

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

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA FIBRA
VEGETAL DE *ARUMÃ* PARA APLICAÇÃO COMO REFORÇO À
MATRIZ CIMENTÍCIA

MARIA GORETT DOS SANTOS MARQUES

MANAUS
2009

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

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA FIBRA
VEGETAL DE *ARUMÃ* PARA APLICAÇÃO COMO REFORÇO À
MATRIZ CIMENTÍCIA

MARIA GORETT DOS SANTOS MARQUES

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
AMAZONAS, COMO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL .

MANAUS
2009

Ficha Catalográfica
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Marques, Maria Gorett dos Santos

M357c Caracterização das propriedades da fibra vegetal de *arumã*
para aplicação como reforço à matriz cimentícia / Maria Gorett
dos Santos Marques. - Manaus: UFAM, 2009.
119 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade
Federal do Amazonas, 2009.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

Co-orientador: Prof. Dr. Romildo Dias Toledo Filho

1. Fibra de *arumã* 2. Propriedades 3. Compósito.
Vasconcelos, Raimundo Pereira de II. Toledo Filho, Romildo Dias
III. Universidade Federal do Amazonas IV. Título

CDU 624.011.72(043.3)

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA FIBRA VEGETAL DE *ARUMÃ* PARA
APLICAÇÃO COMO REFORÇO À MATRIZ CIMENTÍCIA

Maria Gorett dos Santos Marques

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PESQUISA
E PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PPGEC) DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO AMAZONAS COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU EM MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL

Aprovada por:

Profº Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos - Presidente
Universidade Federal do Amazonas

Prof Dr. Romildo Dias Toledo Filho
COPPE/UFRJ

Dr. Basílio Frasco Vianez
Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia

Dra. Maria de Jesus Coutinho Varejão
Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia

Dedico esta pesquisa a minha família, que sempre me apoiou integralmente nesta grande tarefa, de modo muito especial a José Marques e Maria José, motivação de minhas conquistas.

Agradecimentos

Ao Nosso Pai Celestial por tudo que me tem proporcionado em fortaleza e muita determinação, por isso, quero agradecer, pois sei que ainda não é o fim, mas sim, o começo de tudo...

Aos meus pais por me permitirem a ausência temporária de suas vidas. Confesso neste momento um segredo,... O QUANTO É GRANDE O AMOR QUE SINTO POR VOCÊS!

Aos meus irmãos, minhas irmãs e sobrinhos que em mim sempre acreditaram. De modo especial, ao José Marques Neto, o meu muito obrigado.

Às minhas queridas irmãs (*in memoriam*) VANDA MARIA DOS SANTOS MARQUES E SÔNIA REGINA DOS SANTOS MARQUES por estarem presentes SEMPRE em todos os atos da minha vida.

Aos meus familiares por todo o apoio e demonstração de alegria e respeito.

Ao Professor Dr. RAIMUNDO PEREIRA DE VASCONCELOS, orientador desta dissertação, por todo empenho, sabedoria, compreensão e, acima de tudo, pela exigência que sempre me estimulou a dar este grande passo. Obrigado por ser profissional correto, dedicado e competente, fonte de apoio e ensino diário.

À Dra. Adalena Kennedy Vieira, com quem sempre pude contar para contribuir em meu trabalho.

Aos Drs. Basílio Frasco Vianez e Dra. Maria de Jesus Coutinho Varejão pela orientação prestada e pela oportunidade de crescimento, aprendizado, disciplina, realização profissional e

pessoal, e principalmente, pela confiança em mim depositada disponibilizando o laboratório de química da madeira do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA.

Ao grande Mestre Jadi Souza Rocha, que com uma sabedoria que lhe é peculiar, soube direcionar e orientar nos ensaios físicos da fibra vegetal de *arumã* realizados no laboratório do CPPF- INPA.

À minha grande amiga Irineide de Almeida Cruz que competentemente soube conduzir com bastante responsabilidade os ensaios químicos nos laboratórios do INPA. À estagiária Mariana T. C. Ferreira que se empenhou nas buscas de soluções adequadas.

À secretária Ivana Reis pelo seu “sim” em todos os momentos de dificuldades dando o auxílio devido.

Às minhas grandes amigas e irmãs Rosária dos S. Marques, Etelvina dos S. Marques, Marieth dos S. Marques, Socorro Marques, Marialva S. Marques, Luciana S. Marques, Fátima Magalhães, que me incentivaram a ingressar neste curso de mestrado, pelo companheirismo e pelo bom humor; e aos amigos Lourival de Paula Goés e Aloysio Cauby Pinheiro, que sempre estiveram presentes em meio as minhas dificuldades.

À minha grande amiga Luciane Ribas pelas discussões, pelas dicas, pelas fotografias e pela companhia e ajudas inestimáveis.

Ao meu grande colega Edisley Cabral, pela companhia, pela palavra amiga na hora necessária e pelos auxílios na execução dos ensaios.

Ao Padre JOSÉ DALLA VALLE: fonte espiritual inesgotável.

À família MONTEFUSCO pela valiosa amizade, carinho e dedicação demonstrados a minha pessoa.

Aos colegas do mestrado Ênio, Fernando, Heraldo, Edyssandra, Claudionildo, Lenize, Tércio, Samantha, Karine, Otávio e Kéllyson, que nos momentos difíceis me ampararam, auxiliaram, consolaram e incentivaram para que este trabalho pudesse ser concretizado.

À COPPE/RJ pela oportunidade de realizar os ensaios físicos e mecânicos desta dissertação de mestrado. Na oportunidade, agradeço em especial ao Dr. Romildo Dias Toledo Filho e ao doutorando João de Almeida Filho.

À UFAM pelo apoio logístico fornecido durante o período desta pesquisa. Agradeço a todos os profissionais da Universidade Federal do Amazonas (UFAM) que me ajudaram no decorrer deste trabalho.

Em especial:

- Ao técnico Nilson Braz Videl pela ajuda no dia-a-dia do laboratório;
- À Doutoranda Cristiane Daliassi R. de Souza, pelos equipamentos cedidos pelo CDEAM, pela disponibilidade e boa vontade para auxiliar ;
- Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela formação e pela integração com o Programa; professores Rubem César Rodrigues Souza e Omar Seye – departamento de elétrica, pela concessão do uso do Laboratório da Fazenda da UFAM – CDEAM. Ao Professor Ruy José de Sá pelos esclarecimentos, pela leitura da dissertação, dicas, e sugestões;
- Aos servidores e professores da UFAM, que marcaram presença em todas as nossas necessidades para a perfeita efetivação deste trabalho. De um modo especial, ao técnico Jorge Euvaldo Santiago, Esther Souza pela ajuda na produção das amostras;
- A FAPEAM, CAPES e PROCAD pelo auxílio à realização dessa pesquisa, com o auxílio da bolsa, garantindo-me sustento financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEC/UFAM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil (M.Sc.)

CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA FIBRA VEGETAL DE *ARUMÃ* PARA
APLICAÇÃO COMO REFORÇO À MATRÍZ CIMENTÍCIA

Maria Gorett dos Santos Marques

Maio/2009

Orientadores: Raimundo Pereira de Vasconcelos

Romildo Dias Toledo Filho

Nas últimas décadas têm ocorrido pesquisas com mais intensidade envolvendo a aplicação de produtos naturais, utilizando-se dos benefícios da floresta com o uso racional desses recursos. Neste trabalho é apresentada, a partir de embasamento técnico e científico, uma avaliação da potencialidade da fibra vegetal de *Arumã*, com a possibilidade de reforço de matrizes cimentícias, uma vez que as fibras possuem a capacidade de melhorar algumas das propriedades desse tipo de compósito, com um custo mais reduzido em relação ao uso de fibras convencionalmente utilizadas. O *Arumã* é encontrado em meio ao bioma da Amazônia, sendo uma espécie do gênero *Ischnosiphon polyphyllus* da família *Marantaceae*, muito utilizado pelas populações tradicionais da Região Norte em artesanatos e construção. A consolidação da pesquisa fez-se por meio da caracterização da fibra realizada por meio de experimentos com ensaios físicos, químicos e mecânicos da fibra vegetal. Sendo sua aplicação em reforço à matriz de cimentícia, cujo desempenho foi avaliado por meio de ensaios físicos e mecânicos de placas compósitas produzidas com a fibra de *Arumã*. Os ensaios demonstram o potencial do uso desta fibra como reforço à matriz cimentícia.

Palavra-Chave: compósito, propriedades, fibra de *arumã*.

Abstract of Dissertation presented to PPGEC/UFAM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science of Civil Engineering (M.Sc.)

CHARACTERIZATION OF THE PROPERTIES OF ARUMÃ VEGETABLE FIBER FOR APPLICATION AS REINFORCEMENT FOR CEMENTITIOUS MATRIX

Maria Gorett dos Santos Marques

May/2009

Orienters: Raimundo Pereira de Vasconcelos

Romildo Dias Toledo Filho

In recent decades, researches involving the application of natural products have occurred with more intensity, using the benefits of forests with the rational use of this resource. It is presented in this paper, from a technical and scientific base, an evaluation of the capability of *Arumã* vegetable fiber with possibilities to reinforce cementitious matrix, since the fibers improve some of the characteristics of this composite, with a lower cost in relation to the use of fibers conventionally utilized. The *Arumã*, found in the Amazon biome, is a species of the genus *Ischnosiphon polyphyllus* of the *Marantaceae* family, and herbaceous, perennial herbs, rhizomatous and caulescent. These fibers are widely used by the tradition people of the Northern Region in handicrafts and construction. The consolidation of the research was made through the physics, chemistries and mechanics experiments carried out in the vegetable *Arumã* fibers. Where this fiber was used to the reinforcement of cementitious matrix, which performance was evaluated by physics and mechanics experiments in composite plates with *Arumã* fiber. The experiments showed the potential of this fiber for reinforcement of cementitious matrix.

Key-words: composite, properties, *arumã* fiber.

Lista de figuras

Figura 1	Classificação dos compósitos com relação aos tipos de reforços	06
Figura 2	Classificação das fibras empregadas em compósitos	11
Figura 3	Nicho das espécies de <i>arumã</i> : (a) capoeiras; (b) cabeceiras de rios e igapós; (c) e (d) terra-firme	16
Figura 4	Nichos de <i>arumã canela</i> .	16
Figura 5	(a) <i>arumã tupé</i> e (b) nicho de <i>arumã</i> branco.	17
Figura 6	Pontos de coleta da fibra de <i>arumã</i> , na região Amazônica.	18
Figura 7	Representação das formas de disposição das fibras em laminados cimentícios.	23
Figura 8	Fibra na forma de cordão de filamentos contínuos.	24
Figura 9	Fibras em forma de manta.	25
Figura 10	Representação de tecido entrelaçado do tipo PLANE WEAVE.	26
Figura 11	Representação de tecido entrelaçado do tipo TWILL WEAVE.	27
Figura 12	Representação de tecido entrelaçado do tipo SATIN WEAVE.	27
Figura 13	Representação de tecido quase unidirecional.	28
Figura 14	Fibras alinhadas em manta.	29
Figura 15	Representação de fibras tecidas na forma tridimensional.	29
Figura 16	Fibras na forma de entrançados.	30
Figura 17	Fibras arranjadas em pré-formas com: (a) fibras longas e (b) fibras curtas.	30
Figura 18	Representação da cadeia de celulose.	35
Figura 19	Coleta e pulverização da fibra de <i>arumã</i> .	38
Figura 20	Armazenamento e secagem da fibra de <i>arumã</i> .	39
Figura 21	Saturação em água da fibra <i>arumã</i> .	43
Figura 22	Determinação do volume de água deslocada pela fibra de <i>arumã</i> .	44
Figura 23	(a) Depósito da amostra de <i>arumã</i> nas hastes do equipamento; (b) Leitura das alterações da massa da amostra, no sistema de gerenciamento computacional do equipamento.	45
Figura 24	Ensaio para determinação do módulo de elasticidade da fibra de <i>arumã</i> .	47
Figura 25	Sistema anti-esmagamento, adaptado à máquina SHIMADZU AUTOGRAPH AG- X 100 kN.	48
Figura 26	Exemplo de gráfico tensão x deformação obtido no ensaio de tração da fibra de <i>arumã</i> .	49
Figura 27	Comportamento das fibras de <i>arumã</i> , após ensaio de tração.	49
Figura 28	Água destilada – 500 ml.	51

