

$$FP = [(2 \times E) \div L] \times 100$$

Sendo:

C = Comprimento da fibra (mm);

L = Largura da fibra (μm);

E = Espessura da parede da fibra (μm); e

DL = Diâmetro do lume da fibra (μm).

Como fibras com frações de parede acima de 60 são consideradas muito rígidas, no caso da fibra de açaí com fração parede maior que 90%, esta é extremamente rígida. Este resultado é confirmado pelo seu baixo coeficiente de flexibilidade, menor que 10%.

O índice de Runkel é apropriado para características papeleiras, onde valores entre 0,25 e 0,50 (razões percentuais) são considerados excelentes para a fabricação de papel, pois significa que quanto menor tal parâmetro, maior o potencial de ligação entre as fibras. Para os compósitos cimentícios, as fibras não necessitam se ligar entre si, portanto o elevado índice de Runkel das fibras de açaí (que extrapola cerca de 9 vezes a unidade) atesta tal propriedade deste reforço.

Pode-se citar ainda o alto índice de enfiamento, que deve ser observado quando da dispersão do material na fase de mistura, o que justifica a opção da substituição da ordem de adição de fibras à mistura definida na seção 3.2.2.1 pela da seção 3.2.2.2.

4.2 – Propriedades dos Compósitos

4.2.1 – Propriedades Físicas

4.2.1.1 – Massa Específica, Porosidade Aparente e Absorção de Água

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam as médias, de três corpos-de-prova para cada traço, das propriedades físicas dos compósitos produzidos na primeira e na segunda etapa deste trabalho, juntamente com os respectivos desvios padrão (*dp*). Deve-se atentar para o fato de que os resultados da Tabela 4.3 foram obtidos a partir de corpos-de-prova prismáticos e os da

Tabela 4.4 a partir de cilíndricos, por isso a grande diferença nos valores das massas. Os resultados individuais para ambas as bateladas são apresentados no Apêndice C.

Tabela 4.3 – Massa Específica, Porosidade Aparente e Absorção de Água da Primeira Batelada de Compósitos.

Mistura Corpo-de-prova	Massa Seca (g)	dp	Massa Saturada (g)	dp	Massa Imersa (g)	dp	Absorção De Água (%)	dp	Porosidade Aparente (%)	dp	Massa Específica (g/cm ³)	dp
01ARG (0% de fibras)	837,48	2,97	921,66	1,40	496,67	0,50	10,05	0,20	19,81	0,42	1,97	0,00
02MIN (0,3 % de fibras)	803,33	1,79	913,83	1,56	485,17	1,04	13,76	0,14	25,78	0,22	1,87	0,00
03MAX (0,6 % de fibras)	831,83	5,88	934,00	3,35	500,50	2,05	12,29	0,76	23,57	1,29	1,92	0,00

Tabela 4.4 – Massa Específica, Porosidade Aparente e Absorção de Água da Segunda Batelada de Compósitos.

Mistura Corpo-de-prova	Massa Seca (g)	dp	Massa Saturada (g)	dp	Massa Imersa (g)	dp	Absorção De Água (%)	dp	Porosidade Aparente (%)	dp	Massa Específica (g/cm ³)	dp
T100F (0% de fibras)	387,68	0,57	408,25	0,69	212,00	0,69	5,31	0,10	10,48	0,00	1,98	0,00
T203F (0,3 % de fibras)	388,54	1,46	407,24	1,22	211,00	1,21	4,81	0,10	9,53	0,20	1,98	0,00
T304F (0,4 % de fibras)	337,70	0,99	405,87	1,34	209,62	1,34	20,19	0,10	34,74	0,17	1,72	0,00
T405F (0,5 % de fibras)	336,05	0,69	404,77	2,04	208,52	2,04	20,45	0,39	35,01	0,62	1,71	0,10

A partir dos dados obtidos e expostos para a Primeira Batelada (Tabela 4.3) percebe-se uma provável redução de *massa seca* dos traços de 0% para 0,3%. Que se poderia especular que reduziria mais para maior teor de fibra, hipótese descartada pelo traço de 0,6%, que, porém, apresenta relativo alto desvio padrão deste. Já para o caso da Segunda Batelada (Tabela 4.4) a redução de massa é factível nos intervalos das médias dos corpos-de-prova de 0 a 0,3% para os de 0,4 a 0,5% e seus desvios padrão são relativamente mais proporcionais que os dos dados da Primeira.

Para os valores de *massa saturada* percebe-se exatamente o mesmo do observado para *seca*. Com uma redução na Primeira Batelada dos espécimes com fibras de 0 para 0,3%, seguida de aumento de massa para 0,6%, inclusive com similaridades e hipóteses retro observadas quanto ao relativo alto desvio padrão para o traço com máximo teor de fibra (03MAX). E para a Segunda há, identicamente, redução linear nos intervalos de 0 a 0,3% para 0,4 a 0,5%.

Repetem-se para *massa imersa* as mesmas ocorrências de *seca* e *saturada*, com os mesmos comportamentos e observações anteriores.

Já para os valores de *absorção de água* pode-se especular um provável aumento desta propriedade em função de maiores teores de fibra. Na Primeira Batelada este aumento ocorre de 0% (01ARG) para o teor mínimo de 0,3% (02MIN), seguido de redução para o máximo de 0,6% (03MAX). Mas este decréscimo é apropriado de valores obtidos muito próximos, considerando-se seus desvios padrão. Já no caso da Segunda Batelada, pode-se cogitar os mesmos comportamentos de aumento de *absorção de água* da Primeira, em função do aumento do teor de fibra, entretanto os valores próximos estão dispostos para a referência (T100F) e para o traço com menos fibra (T0203F).

Para os valores de *porosidade aparente* das Primeira e Segunda Bateladas repetem-se as mesmas ocorrências de *absorção de água* de ambas as etapas, com os mesmos comportamentos dos quatro traços. Aumentando-se o teor de fibra, aumenta-se a *absorção de água* dos compósitos, com as mesmas observações da porosidade.

Nota-se também que as *massas específicas* das referências nos dois casos são muito próximas. Todavia, para os compósitos da Segunda Etapa de produção, percebe-se que a *massa específica* para a referência (T100F) e o espécime com menor teor de fibra (T103F, 0,3%) foi idêntica, diferentemente da Primeira Batelada para estes traços (no caso 01ARG, 0%; e 02MIN, 0,3%). Muito provavelmente nos corpos-de-prova da Primeira esses valores são diferentes em função da relativa alta porosidade, reduzida para quase metade na Segunda, que incorreu num corpo mais adensado. Por isso, pode-se supor que neste último caso, i.e. para um material mais consistente, o teor de fibras reduzido não influencia de forma significativa na *massa específica* do compósito cimentício.

A análise dos valores de *absorção de água* e de *porosidade aparente* também deixa claro que houve redução significativa, de praticamente 50% para o caso das referências e dos traços com teor de fibras de 0,3% em ambas as bateladas.

A partir das observações supra, supõe-se que o aumento do teor de fibras incorre no aumento da *absorção de água* e da *porosidade aparente* e a diminuição da *massa específica*. Teoricamente estes efeitos são relacionados à menor massa específica da fibra e do aumento da porosidade decorrente do acréscimo de fibras à mistura.

4.2.2 – Propriedades Mecânicas

4.2.2.1 – Resistência à Compressão Simples

A resistência à compressão axial média, estatística, para cada mistura produzida está apresentada na Tabela 4.5 para os compósitos da Primeira Batelada. Os valores individuais dos resultados dos ensaios encontram-se nos Anexos 2, 3, 4, 5, 6 e 7.

Tabela 4.5 – Resistência à Compressão Axial da Primeira Batelada de compósitos.

Mistura Corpo-de-prova	Carga de Ruptura (kgf)		Resistência à Compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
01ARG (0% de fibras)	11.889	12.430	59,37	62,08
02MIN (0,3 % de fibras)	10.595	12.246	52,89	61,16
03MAX (0,6 % de fibras)	9.883	11.423	49,36	57,05

A partir dos resultados de resistência à compressão da Tabela 4.5, da referência (01ARG) e das mistura com 0,3% de fibras (02MIN) e com 0,6% (03MAX), pode-se verificar uma pequena redução da tensão limite de compressão dos compósitos com o reforço, tanto nos corpos-de-prova rompidos aos sete dias como nos aos vinte e oito dias.

Pode-se observar que a redução na resistência à compressão é um pouco maior quando do aumento de teor de fibra. Todavia, em se tratando de fibrocimento, tais reduções não são significativas a ponto de comprometerem o desempenho precípua deste tipo de material.

A resistência à compressão ^[53, 54] obtida para os compósitos produzidos na segunda etapa deste trabalho está apresentada na Tabela 4.6, o relatório gerado pelo equipamento de ensaio encontra-se nos Anexos 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 e 15.

Observou-se também uma tendência similar à obtida com a Primeira Batelada de corpos-de-prova (Tabela 4.5), ou seja, uma redução na resistência à compressão para as misturas com 0,3% de fibras (Traço 2 - 03F), 0,4% (Traço 3 - 04F) e 0,5% (Traço 5 - 05F) com 28 dias, em relação à referência (Traço 1 - 00F) sem fibras, aos vinte e oito dias de idade. Entretanto, tal comportamento de redução não ocorreu nos corpos-de-prova ensaiados aos sete dias de idade. Todavia, pode-se especular que nessa idade os materiais fibrocimentícios ainda experimentavam o processo de cura incipiente. Salienta-se que o desvio padrão nos valores da carga de ruptura determinada experimentalmente foi relativamente grande em função da não

uniformidade de dispersão das fibras na matriz em função do processo de produção dos compósitos ser manual, o que pode explicar o fato que os valores da resistência à compressão para os corpos-de-prova aos vinte e oito dias de idade terem apresentado resistência à compressão inferior aos sete dias.

Tabela 4.6 – Resistência à Compressão Axial da Segunda Batelada de compósitos.

Mistura <i>Corpo-de-prova</i>	Carga de Ruptura (kgf)		Resistência à Compressão (MPa)	
	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
T100F <i>(0% de fibras)</i>	10.242	9.949	51,15	49,69
T203F <i>(0,2 % de fibras)</i>	8.349	10.200	41,70	50,94
T304F <i>(0,3 % de fibras)</i>	8.694	6.246	43,42	31,19
T405F <i>(0,4 % de fibras)</i>	8.769	5.042	43,79	25,18

De acordo com os dados apresentados nas tabelas anteriores, as misturas 02MIN e T203F, ambas com 0,3% de fibras de açaí, apresentaram melhor desempenho à compressão simples. Este fato é de grande valia para a análise da viabilização da utilização destas fibras como reforço de matrizes cimentícias, pois a inclusão de qualquer material em cimentos que desempenham resistência à compressão com excelência geralmente causa uma redução da resistência à compressão deste material. Como a resistência à tração é a propriedade mecânica mais importante para compósitos cimentícios reforçados com fibras, será tratada em separado na seção 4.2.2.2.

Em relação às amostras de referência da primeira (01ARG) e da Segunda Batelada (T100F), há uma diferença de cerca de 10 MPa na resistência que provavelmente se deve ao fato da diferença do cimento Portland empregado em cada batelada (CP-IV e CP-II-Z, respectivamente) e ao processo de produção manual.

A Figura 4.16-A mostra os corpos-de-prova dos três traços da Primeira Batelada, misturas 01ARG, 02MIN e 03MAX (teores de 0%, 0,3% e 0,6% nesta ordem) após o rompimento em compressão simples aos sete dias e 4.16-B que ilustra o desempenho das fibras nas regiões próximas às fissuras. Os espécimes sem fibra (01ARG) romperam-se, em vários pedaços, de forma abrupta. As amostras com reforço de fibra de açaí mantiveram-se menos fragmentadas após o ensaio, devido à presença de fibras que formam pontes unindo seções de matriz, minimizando o desempenho quebradiço frágil nas regiões imediatas às

fissuras. Na Figura 4.16-B tem-se o detalhe desse desempenho atribuído às fibras do corpo-de-prova 3 da mistura 02MIN.

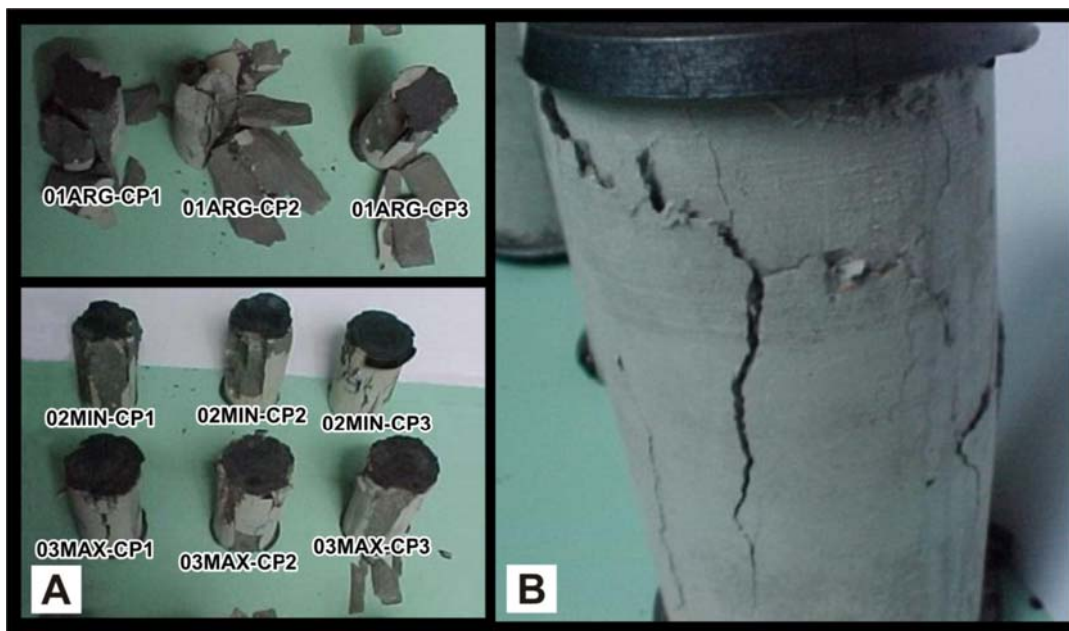


Figura 4.16 – Corpos-de-prova Rompidos em Compressão (A) e Detalhe do Desempenho das Fibras de 02MIN-CP3 (B).

4.2.2.2 – Resistência à Tração na Flexão

A resistência à tração na flexão (NBR 12142/1991) ^[56] média para os diferentes tipos de compósitos produzidos na Primeira Batelada do presente trabalho, está apresentada na Tabela 4.7. Valores individuais obtidos neste ensaio encontram-se no Anexo 16.

Observa-se de acordo com os dados da Tabela 4.7 que houve incremento da resistência à tração apenas para o caso da mistura com 0,6% de fibras (03MAX). Todavia os valores de resistência à tração muito próximos e desvios padrões muito altos impossibilitam uma análise clara, pois nota-se que para o teor mínimo de fibras de 0,3% (02MIN) há redução dessa resistência em relação à referência (01ARG) sem fibras, afastando-se de uma linearidade para se abstrair graficamente. Em suma, os dados obtidos neste ensaio são insuficientes para se especular sobre o comportamento de resistência à tração na flexão (NBR 12142 e ASTM C293/1994) dos compósitos. Conforme descrito em 3.2.2.1 não foram efetuados rompimentos deste ensaio aos 28 dias de idade dos corpos-de-prova produzidos.

Tabela 4.7 – Resistência à Tração na Flexão aos 7 dias de Idade.

Mistura <i>Corpo-de-prova</i>	Dimensões			Resistência À Tração (MPa)
	Base (mm)	Altura (mm)	Comprimento (mm)	
01ARG (0% de fibras)	50	51	170	5,74
02MIN (0,3 % de fibras)	50	51	170	5,15
03MAX (0,6 % de fibras)	50	51	170	5,82

4.2.2.3 – Resistência à Tração por Compressão Diametral

A Tabela 4.8 apresenta as resistências à tração por compressão diametral (NBR 7222/1994)^[57] médias para cada uma das misturas produzidas na segunda etapa deste trabalho. Os valores individuais encontram-se nos Anexos 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24.

Tabela 4.8 – Resistência à Tração por Compressão Diametral.

Mistura <i>Corpo-de-prova</i>	Dimensões		Carga de Ruptura (kgf)		Resistência à Tração (MPa)	
	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	7 dias	28 dias	7 dias	28 dias
T100F (0% de fibras)	50	100	2.212	2027	28,18	25,82
T203F (0,3 % de fibras)	50	100	2.683	2317	34,17	29,52
T304F (0,4 % de fibras)	50	100	2.356	2300	30,01	29,30
T405F (0,5 % de fibras)	50	100	2.523	2212	32,14	28,18

Para todos os compósitos com fibra de açai atesta-se um importante aumento da resistência à tração. Sendo que, em relação à referência, com valores menores para os quatro traços T1, T3, T4 e T5 e o maior valor para o caso do Traço 2 (T203F, com teor de 0,3% de fibra). Logo, pode-se supor que o emprego da fibra da semente do açazeiro como reforço de compósitos cimentícios incrementa o desempenho mecânico destes materiais quanto à resistência à tração, o que viabiliza o uso desse reforço vegetal de fibrocimentos.

A Figura 4.17 mostra em (A) o corpo-de-prova CP3 do traço da mistura T203F imediatamente após o ensaio e em (B) os CP1 à esquerda e CP3 à direita, estes do traço T405F.

Fazem-se necessárias algumas observações quanto aos resultados dos ensaios mecânicos de forma geral. Houve certa discrepância entre as cargas de ruptura dos três corpos-de-prova (amostras 1, 2 e 3) das várias misturas produzidas, impossibilitando uma análise quantitativa, por não se ter obtido uma linearidade comportamental dos espécimes ensaiados. Em função de se ter alcançado desvios padrão relativamente elevados e muito variáveis, a acurácia dos dados ficou parcialmente comprometida. Tal fato está provavelmente associado com as condições de produção manual, da pequena amostragem, do não conhecimento prévio das fibras de açaí como reforço e do comportamento destas na hidratação do cimento Portland, entre outros. Além disso, foi identificada a ocorrência de uma patologia (coloração cinzenta mais clara que o restante da matriz) em algumas amostras da segunda etapa de ensaios, que foi detectada visualmente conforme o evidenciado na Figura 4.18, que mostra o corpo-de-prova CP2 do traço 3 T304F (teor de 0,4%) sem a ocorrência (Figura 4.18-A) e o CP1, do traço 2 T203F (com 0,3% de fibra), com a ocorrência (Figura 4.18-B).