Figura 29	Lavagem das amostras com álcool, e em seguida levadas para estufa - 103°C ± 2°C.	52
Figura 30	Superplastificante utilizado na produção do compósito .	54
Figura 31	Tela de fibra de <i>arumã</i> de 25 x 40 cm utilizada no compósito .	55
Figura 32	Diluição do superplastificante em água, sendo em seguida adicionada a mistura.	55
Figura 33	Forma de aço sendo forrada com filtro de papel .	56
Figura 34	Primeira camada de argamassa .	57
Figura 35	Segunda camada, arranjo da tela de <i>arumã</i> no molde.	57
Figura 36	Terceira camada, adição de argamassa .	58
Figura 37	Quarta camada, segundo arranjo da tela de <i>arumã</i> no molde.	58
Figura 38	Quinta camada, colocação da última porção de argamassa .	59
Figura 39	Compósito sendo vibrado .	59
Figura 40	Atuador servo-hidráulico utilizado na prensagem do compósito .	60
Figura 41	Relógio medidor de pressão de moldagem.	60
Figura 42	Laminados compósitos recebendo carregamento de pressão e compósito prensado.	61
Figura 43	Laminados compósitos armazenados após a prensagem .	61
Figura 44	Câmara úmida para armazenamento dos laminados compósitos .	62
Figura 45	(a)Forma untada com parafina; (b) Primeira camada de argamassa .	62
Figura 46	Acomodações na forma da tela de <i>arumã</i> e da camada de argamassa.	63
Figura 47	Laminados prensados e armazenados sob cobertas umedecidas.	63
Figura 48	Sistema para ensaio de tração, conforme LIMA (2004).	64
Figura 49	Laminados com placas de alumínio coladas e revestidas com juta em suas extremidades.	64
Figura 50	Configuração de corpo-de-prova para ensaio de tração (MELO FILHO, 2005).	65
Figura 51	Corpo-de-prova, com dimensões de 82,17 x 400 x 12,50 mm.	65
Figura 52	Configuração de ensaio à flexão em quatro pontos (MELO FILHO, 2005).	66
Figura 53	Ensaio à Flexão em quatro pontos – esbeltez da placa reforçada com fibra vegetal de <i>arumã</i> .	67
Figura 54	Ensaio de flexão em placas planas simplesmente apoiadas com carregamento central: (a) Placa de laminado pintada; (b) Iniciação do carregamento central.	69
Figura 55	Ensaio de flexão em placas planas simplesmente apoiadas com carregamento central: (a) Aparecimento das fissuras – superfície inferior da placa; (b) Fissuras cocêntricas – superfície superior da placa.	69
Figura 56	Esquema dos posicionamentos dos extensômetros, para melhor observação dos deslocamentos no centro da placa.	70
Figura 57	Análise termogravimétrica da fibra vegetal do <i>arumã</i> branco.	75

Figura 58	Análise termogravimétrica da fibra vegetal do <i>arumã canela</i> .	76
Figura 59	Análise termogravimétrica da fibra vegetal do <i>arumã tupé</i> .	77
Figura 60	Análise termogravimétrica da fibra vegetal do <i>arumã vermelho</i> .	78
Figura 61	TG das fibras vegetais dos <i>arumãs</i> .	79
Figura 62	DTG das fibras vegetais dos <i>arumãs</i> .	80
Figura 63	Gráficos tensão x deformação da amostra de <i>arumã</i> branco.	82
Figura 64	Curvas típicas de tensão x deflexão de tração na flexão, obtidos em compósitos com fibras de sisal (MELO FILHO, 2009).	85
Figura 65	Curvas típicas de tensão x deflexão de tração na flexão, obtidos em compósitos com fibras de sisal e de <i>arumã</i> .	86
Figura 66	Compósito no estágio de pós-fissuração em ensaio de flexão.	87
Figura 67	Ensaio de flexão com placa simplesmente apoiada sem o reforço da fibra vegetal de <i>arumã</i> branco.	89
Figura 68	Placa com os bordos simplesmente apoiados, ao receber carregamento central sofre rotação em seu bordo.	90
Figura 69	Ensaio de flexão com placa simplesmente apoiada com o reforço da fibra vegetal de <i>arumã</i> branco.	91
Figura 70	Distribuição das tensões atuantes na placa reforçada com fibra vegetal de <i>arumã</i> .	92
Figura 71	Distribuição das tensões atuantes na placa sem o reforço da fibra vegetal do <i>arumã</i> .	92
Figura 72	Demonstrativo dos gráficos com os deslocamentos ocorridos no centro das placas com e sem o reforço da fibra vegetal de <i>arumã</i> .	93
Figura 73	Ensaio de tração direta em placas reforçadas com fibras vegetais de <i>arumã</i> .	94

Lista de quadros

Quadro 01 – Características da água utilizada na confecção dos compósitos	42
Quadro 02 – Percentuais de perdas de massa dos principais componentes químicos da fibra vegetal de <i>arumã</i> , pela curva TG	80
Quadro 03 – Picos exotérmicos de maiores perdas percentuais / unidade de tempo - curva DTA.	81

Lista de tabelas

Tabela 1 – Propriedades químicas do cimento CP II F -32.....	39
Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II F - 32.....	40
Tabela 3 – Propriedades químicas e físicas para a metacaulinita.....	41
Tabela 4 – Densidade básica das fibras vegetais de <i>arumã</i>	72
Tabela 5 – Componentes químicos das fibras de <i>arumã</i>	73
Tabela 6 – Módulo de elasticidade e tensão última à tração (intervalo de variação)	83

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objetivos	2
2	COMPÓSITOS – CONCEITOS, COMPOSIÇÕES E APLICAÇÕES	3
2.1	Conceitos	3
2.1.1	Matriz	3
2.1.2	Matriz cimentícia	3
2.1.3	Material compósito	4
2.1.4	Compósito fibroso	7
2.1.5	Compósito com pozolanas	8
2.1.6	Fibras	10
2.1.7	Fibras vegetais	11
2.1.8	Matrizes livres de hidróxido de cálcio	13
2.1.9	Fibra vegetal de <i>arumã</i>	15
2.1.10	Metacaulinita	19
2.1.11	Laminados cimentícios	21
2.1.12	Formas de reforço	24
2.2	Aplicações	31
3	COMPOSIÇÃO DE UMA FIBRA VEGETAL	34
3.1	Composição química	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	Coleta da fibra vegetal de <i>arumã</i>	38
4.2	Caracterizações dos compósitos cimentícios	39
4.2.1	Cimento	39
4.2.2	Caracterização da argila calcinada - metacaulinita	40
4.2.3	Areia	41
4.2.4	Superplastificante	42
4.2.5	Água	42
4.2.6	Caracterização da fibra vegetal de <i>arumã</i>	42
4.3	Produção de laminados	54

4.4	Caracterização mecânica dos compósitos	63
4.4.1	Ensaio de tração direta	64
4.4.2	Ensaio de flexão em quatro pontos	65
4.4.3	Ensaio de flexão em placas simplesmente apoiadas com carregamento central	68
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1	Caracterização da fibra de <i>arumã</i>	71
5.1.1	Densidade	71
5.1.2	Composição química	72
5.1.3	Termogravimetria	74
5.1.4	Módulo de elasticidade e tensão última de tração	81
5.2	Caracterização do compósito	84
5.2.1	Flexão em quatro pontos	84
5.2.2	Flexão de placa simplesmente apoiada	89
5.2.3	Tração direta	93
5.3	Comentários finais	95
6	CONCLUSÕES	97
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	100
	ANEXOS	104

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A Revolução Industrial introduziu novas tecnologias e/ou metodologias de produção levando a um extraordinário aumento na produtividade, gerando novas relações sociais de trabalho. Rossetti (1993) considera que a partir de então o conhecimento e a capacidade tecnológica vem evoluindo e concomitantemente sendo transmitida por meio de gerações de forma cumulativa, levando a um extraordinário desenvolvimento dos recursos de capital cada vez mais avançados e sofisticados.