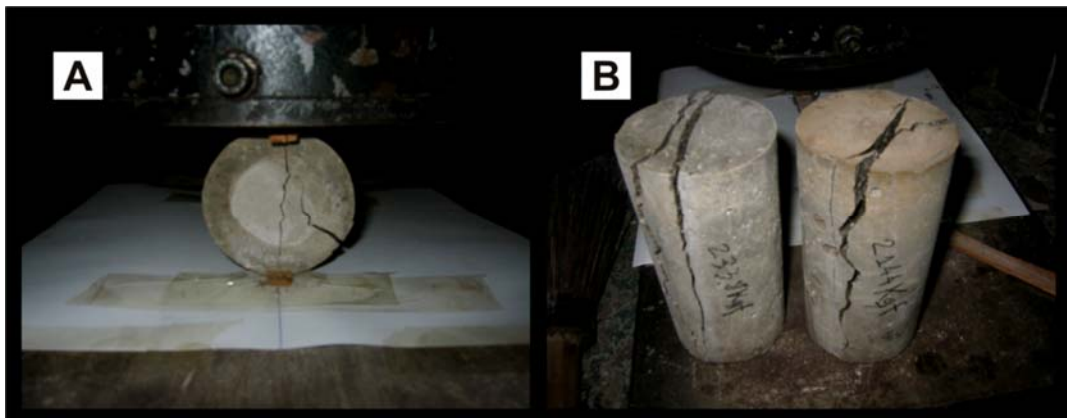


Figura 4.17 – Corpos-de-prova Rompidos no Ensaio de Tração por Compressão Diametral aos 28 dias; (A) na prensa e (B) dispostos fora do equipamento.

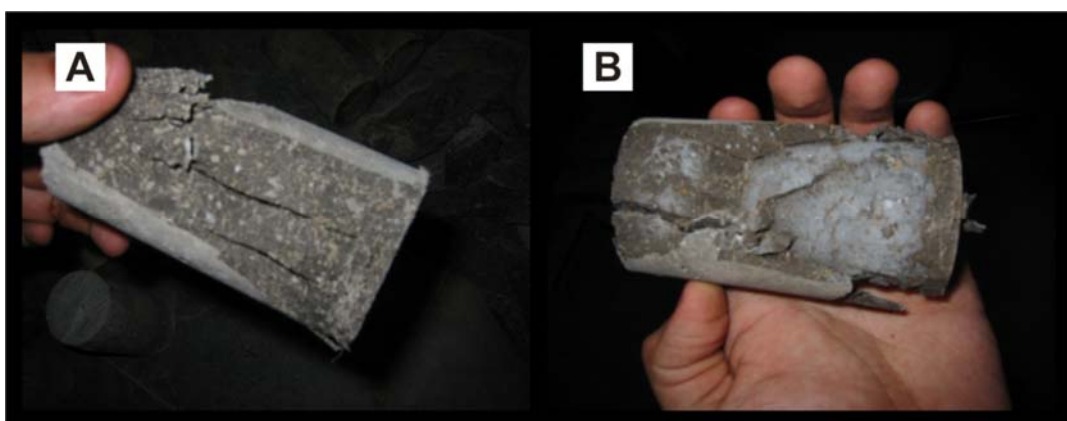


Figura 4.18 – Fotografias do (A) CP2-T304F sem a patologia observada e do (B) CP2-T203F com o referido defeito.

A ocorrência da patologia evidenciada na Figura 4.18 pode ter sido em função de uma eventual baixa hidratação do cimento Portland, pois a escolha de uma relação água/cimento (0,28) foi muito próxima à mínima necessária para a hidratação do material cimentício, que é agravada pela capacidade de absorção de água por parte deste material vegetal desidratado. Isto provavelmente interferiu na qualidade dos resultados obtidos pela consequente baixa hidratação do material aglomerante do compósito (cimento Portland), visto que a resistência da matriz (pasta) é o principal fator responsável pela resistência do material final, seguida da zona de transição.

Em função do aspecto visual característico do cimento Portland quanto à não hidratação ideal, muito provavelmente o material compósito produzido para os corpos-de-prova que apresentaram tal patologia possuem defeito devido à falta de hidratação, que pode ter sido provocada na produção (absorção de água pelas fibras) ou mesmo pela possível ocorrência do fenômeno da eflorescência, que consiste na perda de moléculas de água quando a pressão parcial de vapor d'água da atmosfera é menor que a própria pressão de vapor do material. É válido salientar que a umidade relativa do ar no Trópico Úmido – na segunda etapa em Belém –, é muito elevada durante todo o ano. Aproximadamente no intervalo médio de 80% a 90% e com várias extrapolações ao longo do ano muito próximas de 100%. A hidrólise de produtos contendo cálcio, na eflorescência, ocorre na pasta de cimento Portland a partir de três fatores *sine quibus non*: água, sais solúveis e pressões hidrostáticas; que incorrem em produtos lixiviados que interagem com o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera, resultando na precipitação de carbonato de cálcio, que causa coloração esbranquiçada ao material e característica perda de resistência. Salienta-se ainda que, muito provavelmente em função da pouca água de hidratação (baixa relação *a/c*) a água presente na atmosfera (umidade elevada), por evaporação no material, pode ter tido influência significativa no período da secagem incipiente dos corpos-de-prova.

Outra observação se faz necessária, normalmente materiais baseados em cimento Portland tem sua resistência mecânica acrescida naturalmente ao longo do tempo, inclusive as normas de ensaios mecânicos de materiais de construção baseados em cimento Portland comum definem ensaios para idades de 1, 3, 7, 28, 60 e 90 dias, pelo incremento da resistência ao longo do tempo, estabilizando-se por volta de 90 dias de idade. Enquanto, os espécimes ensaiados na Primeira Etapa deste trabalho tiveram o comportamento normal de aumento de resistência da menor para a maior idade ensaiada, nos corpos-de-prova ensaiados na Segunda Etapa, todas as resistências sofreram redução de valores, das idades de 7 para 28 dias. Além das diferentes condições de produção (cimentos Portland distintos, diferenças

climáticas e regionais, e diferentes bateleiros), ocorreu que na Segunda Batelada se realizou o tratamento químico de cozimento das fibras para remoção parcial de material extracelulósicos. E isto – a priori realizado para diminuir o teor de material passivo de ataque alcalino da matriz cimentícia (alguns extrativos) e assim melhorar o desempenho estrutural do compósito – pode ter reduzido a resistência das amostras produzidas ao longo do tempo. Agindo de forma inversa, o cozimento das fibras pode ter induzido de forma negativa uma exposição do material celulósico da fibra ao ataque alcalino do cimento Portland, ou alterado sua absorção em relação às fibras não tratadas.

Também, observou-se a presença de mais porosidades aparentes dos compósitos produzidos na Segunda Batelada, em relação aos da Primeira, estes últimos que tiveram o incremento normal da resistência ao longo do tempo. O aumento da porosidade traz como consequência natural o progressivo enfraquecimento da matriz, haja vista que num sólido há uma relação inversa entre porosidade e resistência.

Outra possibilidade de explicação da redução em referência pode ser apropriada a partir da patologia observada na Segunda Batelada, podendo ter ocorrido de forma idêntica, baixa hidratação, em todo o material (corpo-de-prova), em menores proporções que as colorações limítrofes mais evidentes. Nota-se a partir da Figura 4.18-A colorações esbranquiçadas puntiformes ao longo de todo o corpo-de-prova, inicialmente retro concebido como sem a patologia exposta na Figura 4.18-B. Podendo-se supor, a partir de uma análise mais minuciosa, que de fato a patologia ocorre em todo o material de forma menos evidente e dispersa, contribuindo para a perda de resistência do cimento, que teve ainda corpos-de-prova ensaiados à idades iniciais (7 e 28 dias), ainda na cura incipiente.

4.2.3 – Propriedades Microestruturais

Para fins ilustrativos apresenta-se a seguir, nas Figuras 4.19 e 4.20, imagens obtidas no MEV da microestrutura típica de fratura por flexão dos compósitos obtidos na Primeira Batelada.

Pode-se observar que a interação da fibra com a matriz cimentícia em algumas regiões foi satisfatória e em outras pobre, predominando a primeira.