Os sistemas econômicos modernos dispõem de recursos de natureza variada, incluindo, recursos de produção, capacidade lógica e empresarial para as atividades de produção, além, das reservas e /ou recursos naturais. Os recursos naturais são elementos da natureza utilizados no processo primário de produção, sendo, portanto, recursos fundamentais para a produção dos bens que visam atender às necessidades humanas, consistindo de matérias-primas e potencialidades energéticas. Não basta, no entanto, possuir disponibilidade desses recursos, é necessário se dispor de mecanismos de efetivo aproveitamento dos mesmos. No caso de países que possuem uma rica biodiversidade, caso do Brasil, detentor de grande parte da Amazônia legal, a falta de uma política adequada para gestão dos recursos naturais e, de certa forma, a falta de recursos de capital e tecnológico, não tem permitido que os abundantes recursos naturais disponíveis sejam aproveitados de modo eficiente.

A necessidade de buscar inovações tecnológicas que sejam apropriadas a cada região, em consonância com a vocação das potencialidades de cada município, pode resultar no desenvolvimento de tecnologias apropriadas para cada região permitindo o seu desenvolvimento sustentável.

No presente trabalho procurou-se fazer uso desse conceito, desenvolvendo-se materiais compósitos de alto desempenho mecânico e durabilidade, utilizando-se a fibra de *arumã*, natural da região Amazônica.

As fibras de *arumã* foram utilizadas como reforço de matrizes cimentícias, contendo baixo teor de cimento que implica em baixo teor de CO₂ com aumento da durabilidade.

1.2 Objetivos

Objetivo geral:

- Avaliar a viabilidade técnica da utilização da fibra vegetal de *arumã* como reforço de compósitos cimentícios.

Objetivos específicos:

- Caracterizar física, química e mecânica a fibra vegetal, em quatro espécies de *arumã* (branco, *canela*, *tupé* e vermelho);
- Selecionar o tipo de fibra de *arumã* com as melhores características para a aplicação em compósitos cimentícios;
- Caracterizar as propriedades físico-mecânicas dos laminados compósitos com fibras vegetais de *arumã*.

2 COMPÓSITOS – CONCEITOS , COMPOSIÇÕES E APLICAÇÕES

2.1 Conceitos

2.1.1 Matriz

As matrizes são componentes que se caracterizam por serem contínuas com a capacidade de envolver os componentes de reforço, tendo como principal função a transmissão de tensões e fazer a conexão de elementos de reforço (Isaia, 2007). Apresenta desta forma, maior ductilidade e menor módulo de elasticidade que o elemento de reforço. Segundo Isaia (2007), a matriz forma a parte mais aparente e abundante do compósito e exerce duas funções principais:

- Envolver os elementos de reforço, para protegê-los de danos físicos e da eventual ação agressiva do ambiente circundante;
- Unir os elementos de reforço, com distribuição dos esforços.

2.1.2 Matriz cimentícia

As matrizes cimentícias podem apresentar-se de várias formas, tais como pasta, argamassa, ou ainda, como concreto simples ou estrutural. Estas são formadas pela hidratação do cimento, apresentando como resultante de suas propriedades a boa resistência à compressão, baixo módulo de elasticidade, baixa resistência à tração e comportamento frágil.

Segundo Isaia (2007), as argamassas são materiais que apresentam propriedades de aderência e endurecimento, obtidos a partir da mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo (areia) e água, podendo ter mais aditivos e adições minerais.

Por outro lado, com relação ao concreto, Isaia (2007) acrescenta que o cimento Portland, juntamente com a água, forma uma pasta mais ou menos fluida, dependendo do percentual de

água adicionado. Essa pasta envolve as partículas de agregados com diversas dimensões para produzir um material, que, nas primeiras horas, apresenta-se em um estado capaz de ser moldado em fôrmas das mais variadas formas geométricas. Com o tempo, a mistura endurece pela reação da água com o cimento, adquire resistência mecânica capaz de torná-lo um material de excelente desempenho estrutural com relação à compressão. Desta forma, o concreto normalmente é constituído por cimento, água, agregados e pode ter em sua composição, aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cujos empregos são bem difundidos na indústria da construção civil.

Dentre as matrizes utilizadas nos compósitos, destaca-se segundo sua estrutura e natureza química: as poliméricas, cerâmicas (sendo a cimentícia, a mais usada na indústria da construção civil), carbono e metálicas. A matriz em compósitos forma a fase contínua, com a função de homogeneizar e distribuir as tensões a que são submetidas.

A matriz cimentícia tem grande aplicação no mercado, pela facilidade com que a materialização do compósito pode ser conduzida, diante da fluidez e o baixo custo das matérias-primas. Sua estruturação normalmente ocorre por meio de componentes de reforço (fibras), com a finalidade de inserir a matriz cimentícia maior resistência à tração. Em geral, a dissipação de energia em uma matriz cimentícia reforçada com partículas, submetida a esforços internos, aumenta pelo menos em dobro, podendo atingir até 10 vezes em reforços fibrosos. O compósito cimentício fibroso acaba adquirindo um módulo de elasticidade superior ao da matriz (ISAIA, 2007).

2.1.3 Material Compósito

Segundo Callister (2000), o termo compósito está vinculado à existência de um material com caráter multifásico, que apresenta uma proporção considerável das propriedades

das fases que o constituem, podendo também apresentar algumas propriedades emergentes, decorrentes da combinação dessas fases.

Os compósitos podem ser entendidos, portanto, como materiais heterogêneos resultantes de uma combinação racional de pelo menos dois componentes com características diversas. Um deles pode ser descontínuo, primeiramente responsável pela resistência aos esforços mecânicos (componente estrutural ou de reforço), enquanto o outro contínuo, forma o meio de transferência dos esforços (componente matricial ou matriz). Esses dois componentes uma vez reunidos acabam conferindo ao compósito elevada resistência mecânica e perceptível leveza.

Segundo Isaia (2007), compósito ou materiais conjugados são os constituídos por dois ou mais materiais diferentes, que resultará na melhoria das propriedades do conjunto apresentando-as de formas especiais, ou na diferenciação das propriedades desses quando apresentados individualmente, por meio de utilização de métodos convencionais. Um compósito cimentício é originário da união de uma matriz cimentícia (que poderá ser um concreto, uma argamassa) com materiais diferentes, que podem ser associados à adição de fibras vegetais, vidro, aço, polipropileno, etc.

Os compósitos podem ser divididos em naturais e sintéticos, levando-se em consideração o relacionamento de diferentes classes com várias opções de matriz podem originar uma série de outras classificações que decorrem dos tipos e arranjos dos reforços existentes, de acordo com o diagrama da Figura 1 (PARDINI *et al.*, 2006).