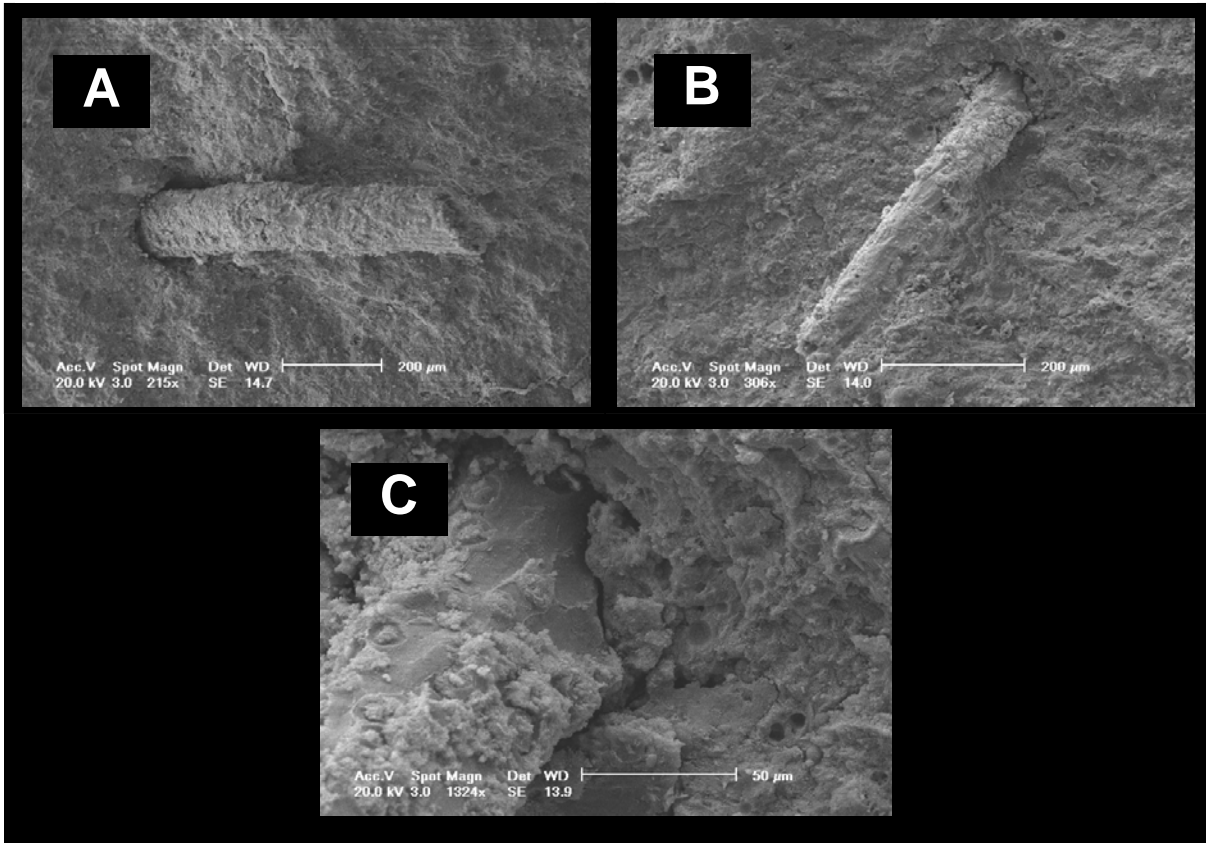


Figura 4.19 – Microestrutura da fratura dos compósitos evidenciando fibras alinhadas verticalmente.

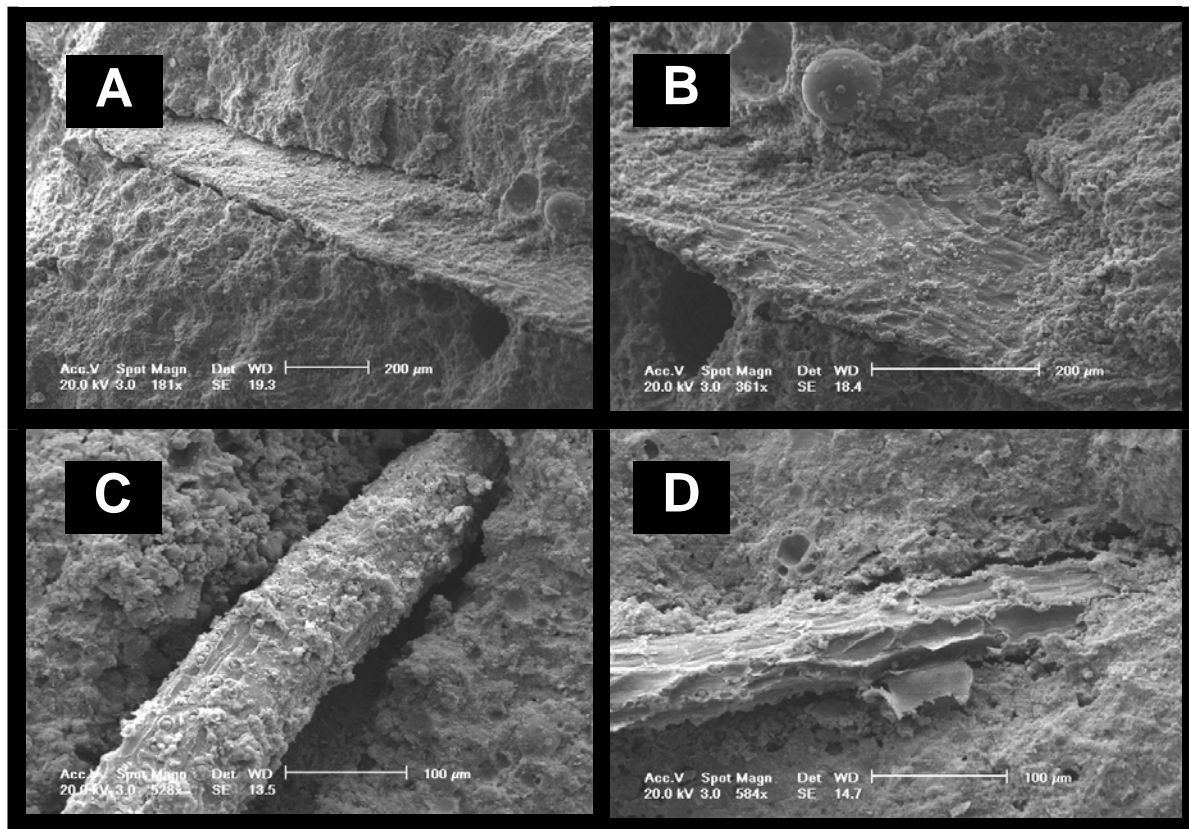


Figura 4.20 – Microestrutura da fratura dos compósitos evidenciando fibras alinhadas no sentido horizontal.

V – CONCLUSÕES

Foi caracterizada a fibra de açai e demonstrado o seu potencial emprego como reforço de fibrocimentos a partir da análise dos resultados apresentados, podendo-se concluir que:

- a fibra de açai é um material lignocelulósico fibroso de formato elíptico com espessura e comprimento médios de 130 μm e 18 mm, respectivamente. É de baixa alcalinidade e a decomposição do material celulósico presente em maior parte se dá após os 350°C e a degradação total se dá a cerca de 650°C. As fibras da semente do açazeiro possuem uma massa específica levemente mais elevada que a da água, em torno de 1,11 g/cm³. Outros parâmetros relacionados às dimensões das fibras tais como coeficiente de flexibilidade, índice de *Runkel*, índice de enfeltramento e fração parede, normalmente determinados para as fibras utilizadas na produção papeleira, também foram calculados. A fibra de açai apresenta fração parede maior que 90% o que pode ser considerado que esta é extremamente rígida. Este resultado é confirmado pelo seu baixo coeficiente de flexibilidade, menor que 10%. O índice de *Runkel* encontrado foi de 919, o que indica baixo potencial de ligação entre as fibras. Para os compósitos cimentícios, as fibras não necessitam se ligar entre si, como para o caso da fabricação de papel, assim o elevado índice de *Runkel* das fibras de açai não prejudica o desempenho deste material como reforço da matriz cimentícia. A fibra de açai apresenta alto índice de enfeltramento, fato que deve ser observado quando da dispersão das mesmas na fabricação de materiais compósitos.
- os compósitos cimentícios reforçados com esta fibra não apresentam perda significativa de resistência à compressão. Contudo, as fibras incrementam de forma satisfatória a resistência à tração (aproximadamente 13% em média) de fibrocimentos produzidos com este reforço. O reforço proposto apresentou um bom desempenho de adesão com a matriz e conseqüente

comportamento pós-fissura inerente aos fibrocimentos, reforçando a região adjacente à fratura. Os compósitos que apresentam melhores propriedades mecânicas foram os com fibra *in natura* e com teor de fibra de 0,3%. Com o aumento do teor de fibras ocorre um aumento da absorção de água e da porosidade aparente e a diminuição da massa específica.

VI – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns pontos importantes para a otimização do desempenho de compósitos fibrocimentícios reforçados com fibra de açaí podem ser analisados a partir de trabalhos complementares, que são sugeridos a seguir:

- executar novamente os ensaios mecânicos com uma maior amostragem por mistura, de pelo menos cinco corpos-de-prova para cada traço, a fim de reduzir o desvio padrão;
- avaliar a importância do pré-tratamento, com processos de tratamento superficial e polpação celulósica conhecidos;
- repetir os ensaios com os melhores traços com referência de pasta cimentícia e traço já estudado de reforço de polipropileno comercial (fibra sintética mais utilizada em telhas de fibrocimento comerciais livre de amianto);
- experimentar misturas com faixa de teores de fibras naturais mais elevados, para determinação do máximo desempenho mecânico que pode ser obtido;
- produzir compósitos efetivamente esbeltos, em forma de chapas a partir de processos adaptados de Hatschek;
- ensaiar chapas com espessuras comerciais de telhas e painéis de vedação de fibrocimento quanto à estanqueidade e isolamento termo-acústico;

- verificar a performance quanto à abrasão e envelhecimento acelerado de compósitos produzidos em forma de telhas onduladas e painéis de vedação.

VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SCHUH, Thomas G. **Renewable Materials for Automotive Applications**. Daimler-Chrysler AG. Stuttgart, Alemanha, 1997.
Disponível em: <http://www.ienica.net/fibresseminar/schuh.pdf> (Capturado em 18 de Março de 2005).
- [2] POEMA – Programa Pobreza e Meio Ambiente na Amazônia. **Website Oficial**. NUMA, UFPA – Universidade Federal do Pará, Março de 2005.
Disponível em: <http://www.ufpa.br/poema> e <http://www.poema.org.br> (Capturado em 02 de Abril de 2005).
- [3] PICHA, David H. **Guyana Economic Opportunities**. Chemonics International Inc. United States Agency for International Development. Georgetown, Guiana, 2003.
Disponível em: <http://www.dec.org/pdf-docs/PNAY794.pdf> (Capturado em 12 de Junho de 2005).
- [4] SAVASTANO JR., Holmer. **Sistemas de cobertura para construções de baixo custo: uso de fibras vegetais e de outros resíduos agroindustriais**. Coletânea Habitare - vol. 4 - Utilização de Resíduos na Construção Habitacional. FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos. 272p. Porto Alegre-RS, 2003.
Disponível em: <http://habitare.infohab.org.br/%20pdf/publicacoes/arquivos/128.pdf> (Capturado em 17 de Janeiro de 2005).
- [5] COUTTS, R. S. P. WARDEN, P. G. **Sisal Pulp Reinforced Cement Mortar**. Cement & Concrete Composites. n. 14, p. 17 -21. Elsevier Science Publishers Ltd, Grã-Bretanha, 1992.
- [6] EDITORA OBJETIVA. **HOUAISS - Dicionário Eletrônico da Língua Portuguesa 1.0**. São Paulo: Editora Objetiva LTDA. 1 compact disc cd-rom for Windows. 2001.
- [7] AMAZON PAPER. **Website Oficial**. POEMA – Programa de Pobreza e Meio Ambiente, NUMA, UFPA, 2006.
Disponível em: <http://www.amazonpaper.com.br> (Capturado em 03 de Junho de 2005).
- [8] PEREIRA, Sanatiel de Jesus; MUÑIZ, Graciela Inês Bolzon; KAMININSKI, Moacir; KLOCK, Umberto; NISGOSKI, Silvana; FABROSWKI, Fernando José. **Celulose de buriti (Mauritia vinifera Martius) Buriti (Mauritia vinifera Martius) pulp**. Scientia Florestalis. n. 63, p. 202-213, jun. 2003. [S.l. : s.n.]
- [9] PEREIRA, Edmir A. QUEIROZ; Alexandre J. de M. FIGUEIRÊDO; Rossana M. de F. **Massa específica de polpa de açaí em função do teor de sólidos totais e da temperatura**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, p.526-530, 2002. Campina Grande, PB, DEAg/UFPG.

Disponível em: <http://www.agriambi.com.br/revista/v6n3/526.pdf> (Capturado em 17 de Janeiro de 2005).

[10] JONES, Robert M. *Mechanics of Composite Materials. 2nd ed.* Blacksburg, EUA, 1999. Taylor & Francis, Inc.

[11] SCHWARTZ, Mel M. *Composite Materials Handbook.* New York, EUA, 1984. McGraw-Hill, Inc.

[12] JASTRZEBSKI, Zbigniew D. *The Nature and Properties of Engineering Materials.* New York, EUA, 1987. John Wiley & Sons, Inc.

[13] CALLISTER Jr., William D. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.* New York, EUA, 2000. LTC Editora S.A.

[14] AGARWAL, Bhagwan D.; BROUTMAN, Lawrence J. *Analysis and Performance of Fiber Composites. 2nd ed.* Kanpur, Índia, 1990. John Wiley & Sons, Inc.

[15] MAZUMDAR, Sanjay K. *Composites Manufacturing: Materials, product, and process engineering.* Boca Ratón, EUA, 2001. CRC Press LLC.

[16] GIL; Carlos Roberto A. *Sistema Experimental para Fabricação de Compósitos de Liga de Alumínio Reforçada com Carbetto de Silício via Compo fundição.* Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2002.

[17] SILVA, Rosana Vilarim da. *O Uso de Resinas Naturais com Reforço de Fibras Lignocelulósicas.* Dissertação de Mestrado, USP. São Carlos-SP, 2003.

[18] ROWELL, Roger M.; YOUNG, Raymond A. & ROWELL, Judith K. *Paper and Composites from Agro-Based Resources.* CRC Press LCC. Boca Ratón, EUA, 1997. p. 269-299.

Disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1997/engli97c.pdf> (Capturado em 23 de Maio de 2005).

[19] RAI, Amit & JHA, C.N. *Natural Fibre Composites and Its Potential as Building Materials.* BMTPC/Development Officer. Nova Déli, Índia, 2004.

Disponível em: <http://www.bmtpc.org/pubs/papers/paper1.htm> (Capturado em 13 de Agosto de 2005).

[20] DUKE, James A. *Hibiscus cannabinus L., Malvaceae. Kenaf, Bimli, Bimlipatum, Jute, Deccan hemp.* Handbook of Energy Crops. 1983. [S.l. : s.n.].

Disponível em: http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Hibiscus_cannabinus.html (Capturado em 30 de Junho de 2006).

[21] Pimentel, Marcelo Sampaio. *Rotação de culturas. Espécies alternativas para formação de palha no cerrado.* Revista Plantio Direto, edição nº 85, janeiro/fevereiro de 2005. Aldeia Norte Editora, Passo Fundo.

Disponível em: http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=607 (Capturado em 11 de Janeiro de 2006).

[22] MEDEIROS, Eliton Soto de; MATTOSO, Luiz Henrique C. & CARVALHO, Laura Hecker de. *Uso de Tecidos de Fibras Vegetais para Melhoria das Propriedades de Materiais Plásticos.* Circular Técnica, Emprapa/Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. São Carlos-SP. Novembro, 2002.

Disponível em: http://watts.cnpdia.embrapa.br/publicacoes/CiT16_2002.pdf (Capturado em 30 de Junho de

2006).

[23] DA SILVA, Rosana Vilarim. *Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras Vegetais*. Tese de Doutorado, USP – Universidade de São Paulo. São Carlos-SP, 2003.

[24] WIKIPÉDIA. Desenvolvido pela Wikimedia Foundation. Apresenta conteúdo enciclopédico.

Disponível em:

http://pt.wikipedia.org/w/index.php?title=P%C3%A1gina_principal&oldid=4156597 (Capturado em 5 de Janeiro de 2007).

[25] COZZA, Eric. *Batimat 2005 – Salão Internacional da Construção*. Revista Técnica, n° 105, Editora Pini. São Paulo, Dezembro de 2005.

[26] ANJOS, M. A. S. *Compósito a Base de Cimento Reforçado com Polpa de Bambu - Caracterização Física, Mecânica e Microestrutural*. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2002. 96 p.

[27] ANJOS, M. A. S. dos; GHAVAMI, K. & BARBOSA, N. P. *Compósitos à base de cimento reforçados com polpa celulósica de bambu. Parte I: Determinação do teor de reforço ótimo*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n.2, p.339-345. Campina Grande-PB, 2003.

Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v7n2/v7n2a26.pdf> (Capturado em 9 de Julho de 2006).

[28] ABMTENC - Associação Brasileira de Ciências de Materiais e Tecnologias Não Convencionais. *Website oficial*. PUC-Rio, 2006.

Disponível em: <http://www.abmtenc.civ.puc-rio.br> (Capturado em 13 de Agosto de 2006).

[29] JOSEPH, Kuruvilla, MEDEIROS, Eliton S. and CARVALHO, Laura H. *Tensile Properties of Unsaturated Polyester Composites Reinforced by Short Sisal Fibers*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, Oct./Dec. 1999, vol.9, no.4, p.136-141. [S.l. : s.n.]

[30] TOLEDO FILHO, Romildo D. GHAVAMI, Khosrow. ENGLAND, George L. SCRIVENER, Karen. *Development of vegetable fibre-mortar composites of improved durability*. Cement & Concrete Composites, n. 25, p. 185-196. Elsevier Science Publisher Ltd. Grã-Bretanha, 2003.

[31] SAVASTANO JR., Holmer. *Zona de Transição Entre Fibras e Pasta de Cimento Portland: Caracterização e Inter-relação com as Propriedades Mecânicas do Compósito*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica, USP – Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 1992.

[32] SAVASTANO JR., Holmer & DEVITO, Reginaldo Araujo. *Alternative fibre-cement produced by a slurry de-watering method*. Revista Agribuilding, Setembro de 2001. p. 234 a 241. Campinas-SP, 2001. [S.n.]

Disponível em: http://www.cnpsa.embrapa.br/cigr/cd/proceedings/ab2001_2007.pdf (Capturado em 4 de Junho de 2005).

[33] SAVASTANO JR., Holmer. *Telhas à Base de Cimento Alternativo Reforçado com Fibras Celulósicas*. Relatório de Atividades, Construções Rurais & Ambiente. Faculdade de

Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo. Pirassununga-SP, 2002.

Disponível em:

http://www.antac.org.br/prototipos/projetos/%2003_telha_cimento_alternativo/etapas/rel_fibrocimento.pdf (Capturado em 19 de Agosto de 2005).

[34] COUTTS, R. S. P. & WARDEN, P. G. *Sisal Pulp Reinforced Cement Mortar*. Cement & Concrete Composites, n. 14, p. 17-21. Elsevier Science Publisher Ltd. Grã-Bretanha, 1992.

[35] G. Ramakrishna & T. Sundararajan. *Impact strength of a few natural fibre reinforced cement mortar slabs: a comparative study*. Cement & Concrete Composites, n. 27, p. 547-553. Elsevier Science Publisher Ltd. Grã-Bretanha, 2005.

[36] ARSÈNE, M-A.; SAVASTANO JR., H.; ALLAMEH, S. M. & GHAVAMI, K.; SOBOYEJO, W. O. Cementitious Composites Reinforced with Vegetable Fibers. [S.l. : s.n.] Disponível em: http://www.abmtenc.civ.puc-rio.br/abmtenc/areas/pdfs/artigo/Arsene_M_A.pdf (Capturado em 15 de Junho de 2005).

[37] WURTZ, Francis. *Amianto: Os custos humanos da voracidade das empresas*. Brochura. GUE/NGL – Grupo Confederado da Esquerda Unitária Europeia/Esquerda Nórdica Verde, Grupo Parlamentar. Conferência sobre o amianto, Setembro de 2005 - Parlamento Europeu, EU – União Europeia. Bruxelas, CEE, 2005.