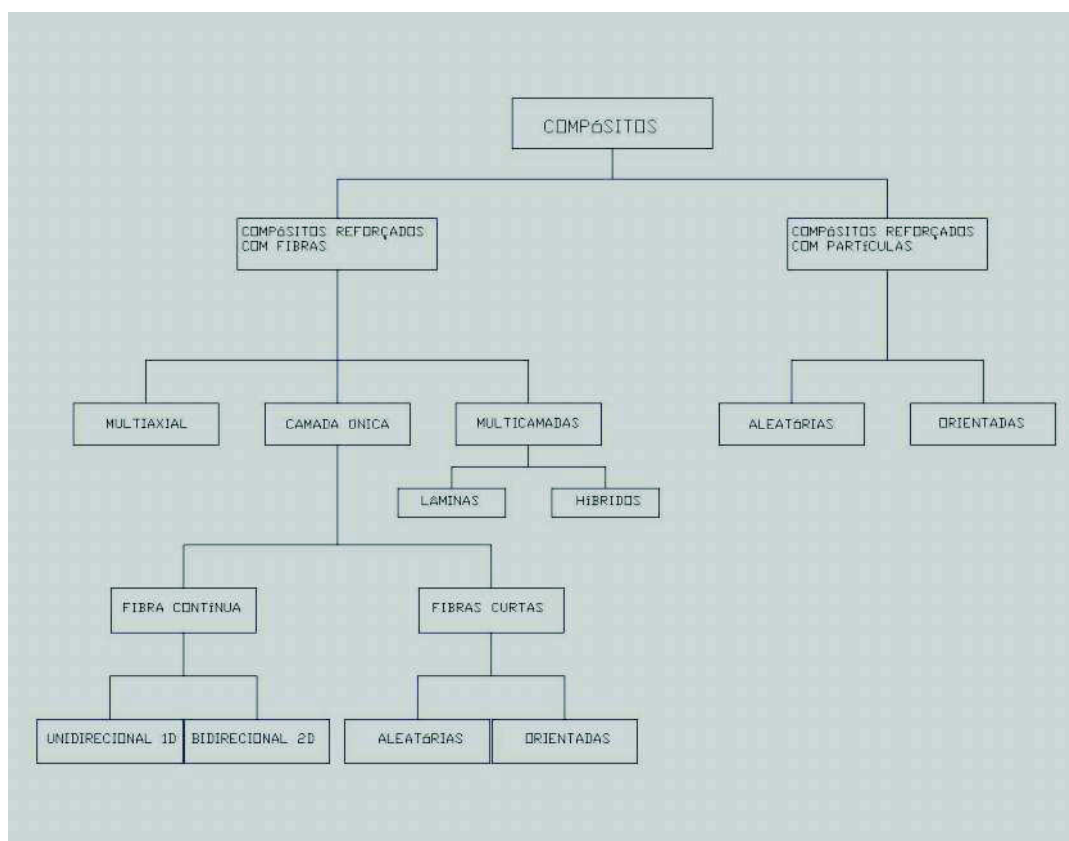


Figura 1. Classificação dos compósitos com relação aos tipos de reforços.

Fonte: PARDINI *et al.* (2006).

Relatos de Pardini *et al.* (2006), mostram que a tecnologia dos compósitos consiste em dispor fibras com as seguintes características: alta resistência mecânica, grande rigidez, leves, imunes à corrosão galvânica em posições predeterminadas e envoltas por uma matriz, e que por fim resulte em uma formação de um componente de elevado desempenho estrutural, isto, dentro de condições ideais de temperatura, tempo, pressão, umidade, resfriamento, entre outros, de acordo com as necessidades da fibra em utilização.

Estudos constataram que apesar dos materiais estruturais isotrópicos tradicionais apresentarem propriedades bem definidas, repetitivas e previsíveis, a partir de seu processo de fabricação, os compósitos em contrapartida, podem, com suas formas variáveis, ser direcionados aos requisitos que determinado projeto específico necessite que lhes possibilita liberdade de ajuste às necessidades exigidas (PARDINI *et al.*, 2006).

Os compósitos são constituídos essencialmente por dois componentes, a matriz e o componente de reforço. A matriz (contínua) é a parte mais visível e profusa do compósito, uni e protege os elementos de reforços, distribuindo entre os mesmos a tensão a que são submetidos. A classificação do compósito depende do tipo de matriz, da natureza e forma do componente de reforço, sendo o componente matricial um material polimérico, cerâmico, cimentício e metálico.

O elemento de reforço pode ser *descontínuo* quando assume a forma de partículas, ou, *contínuo* na forma de componentes fibrosos. Enquadra-se nesta última situação, a condição de que o material de reforço possui elevado aspecto de forma e natureza do componente de reforço: material constituinte, geometria transversal, formato da fibra, comprimento, área superficial e características de superfície.

A combinação de materiais diferentes para fins de obtenção de melhores propriedades, ou ainda de propriedades diferenciadas das que se apresentam como componentes isolados vêm conquistando o mercado da construção civil, de modo especial, as fibras vegetais pela sua viabilidade técnica, econômica e sua reprodução renovável.

2.1.4 Compósito Fibroso

Segundo relata Isaia (2007), o compósito reforçado por fibras teve sua aplicação conhecida desde os primórdios da civilização, em Roma e Antigo Egito, onde os adobes e tijolos recebiam reforço com raízes. Em escala industrial, o primeiro compósito a ser produzido foi o cimento-amianto, patenteado no início do século XX.

Com relação ao comportamento dos materiais fibrosos, deve-se frisar que são materiais polifásicos, com duas fases básicas: as fibras e a matriz na qual as primeiras estão embebidas. A função principal das fibras, como já mencionado anteriormente, é de ser reforço mecânico da própria matriz (ISAIA, 2007).

Nos compósitos fibrosos, as fibras podem ser alinhadas ou com distribuição aleatória, e no primeiro caso apresentam-se sob diversas formas: mantas, tecidos, e estruturas têxteis em diferentes arquiteturas. O volume de fibras em relação ao da matriz, sempre será inferior, independentemente de sua resistência mecânica ser maior ou menor à da matriz.

Vale ressaltar, que a alteração do comportamento do compósito depende do tipo de fibra, fração volumétrica de fibras, resistência, módulo de elasticidade, relação de aspecto, características de superfície e orientação das fibras.

Com a adição de fibras às matrizes cimentícias, comprovadamente verifica-se a alteração do comportamento do compósito no estágio pós-fissuração, apresentando uma deformação plástica apreciável, ou seja, com comportamento dúctil, dando, portanto, uma potencial viabilidade técnica do uso desse tipo de compósito na construção civil, (ISAIA, 2007).

Segundo Callister (2000), os compósitos com fibras podem ser considerados os mais importantes tecnologicamente. A incorporação das fibras permite modificar fortemente as características de matrizes frágeis, como o concreto, aumentando sua ductilidade, tenacidade, resistência à tração e aos impactos. Isso explica o grande espectro de aplicações desse tipo de compósito.

2.1.5 Compósito com Pozolanas

Segundo Mehta (2008), pozolana é um material que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, mas que, quando finamente dividido e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes.

As pozolanas podem ser originárias de materiais naturais, normalmente derivados de rochas ou minerais vulcânicos (tufos vulcânicos, terras diatomáceas e argilas calcinadas).

Os subprodutos industriais, originários da secundarização nas indústrias produtoras, podem sofrer algum tipo de processamento (secagem e pulverização) antes de serem utilizados como adição mineral, ou ser submetidos a algum tratamento térmico como argilas e determinadas rochas que contém sílica.