Disponível em: <http://www.guengl.eu/upload/Portuguese-3.pdf> (Capturado em 12 de Dezembro de 2006).

[38] PETRUCCI, E.G.R. *Materiais de Construção*. Editora Globo. Porto Alegre, 1976. 435 pg.

[39] RESENDE, Fabrício Meneses. *Influência das Fibras de Aço, Polipropileno e Sisal no Amortecimento de Concretos de Resistência Normal e de Alto Desempenho*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, 2003. Disponível em: http://www.coc.ufrj.br/teses/mestrado/_estruturas/2003/teses/RESENDE_FM_03_t_M_est.pdf (Capturado em 1 de Maio de 2005).

[40] e SILVA, Aluizio Caldas & JOHN, Wanderley Moacyr. *Compósitos reforçados com fibras de celulose (CRFC): aspectos relativos à durabilidade*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil. Boletim Técnico – Série BT/PCC. ISSN 0103-9830, BT/PCC/342. São Paulo, 2003.

Disponível em: http://publicacoes.pcc.usp.br/_PDF2003&2004_1/BT%20-%20342.pdf (Capturado em 29 de Agosto de 2005).

[41] e SILVA, Aluizio Caldas. *Estudo da Durabilidade em Compósitos Reforçados com Fibras de Celulose*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo-SP, 2002.

Disponível em: <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/ftp/Dissertacao%20Aluizio.pdf> (Capturado em 1 de Maio de 2005).

[42] ALDEA, Corina; MARIKUNTE, Shashi & Shah, Surendra P. *Extruded Fiber Reinforced Cement Pressure Pipe*. National Science Foundation for Science and Technology of Advanced Cement-Based Materials, Northwestern University. Evanston, EUA, 1998.

[43] MAC FADDEN, Joana. *A Produção de Açaí a Partir do Processamento dos Frutos do Palmiteiro (Euterpe edulis Martius) na Mata Atlântica*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas, Centro de Ciências Agrárias, UFSC – Universidade

Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2005.

[44] CANTO, Sérgio Aruana Elarrat. *Processo Extrativista do Açaí: Contribuição da Ergonomia com Base na Análise Postural Durante a Coleta dos Frutos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC, 2001.

[45] RENDEIRO, Ruth. *Vinho amazônico. Propriedades e vantagens do açaí vão muito além do suco na tigela*. Revista Problemas Brasileiros, n. 377, setembro/outubro de 2006. SESCSP. São Paulo-SP, 2006.
Disponível em: <http://www.sescsp.org.br/sesc/home/index.cfm> (Capturado em 10 de Dezembro de 2006).

[46] Globo Comunicação e Participações S.A. *Globo Rural - Glossário*. Website Oficial.
Disponível em: <http://globoruraltv.globo.com/GRural/0,27062,4369,00.html> (Capturado em 10 de Dezembro de 2006).

[47] LUZ, Rodrigo. Uma solução para o homem do campo e para a Mata Atlântica. Programa Ambiental: A Última Arca de Noé. Website Oficial, 2005.
Disponível em: <http://www.ultimaarcadenoe.com> (Capturado em 10 de Dezembro de 2006).

[48] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 7220 - Agregados: Determinação de Impurezas Orgânicas Húmicas em Agregado Miúdo*. Rio de Janeiro: ABNT, Agosto de 1987. 4 p.

[49] SARMIENTO, C. Ramirez & FREIRE, W. J. *Argamassa de Cimento e Areia Combinada com Fibras de Bagaço de Cana-de-Açúcar*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 17, n. 2, p. 1-8. Jaboticabal-SP, 1997. [S.n.]

[50] SOFFNER, Maria de Lourdes Aparecida Prudente. *Produção de Polpa Celulósica a Partir de Engaço de Bananeira*. Dissertação de Mestrado, 56p. Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz - Universidade de São Paulo (USP). Piracicaba-SP, 2001.

[51] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 5738 - Concreto: Procedimento para Moldagem e Cura de Corpos-de-Prova*. Rio de Janeiro: ABNT, Dezembro de 2003. 6 p.

[52] _____. *NBR 9479 - Câmaras Úmidas e Tanques para Cura de Argamassa e Concreto*. Rio de Janeiro: ABNT, Junho de 1994. 2 p.

[53] _____. *NBR 7215 - Cimento Portland: Determinação da Resistência à Compressão*. Rio de Janeiro: ABNT, Dezembro de 1996. 8 p.

[54] _____. *NBR 5739 - Concreto: Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT, Julho de 1994. 4 p.

[55] _____. *NBR 6156 - Máquina de Ensaio de Tração e Compressão - Verificação: Método de Ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, Setembro de 1983. 5 p.

[56] _____. *NBR 12142 - Concreto: Determinação da Resistência à Tração na Flexão em Corpos-de-prova Prismáticos*. Rio de Janeiro: ABNT, Dezembro de 1991. 3 p.

[57] _____. *NBR 7222 - Argamassa e Concreto: Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*. Rio de Janeiro: ABNT, Março de 1994. 3 p.

[58] MOCHNACZ, Sandro & AMICO, Sandro C. & SYDENSTRICKER, Thais H. D. *Caracterização Superficial de fibras de Sisal para Utilização em Compósitos Poliméricos*. Sulmat 2002, Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul. Joinville, 2002.

Disponível em: http://www.demec.ufpr/grupo_de_polimeros/sulmat2002.pdf (Capturado em 12 de Dezembro de 2004).

[59] BLEDZKI, A. K. & GASSAN, J. *Composites reinforced with cellulose based fibres*. Prog. Polym. Sci. n. 24, p.221-274. Elsevier Science Publisher Ltd. Grã-Bretanha, 1999.

[60] National Institute of Standards and Technology. *Web Chemical Book*. U.S. Commerce Department's Technology Administration/NIST. Gaithersburg, EUA.

Disponível em: <http://webbook.nist.gov/chemistry/vib-ser.html.en-us.en> (Capturado em 13 de Dezembro de 2006).

[61] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). **Spectral Database for Organic Compounds SDBS**. Governo do Japão/AIST. Tóquio, Japão.

Disponível em: http://www.aist.go.jp/RIODB/SDBS/cgi-bin/direct_frame_top.cgi?lang=eng (Capturado em 13 de Dezembro de 2006).

[62] Berkeley National Laboratory. *FTIR spectroscopy and IR materials*. The Advanced Light Source-ALS/Berkeley Lab. University of California for U.S. Department of Energy.

Disponível em: <http://infrared.als.lbl.gov/FTIRinfo.html> (Capturado em 13 de Dezembro de 2006).

[63] MTHZ-MIRET, Nuria; VAMOS, Robert; HIRAOKA, Mario; MONTAGNINI, Florência & MENDELSON, Robert. *The economic value of managing the açai palm (Euterpe oleracea Mart.) in the floodplains of the Amazon estuary, Par& Brazil* Forest Ecology and Management, n. 7, p. 163-173. Elsevier Science Publisher Ltd. Grã-Bretanha, 1996.

[64] Dr. Klaus Bohnemann & Torsten Dietz. **Process Options for the Production of Fibre-Cement Sheets**. **6th International Inorganic-Bonded Wood & Fiber Composite Materials Conference**. September 27 - 30, 1998, Sun Valley, Idaho USA. University of Idaho/Moscow (org.).

Disponível em:

[http:// www.wehrhahn.de/downloads/FIBRECEMENT/Process_Options.PDF](http://www.wehrhahn.de/downloads/FIBRECEMENT/Process_Options.PDF) (Capturado em 11 de Dezembro de 2005).