O principal produto da reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio é o silicato de cálcio hidratado (C – S – H), podendo ocorrer a formação de aluminatos de cálcio hidratado. A precipitação do C-S-H ocorre pela dissolução da pozolana em meio alcalino com sua combinação com os íons Ca_2^+ presentes em solução (JOHN & NITA, 2007).

A pozolana pode ser utilizada com o cimento Portland ou ativada diretamente com cal usual no primeiro caso, uma vez que nas misturas com cal a reação pozolânica é lenta (MASSAZZA, 1993). Normalmente, seu uso é viabilizado, em função da busca da redução de custos, quando substitui parcialmente o cimento, ou com o seu adicionamento em percentuais variáveis em relação à massa de cimento, com o uso simultâneo de aditivos superplastificantes.

Pesquisadores têm verificado os benefícios da substituição de parte do cimento por outros aditivos minerais (microssílica, cinza volante, metacaulinita, resíduo cerâmico, e outros) que tenham atividade pozolânica, proporcionando assim uma estrutura de poros mais densa e, em consequência, aumento de resistência química (Roy *et al.*, 2001), aumento de resistência à compressão e impermeabilidade nos componentes à base de cimento. (RODRÍGUEZ-CAMACHO & URIBE-AFIF, 2002).

A principal finalidade da adição destes aditivos minerais é provocar reações pozolânicas, as quais consomem o hidróxido de cálcio formando o C -S-H (silicato de cálcio hidratado) e diminuindo a alcalinidade. Com relação à reação de formação do C -S-H, é útil

uma comparação entre sua formação no processo de hidratação do cimento Portland comum e do cimento Portland com adições pozolânicas:

Formação do C-S-H no Cimento Portland Comum: $C_3S + H \rightarrow C-S-H + CH$

Formação do C-S-H a partir da reação pozolânica: Pozolana + CH + H \rightarrow C-S-H.

O desempenho de uma dada pozolana no concreto depende de fatores tais como:

- (i) composição química, teor de fase vítrea, índice de atividade pozolânica, teor de substituição, granulometria, diâmetro médio, forma e massa específica do material pozolânico;
- (ii) proporção dos materiais, relação água/cimento, tipo de cimento, tipo de agregados, aditivos químicos, idade e grau de hidratação do concreto (GONÇALVES, 2004).

Outro dado muito importante na substituição do cimento por adições minerais é a diminuição de emissões de poluentes. Para o ano de 2001, as emissões atingiram 25,22 milhões de toneladas, tendo um fator de emissão de cerca de 0,651 tonelada de CO₂ para cada tonelada de cimento produzido. Uma redução de cerca de 5,04 milhões de toneladas de emissões poderia ter sido obtida se 20% de resíduo cerâmico tivesse sido utilizado em substituição ao cimento Portland (GONÇALVES, 2004).

2.1.6 Fibras

As fibras podem ser divididas em *naturais* e *artificiais*; sendo a primeira, subdividida em vegetais, animais e minerais. As minerais são formadas por cadeias cristalinas (asbesto); as de origem animal de cadeias protéicas, e, as vegetais de cadeias celulósicas (sisal, bambu, bananeira e etc.). As fibras artificiais, por sua vez, denominadas também de sintéticas (aramida, carbono, nylon, poliéster, etc.), são provenientes de pesquisas avançadas na área de engenharia de materiais, empregando o petróleo e seus derivados, além, da tecnologia na área têxtil. A Figura 2 apresenta uma classificação para as fibras empregadas em compósitos .

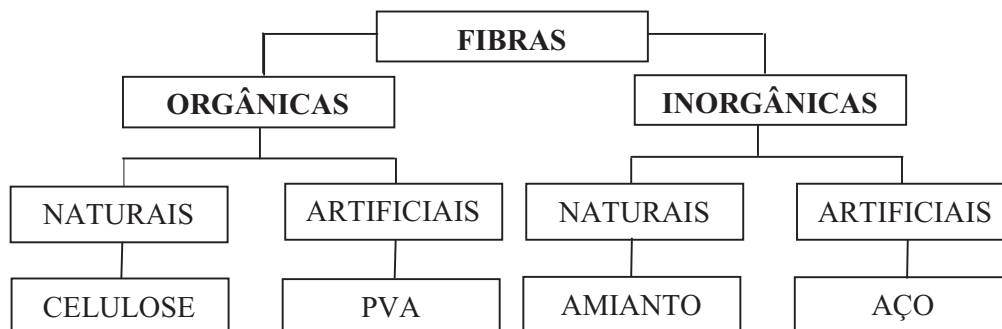


Figura 2. Classificação das fibras empregadas em compósitos.

2.1.7 Fibras Vegetais

Conforme Pardini *et al.* (2006), as fibras naturais podem ser de origem vegetal, animal ou mineral, sua finalidade em alguns compósitos é fazer com que o mesmo atue como uma carga de material reciclável e de baixo custo à matriz. As fibras minerais são formadas por cadeias cristalinas com grande comprimento, como as do asbesto. As fibras de origem animal têm cadeias protéicas, enquanto as vegetais apresentam natureza celulósica.

O uso de fibras vegetais em compósitos tem aberto discussões, por envolver aspectos ambientais, sociais e econômicos. Dentre as fibras vegetais que são empregadas no mercado da construção civil, tem-se a fibra de sisal e de celulose, que quando avaliadas sob o aspecto de adição fibra + matriz, apresentam propriedades desejáveis e satisfatórias, que melhoram algumas características do compósito cimentício.

Segundo Moura *et al.* (2005), o sisal é constituído por fibras naturais com diâmetros entre 125 e 500 μm e com comprimentos entre 100 e 150 cm, habitualmente. Como reforço, os compósitos resultantes da adição do sisal apresentam propriedades que estão abaixo das que se conseguem com reforços em fibra de vidro. Além disso, salienta-se o fato de serem bastante higroscópicas, isto é, absorvem grande quantidade de água.

Existem vantagens e desvantagens da utilização das fibras vegetais em compósitos cimentícios, (TOLEDO FILHO, 1997). As principais vantagens das fibras vegetais:

- Baixa massa específica;
- Maciez e abrasividade reduzida;
- Renováveis, não tóxicas e biodegradáveis;
- Baixo custo;
- Estimulam empregos nas zonas rurais;
- Baixo consumo de energia na produção.

Desvantagens das fibras vegetais:

- Acentuada variabilidade nas propriedades mecânicas e baixa estabilidade dimensional;
- Alta sensibilidade a efeitos ambientais, tais como variações de temperatura e umidade;
- Apresentam seções transversais de geometria complexa e não uniforme;
- Propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais estruturais tradicionais;
- Estrutura porosa, que causa elevada capacidade de absorção de água e inchamento, que possibilita uma diminuição da aderência na interface fibra/matriz.