APÊNDICE A – Amostragem e tratamento estatístico das larguras da fibra

Amostra	Largura (µm)			Lume (µm)			Espessura de parede (µm)		
	L	I	Média	D	d	Média	E	e	Média
Seção 1	266,13	74,97	170,55	23,51	9,52	16,51	121,31	32,73	77,02
Seção 2	214,35	69,48	141,92	18,94	8,82	13,88	97,71	30,33	64,02
Seção 3	175,43	61,29	118,36	15,50	7,78	11,64	79,97	26,76	53,37
Seção 4	192,46	66,75	129,61	17,00	8,47	12,74	87,73	29,14	58,44
Seção 5	184,50	64,38	124,44	16,30	8,17	12,24	84,10	28,10	56,10
Seção 6	191,89	54,67	123,28	16,95	6,94	11,95	87,47	23,87	55,67
Seção 7	165,27	56,88	111,08	14,60	7,22	10,91	75,33	24,83	50,08
Seção 8	242,13	57,66	149,90	21,39	7,32	14,36	110,37	25,17	67,77
Seção 9	164,39	63,45	113,92	14,52	8,05	11,29	74,93	27,70	51,32
Seção 10	130,48	55,43	92,96	11,53	7,04	9,28	59,48	24,20	41,84
Seção 11	118,48	53,47	85,98	10,47	6,79	8,63	54,01	23,34	38,68
Seção 12	104,56	45,87	75,22	9,24	5,82	7,53	47,66	20,02	33,84
Seção 13	237,76	66,56	152,16	21,01	8,45	14,73	108,38	29,06	68,72
Seção 14	116,83	33,45	75,14	10,32	4,25	7,28	53,25	14,60	33,93
Seção 15	264,64	63,47	164,06	23,38	8,06	15,72	120,63	27,71	74,17
Seção 16	184,57	62,65	123,61	16,31	7,95	12,13	84,13	27,35	55,74
Seção 17	196,73	63,96	130,30	17,38	8,11	12,74	89,67	27,88	58,78
Seção 18	114,74	68,35	91,55	10,14	8,88	9,41	52,30	29,84	41,07
Seção 19	194,64	64,83	129,74	17,20	8,23	12,71	88,72	28,30	58,51
Seção 20	198,84	68,34	133,59	17,57	8,67	13,12	90,64	29,83	60,24
Seção 21	238,63	74,82	156,73	21,08	9,50	15,29	108,77	32,66	70,72
Seção 22	133,74	63,92	98,83	11,82	8,11	9,96	60,96	27,90	44,43
Seção 23	239,48	66,63	153,06	21,16	8,46	14,81	109,16	29,09	69,13
Seção 24	204,93	85,76	145,35	18,11	10,89	14,50	93,41	37,44	65,43
Seção 25	305,46	116,44	210,95	26,99	14,78	20,88	139,24	50,83	95,04
Seção 26	200,85	39,57	120,11	17,73	5,02	11,37	91,46	17,27	54,37
Seção 27	193,23	56,61	124,92	17,07	7,19	12,13	88,08	24,71	56,40
Seção 28	188,11	53,72	120,92	16,62	6,82	11,72	85,75	23,45	54,60
Seção 29	171,92	68,84	120,38	15,19	8,74	11,96	78,37	30,05	54,21
Seção 30	258,33	76,17	167,25	22,82	9,67	16,25	117,75	33,25	75,50
Seção 31	264,93	71,99	168,46	23,41	9,14	16,27	120,76	31,43	76,10
Seção 32	233,28	95,77	164,53	20,61	12,16	16,38	106,33	41,81	74,07
Seção 33	137,46	54,88	96,17	12,14	6,97	9,56	62,66	23,96	43,31
Seção 34	269,27	97,30	183,29	23,79	12,35	18,07	122,74	42,48	82,61
Seção 35	187,55	64,48	126,02	16,57	8,18	12,38	85,49	28,15	56,82
Seção 36	118,94	49,81	84,38	10,51	6,32	8,42	54,22	21,74	37,98
Seção 37	207,14	77,66	142,40	18,30	9,86	14,08	94,42	33,90	64,16
Seção 38	116,24	38,48	77,36	10,27	4,88	7,58	52,99	16,80	34,90
Seção 39	115,00	52,39	83,70	10,16	6,65	8,40	52,42	22,87	37,65
Seção 40	224,93	61,22	143,08	19,87	7,77	13,82	102,53	26,72	64,63
Seção 41	359,49	95,13	227,31	31,76	12,07	21,92	163,86	41,53	102,70
Seção 42	97,58	49,50	73,54	8,62	6,28	7,45	44,48	21,61	33,05
Seção 43	264,51	117,34	190,93	23,37	14,89	19,13	120,57	51,22	85,90
Seção 44	158,50	73,49	116,50	14,09	9,33	11,71	72,70	32,08	52,39
Seção 45	221,67	65,18	143,43	19,58	8,27	13,93	101,04	28,45	64,75
Seção 46	283,11	83,74	183,43	25,01	10,63	17,82	129,05	36,56	82,81
Seção 47	215,17	76,42	145,80	19,01	9,70	14,36	98,08	33,36	65,72
Seção 48	143,99	58,71	101,35	12,72	7,45	10,09	65,63	25,63	45,63
Seção 49	110,88	65,87	88,38	9,80	8,36	9,08	50,54	28,75	39,65
Seção 50	223,96	74,13	149,05	19,79	9,41	14,60	102,09	32,36	67,23

Usando as médias:

Largura:

Amplitude total At:

At = L_{máx} - L_{mín}
At = 153,77

Número de classes k:

k = 1 + 3,22 × LogN Log50 = 1,70
k = 6,47 (6 classes!)

Amplitude de classe h:

h = At / k
h = 25,63

Mediana:

Md = li + [(n/2 - fac) × h] / fi
classe mediana: local = n/2

Larguras (µm)	fi	fac	xi	fi . xi	fi . xi ²
73,54	99,17	12	12	86,36	1036,32
99,17	124,80	11	23	111,99	1231,89
124,80	150,43	14	37	137,62	1926,68
150,43	176,06	8	45	163,25	1306,00
176,06	201,69	3	48	188,88	566,64
201,69	227,32	2	50	214,51	429,02
	50	-	-	6496,55	904866,20

Média aritmética = 129,93 µm
Moda = 133,34 µm
Variância s² = 1240,06
Desvio padrão s = 35,21
Coeficiente de variação cv = 27,10 %
Mediana = 150,43 mm

Diâmetro do Lume:

Amplitude total At:

At = L_{máx} - L_{mín}
At = 14,64

Número de classes k:

k = 1 + 3,22 × LogN Log50 = 1,70
k = 6,47 (6 classes!)

Amplitude de classe h:

h = At / k
h = 2,44

Mediana:

Md = li + [(n/2 - fac) × h] / fi
classe mediana: local = n/2

Larguras (µm)	fi	fac	xi	fi . xi	fi . xi ²
7,28	9,72	11	11	8,50	93,50
9,72	12,16	12	23	10,94	131,28
12,16	14,60	13	36	13,38	173,94
14,60	17,04	9	45	15,82	142,38
17,04	19,48	3	48	18,26	54,78
19,48	21,92	2	50	20,70	41,40
	50	-	-	637,28	8667,98

Média aritmética = 12,75 µm
Moda = 12,65 µm
Variância s² = 11,13
Desvio padrão s = 3,34
Coeficiente de variação cv = 26,20 %
Mediana = 12,54 mm

Largura de Parede:

Amplitude total At:

At = L_{máx} - L_{mín}
At = 69,65

Número de classes k:

k = 1 + 3,22 × LogN Log50 = 1,70
k = 6,47 (6 classes!)

Amplitude de classe h:

h = At / k
h = 11,61

Mediana:

Md = li + [(n/2 - fac) × h] / fi
classe mediana: local = n/2

Espessura de Parede (µm)	fi	fac	xi	fi . xi	fi . xi ²
33,05	44,66	12	12	38,96	466,32
44,66	56,27	11	23	50,47	555,17
56,27	67,88	14	37	62,08	869,12
67,88	79,49	8	45	73,69	589,52
79,49	91,10	3	48	85,30	255,90
91,10	102,71	2	50	96,91	193,82
	50	-	-	2923,85	184148,7

Média aritmética = 58,60 µm
Moda = 60,14 µm
Variância s² = 254,45
Desvio padrão s = 15,95
Coeficiente de variação cv = 27,22 %
Mediana = 57,93 mm

APÊNDICE B – Amostragem e tratamento estatístico do comprimento da fibra

Amostra	Comp. (mm)
Fibra 1	13,64
Fibra 2	14,49
Fibra 3	13,07
Fibra 4	18,21
Fibra 5	20,36
Fibra 6	16,34
Fibra 7	23,53
Fibra 8	21,02
Fibra 9	23,13
Fibra 10	20,23
Fibra 11	11,17
Fibra 12	14,24
Fibra 13	16,78
Fibra 14	16,34
Fibra 15	14,56
Fibra 16	25,24
Fibra 17	22,33
Fibra 18	22,17
Fibra 19	23,27
Fibra 20	19,74
Fibra 21	16,81
Fibra 22	13,29
Fibra 23	13,48
Fibra 24	16,24
Fibra 25	15,98
Fibra 26	20,44
Fibra 27	23,19
Fibra 28	23,76
Fibra 29	24,11
Fibra 30	23,92
Fibra 31	13,34
Fibra 32	12,10
Fibra 33	14,77
Fibra 34	14,45
Fibra 35	11,39
Fibra 36	19,28
Fibra 37	21,94
Fibra 38	23,17
Fibra 39	23,37
Fibra 40	20,92
Fibra 41	12,22
Fibra 42	12,37
Fibra 43	13,71
Fibra 44	14,28
Fibra 45	14,90
Fibra 46	20,13
Fibra 47	22,33
Fibra 48	24,69
Fibra 49	22,58
Fibra 50	23,76

Usando as médias:

Comprimento:

Amplitude total At:

At = Lmáx - Lmín

At = 14,07

Número de classes k:

$k = 1 + 3,22 \times \text{Log } \text{Log}50 = 1,69897$

K = 6,47 (6 classes!)