Além das desvantagens citadas anteriormente, deve-se ressaltar que a durabilidade das fibras vegetais acaba sendo comprometida pelo caráter alcalino das matrizes cimentícias, que

no decorrer do tempo, afetam sua integridade. Para a efetiva minimização desses efeitos as fibras podem passar por tratamentos superficiais que a protegem da ação da água e de outros agentes agressivos, os quais projetados de forma adequada possibilitam colaborar na aderência fibra-matriz.

2.1.8 Matrizes Livres de Hidróxido de Cálcio

A utilização de fibras vegetais em compósitos cimentícios tem se tornado um desafio no estudo de materiais não convencionais. Tendo em vista que as fibras ao longo de sua vida útil ficam sujeitas às reações alcalinas do cimento, levando-as à mineralização, devido a migração do hidróxido de cálcio ou CH para o lúmen e a parede das fibras vegetais, bem como a da variação de volume das fibras com a absorção de água. A substituição parcial do cimento Portland, por materiais que possuam propriedades pozolânicas, como os aditivos minerais, transformam os hidróxidos de cálcio em estruturas cristalinas menores e mais resistentes. Quando reagem com a cal livre do cimento, ou seja, o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sua combinação dá origem à formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que compõe cerca de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland hidratada.

Com o uso em expansão de mercado, esses materiais residuais originários de fornos metalúrgicos e pozolanas naturais, influenciam nas propriedades mecânicas dos compósitos favorecendo-lhe na durabilidade, além, de melhorar sua resistência e impermeabilidade, em função dos refinamentos dos poros. Nos compósitos com fibras naturais, reduzem o ataque alcalino do cimento às fibras.

Segundo Soares dos Anos *et al.* (2003), materiais pozolânicos podem melhorar significativamente as propriedades dos compósitos tanto no estado fresco como endurecido, melhorando também sua durabilidade através da reação pozolânica realizada por esses materiais que transformam o hidróxido de cálcio, cristais grandes e instáveis, em estruturas

cristalinas menores e mais resistentes, o CSH (silicato de cálcio hidratado). Outros materiais com propriedades pozolânicas têm sido usados para substituição parcial do cimento como a cinza volante, a cinza da casca de arroz, a metacaulinita, a cinza do bagaço e da palha da cana de açúcar.

De acordo com Toledo Filho *et al.* (2008), a utilização de metacaulinita e de fibras vegetais na produção de fibrocimento resulta em um material ecologicamente mais eficiente do que os tradicionais. Cerca de 20% dos compostos hidratados do cimento são CH, que não contribui para a resistência final do material endurecido. Cita ainda o autor, que a metacaulinita forma silicatos de cálcio hidratados no período da hidratação do cimento Portland melhorando, portanto, a resistência e durabilidade das matrizes, no estado endurecido.

A matriz estudada por Toledo Filho *et al.* (2008), é uma matriz de argamassa reforçada por fibras longas de sisal, com adição de metacaulinita em parcial substituição ao material cimentante, dando origem a uma matriz mais resistente, menos porosa e com menor absorção da água, contribuindo desta forma, para a preservação das fibras de sisal dentro dos compósitos.

Neste estudo, o material pozolânico agregado à matriz cimentícia reforçada com fibras tecidas de *arumã* foi a metacaulinita, que reduziu consideravelmente o teor de hidróxido de cálcio, diminuindo desta forma, a porosidade e aumentando a resistência do compósito.

2.1.9 Fibra vegetal de *arumã*

O Brasil com uma rica biodiversidade e tem na sua reserva natural um de seus maiores ativos. O Amazonas é um Estado que se destaca na Amazônia brasileira devido aos menores índices de desmatamento e incontáveis reservas de recursos naturais (GOVERNO FEDERAL, 2000).

A fibra vegetal de *arumã* encontrada em meio ao bioma da região Norte, espécie do gênero *Ischnosiphon polyphyllus* ((Poeppig & Endl) Koern apud Nakazono) da família *Marantaceae*, é uma herbácea perene, rizomatosa, caulescente, com altura que chegam a atingir até 2,50 m (Figura 3). Encontrada em áreas inundáveis, pântanos e beira de rios e igapós, são muito utilizadas pelas populações tradicionais desta região em artesanatos (cestos, tupés, peneiras, balaios, tipitis e outros mais) e construção (amarrações para outros tipos de fibras para coberturas, vedação de parede), conforme anexo 8, que representa uma renda complementar na economia dessas famílias.

Natural das áreas do Rio Negro, este tipo de vegetação apresenta uma característica que lhe é muito peculiar, a cada semestre do ano fica submersa às águas desta região que apresenta um pH em média de 5,01, sem que lhe ocorra algum tipo de prejuízo que possa influenciar em sua estrutura fibrilar, resistente quando permanece em terra firme ou em capoeiras. Na Figura 3 são apresentados alguns tipos de nicho em que o *arumã* abrolha.



Figura 3. Nichos das espécies de *arumã*: (a) capoeiras; (b) cabeceiras de rios e igapós; (c) e (d) terra-firme.

Foram identificadas quatro espécies de *arumã*. O *arumã canela* de *jacamin*, originário de touceiras, que apresenta intercalações por joelhos no segmento d e sua haste e poucas folhas na ponta do galho (Figura 4).



Figura 4. Nichos de *arumã canela*.

O *arumã tupé* e branco possuem hastes lisas e galhos com numerosas folhas; o primeiro apresenta folhas menores e compridas que medem cerca de 0,25 m, enquanto que o segundo possui folhas grandes e ovais que medem em média 0,50 m. Ambos são naturais de cabeceiras de igarapés ou capoeiras (Figura 5).



Figura 5. (a) *arumã tupé* e (b) nicho de *arumã* branco.

O *arumã* vermelho possui a entrecasca avermelhada, haste lisa, desprovido de galhos com folhas que se desenvolvem na ponta do talo.

A pesquisa da qual trata este trabalho foi realizada a partir de experimentos com a fibra vegetal de *arumã* coletada nos municípios de Presidente Figueiredo, São Gabriel da Cachoeira e comunidade do Livramento, no Estado do Amazonas. Situados na longitude 60.03202 ($60^{\circ}19'12,72''$ W) e latitude -2.035398 ($-2^{\circ}2'7,43''$ S), à margem esquerda do rio Negro: latitude -0.106448 ($-0^{\circ}06'23,21''$ S), longitude 67.091882 ($67^{\circ}05'30,78''$ W), de acordo com Figura 6.