Amplitude de classe h:

$h = \text{At} / k$

h = 2,35

Mediana:

$\text{Md} = li + [(n/2 - \text{fac}^*) \times h] / f_i$

classe mediana: local = n/2

Comprimentos (mm)			fi	facm	xi	fi . xi	fi . xi ²
11,17	┆	13,52	9	9	12,35	111,15	1372,70
13,52	┆	15,87	9	18	14,70	132,30	1944,81
15,87	┆	18,22	7	25	17,05	119,35	2034,92
18,22	┆	20,57	6	31	19,40	116,40	2258,16
20,57	┆	22,92	7	38	21,75	152,25	3311,44
22,92	┆	25,27	12	50	24,10	289,20	6969,72
			50	-	-	920,65	17891,75

Média aritmética = 18,41 mm

Moda = 20,57 mm

Variância s² = 19,18

Desvio padrão s = 4,38

Coefficiente de variação cv = 23,79 %

Mediana = 18,22 mm

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \times \left[\sum f_i \times x_i^2 - \frac{(\sum f_i \times x_i)^2}{n} \right]$$

$$s = \sqrt{s^2}$$

APÊNDICE C – Amostragem, médias e desvios padrão das propriedades físicas da fibra

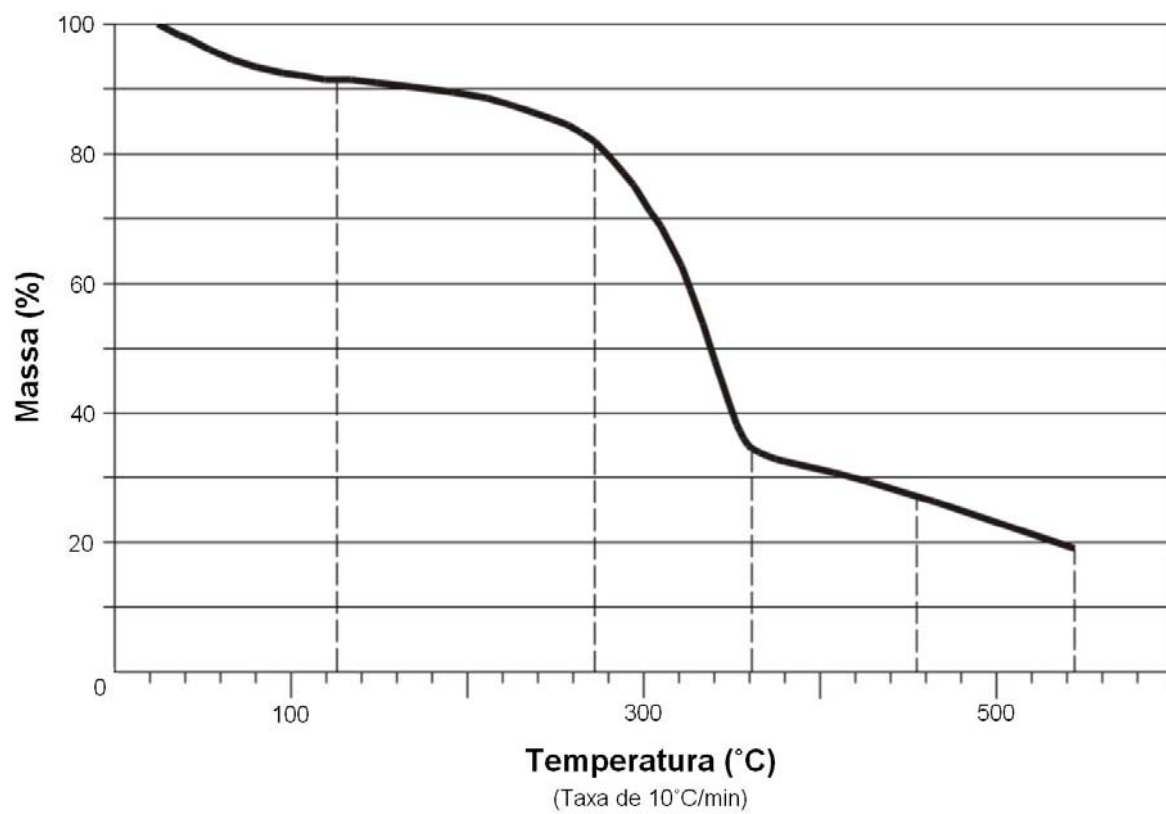
PRIMEIRA ETAPA

Mistura Corpo-de-prova	Massa Seca (g)	Desvio Padrão (dp)	Massa Saturada (g)	Desvio Padrão (dp)	Massa Imersa (g)	Desvio Padrão (dp)	Absorção de Água (%)	Desvio Padrão (dp)	Porosidade Aparente (%)	Desvio Padrão (dp)	Massa Específica (g/cm ³)	Desvio Padrão (dp)
01ARG (0% de fibras)	837,48	2,97	921,66	1,40	496,67	0,50	10,05	0,20	19,81	0,42	1,97	0,00
CP1	840,48	-	922,37	-	496,55	-	9,74	-	19,23	-	1,97	-
CP2	832,76	-	919,49	-	495,98	-	10,41	-	20,48	-	1,97	-
CP3	839,21	-	923,13	-	497,47	-	10,00	-	19,72	-	1,97	-
02MIN (0,3 % de fibras)	803,33	1,79	913,83	1,56	485,17	1,04	13,76	0,14	25,78	0,22	1,87	0,00
CP1	806,18	-	915,54	-	486,57	-	13,57	-	25,49	-	1,88	-
CP2	802,29	-	914,45	-	485,48	-	13,98	-	26,15	-	1,87	-
CP3	801,53	-	911,49	-	483,46	-	13,72	-	25,69	-	1,87	-
03MAX (0,6 % de fibras)	831,83	5,88	934,00	3,35	500,50	2,05	12,29	0,76	23,57	1,29	1,92	0,00
CP1	841,53	-	934,97	-	501,22	-	11,10	-	21,54	-	1,94	-
CP2	823,88	-	928,49	-	497,47	-	12,70	-	24,27	-	1,91	-
CP3	830,08	-	938,53	-	502,81	-	13,07	-	24,89	-	1,91	-

SEGUNDA ETAPA

Mistura Corpo-de-prova	Massa Seca (g)	Desvio Padrão (dp)	Massa Saturada (g)	Desvio Padrão (dp)	Massa Imersa (g)	Desvio Padrão (dp)	Absorção de Água (%)	Desvio Padrão (dp)	Porosidade Aparente (%)	Desvio Padrão (dp)	Massa Específica (g/cm ³)	Desvio Padrão (dp)
T100F (0% de fibras)	387,68	0,57	408,25	0,69	212,00	0,69	5,31	0,10	10,48	0,00	1,98	0,00
CP1	388,03	-	408,74	-	212,49	-	5,34	-	10,55	-	1,98	-
CP2	388,26	-	408,91	-	212,66	-	5,32	-	10,52	-	1,98	-
CP3	386,75	-	407,11	-	210,86	-	5,26	-	10,37	-	1,97	-
T203F (0,3 % de fibras)	388,54	1,46	407,24	1,22	211,00	1,21	4,81	0,10	9,53	0,20	1,98	0,00
CP1	386,37	-	405,23	-	209,00	-	4,88	-	9,61	-	1,97	-
CP2	390,74	-	408,88	-	212,63	-	4,64	-	9,24	-	1,99	-
CP3	388,50	-	407,62	-	211,37	-	4,92	-	9,74	-	1,98	-
T304F (0,4 % de fibras)	337,70	0,99	405,87	1,34	209,62	1,34	20,19	0,10	34,74	0,17	1,72	0,00
CP1	336,21	-	403,92	-	207,67	-	20,14	-	34,50	-	1,71	-
CP2	339,22	-	407,40	-	211,15	-	20,10	-	34,74	-	1,73	-
CP3	337,66	-	406,29	-	210,04	-	20,33	-	34,97	-	1,72	-
T405F (0,5 % de fibras)	336,05	0,69	404,77	2,04	208,52	2,04	20,45	0,39	35,01	0,62	1,71	0,10
CP1	335,01	-	402,80	-	206,55	-	20,24	-	34,54	-	1,71	-
CP2	336,05	-	403,41	-	207,16	-	20,04	-	34,32	-	1,71	-
CP3	337,09	-	408,10	-	211,85	-	21,07	-	36,18	-	1,72	-

ANEXO 1 – Curva termogravimétrica da fibra de sisal (Agave sisalana) obtida por Monhnac et al.^[58]



ANEXO 16 – Resultado de ensaio à tração na flexão aos 7 dias, p. 1 de 2



Documento **RELATÓRIO DE ENSAIO** Número **17514/55030**
Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s).
Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.

ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Cliente: UBIRAJARA MARQUES LIMA JUNIOR.
Rua General Nestor Silva Soares, n°138
91330.050 – PORTO ALEGRE – RS

Material ensaiado: treze corpos-de-prova prismáticos de pasta de cimento entregues à CIENTEC pelo Cliente, já identificados.

Solicitação do Cliente: determinação da resistência à tração na flexão.

Data de entrega dos materiais: 19 de dezembro de 2005.

Período de realização dos ensaios: de 20 a 26 de dezembro de 2005.

Métodos: analogia à ASTM C293/94.

RESULTADOS:

C.P.	Data da moldagem	Data do ensaio	Dimensões (mm)			Limite de resistência (MPa)		
			b	d	l			
1	9/11/05	20/12/05	50	51	170	5,32		
1			50	51	170	6,16		
2			50	51	170	5,32		
2			50	51	170	4,97		
3			50	51	170	5,80		
3			50	51	170	5,50		
3			50	50	170	6,16		
4			28/11/05	26/12/05	51	50	170	3,76
4					50	51	170	5,54
4	50	51			170	3,91		
5	50	51			170	5,16		
5	50	50			170	5,86		
5	50	51			170	4,37		

1/2

ANEXO 17 – Resultado de ensaio à tração na flexão aos 7 dias, p. 2 de 2



Documento	RELATÓRIO DE ENSAIO	Número	17514/55030
Os resultados contidos neste documento têm significação restrita e aplicam-se exclusivamente ao(s) item(ns) ensaiado(s) ou calibrado(s). Este documento somente poderá ser publicado na íntegra.			

Observação: o limite de resistência à tração na flexão foi determinado pela expressão:

$$f_t = \frac{3PL}{2bd^2}, \text{ onde:}$$

- ft = resistência à tração na flexão (MPa);
- P = carga de ruptura (N);
- L = vão livre (mm) = 150 mm;
- b = largura do corpo-de-prova (mm);
- d = espessura do corpo-de-prova (mm).

Porto Alegre, 05 de janeiro de 2006.

Eng. Civil Fernando A. Piazza Recena, M.Sc.
Coordenador Subst. Lab. Mat. de Constr. Civil
Gerente do Dep. de Mat. de Construção Civil

Eng. Civil Sergio Antonio Mazoni
Responsável Técnico – CREA – RS – nº 11716