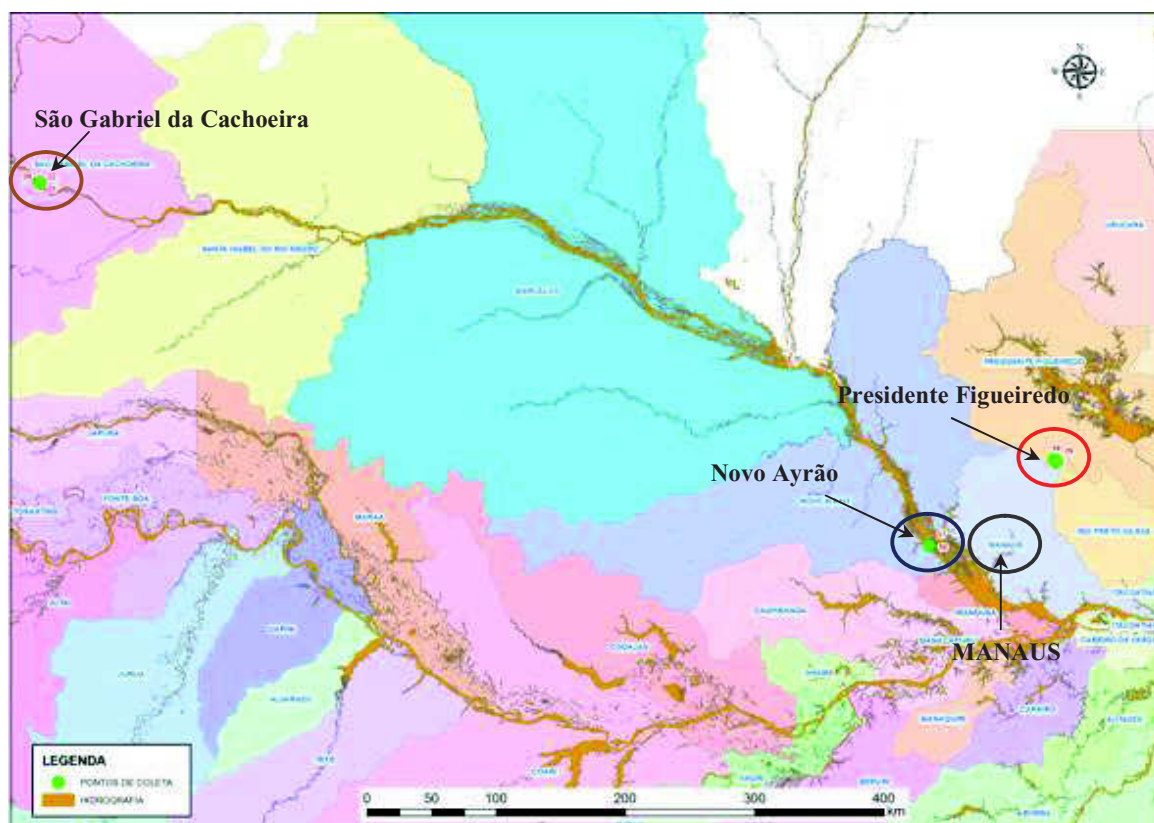


Figura 6. Pontos de coleta da fibra de *arumã*, na região Amazônica.

Destaca-se que a sobrevivência do *arumã* depende de vários fatores que conduzem a sua reprodução em grande ou pequena escala. A inundação, a luminosidade, a extração com cautela dos talos e o manejo da espécie, são agentes determinantes para a renovação da espécie.

Verificou-se em campo que algumas espécies do *arumã canela* chegaram a atingir em torno de 14 m de altura. Estes exemplares foram encontrados em áreas bosqueadas, área de maior incidência dos raios solares.

A necessidade do manejo da espécie é fundamental, uma vez que a fibra é uma alternativa para a sobrevivência dos artesãos, através de sua confecção e comercialização. Sua utilização na construção civil poderá ser feita mediante adição em matriz cimentícia para a produção de placas, com potencial de reforçar o compósito como elemento redutor da fragilidade dos materiais na ruptura.

Assim, a utilização desta fibra, apresenta-se como mais um recurso que pode ser utilizado no benefício direto das populações tradicionais e interioranas, assim como contribuir para o desenvolvimento e fortalecimento do mercado de produtos naturais a partir de seu aproveitamento sustentado, mas também gerando benefício social para o homem da região.

O crescimento predatório verificado a partir de políticas de desenvolvimento que nem sempre foram adequadas à região, tem contribuído para o êxodo rural com conseqüências sociais graves, agravadas por estratégias que induzem a impactos ambientais consideráveis. Em conseqüência, nas últimas décadas, tem havido um incremento da pesquisa a partir de produtos florestais madeireiros e não madeireiros, para mitigar os impactos ambientais e sociais já causados, como também buscar e encontrar alternativas de desenvolvimento sustentável, que possam além de reter as populações tradicionais em suas localidades, aproveitar os recursos da floresta em seu benefício.

Desse modo, mais uma alternativa desses recursos que possa ser utilizada tanto para benefício direto das populações tradicionais e interioranas quanto contribuir para o desenvolvimento e fortalecimento do mercado de produtos naturais a partir de seu aproveitamento, é muito bem vinda.

2.1.10 Metacaulinita

O uso de metacaulinita na substituição parcial do cimento portland na produção de concretos e argamassas de alto desempenho, nos últimos anos tem ocorrido em uma escala crescente, em função da sua ação pozolânica, que através da mistura do cimento e da metacaulinita ocorre a aceleração das reações de hidratação, ocasionadas pela ação dispersantes das pozolanas sobre as partículas de cimento.

Segundo Melo (2005), a metacaulinita é uma sílica amorfa obtida pela calcinação de argila caulínica (caulim), a temperaturas entre 500 ° C e 650 ° C; moída até a finura de 700 m²/kg ou 900 m²/kg, o que resulta num material de grande pozolanicidade (LIMA, 2004).

A substituição de parte do cimento por metacaulinita tem trazido muitos benefícios às argamassas e concretos. Gonçalves (2004) estudou diferentes porcentagens de substituição chegando à conclusão de que o teor de 20% apresenta maior incremento na resistência à compressão, maior refinamento da estrutura de poros, redução da absorção e da penetração acelerada de íons cloretos, enquanto que um teor de 10% apresenta maior resistência ao ataque por sulfato de magnésio, redução de absorção e penetração acelerada de íons cloretos.

Lima (2004) constatou, através de análises térmicas, a ausência total de Ca (OH)₂ para pastas com teores de 30% de metacaulinita, sendo essa conclusão baseada em ensaios realizados em amostras curadas no período de 28 dias a 2 anos, comprovando a eficiência da metacaulinita na eliminação do Ca (OH)₂.

Neste trabalho, para reduzir o ataque às fibras vegetais pelos álcalis do cimento portland e pela ação do hidróxido de cálcio (que é originário da hidratação dos silicatos), utilizou-se metacaulinita na matriz, pela inclusão de materiais pozolânicos, com a substituição parcial do cimento, provocando uma reação pozolânica que consumisse o hidróxido de cálcio. São vários os benefícios agregados as propriedades do compósito com a reação pozolânica, destacando-se: baixa permeabilidade; alta resistência inicial; evita a acomodação das partículas do cimento Portland na interface agregado-matriz. Essas propriedades são necessárias ao compósito reforçado com fibras vegetais, uma vez que, estas possuem a capacidade de absorver água (hidrofilicas), expandindo-se, e no processo de cura, tendem a retrair-se, provocando assim, o aumento da relação água/cimento na região de interface fibra/matriz.

Outro aspecto que deve ser observado na fase inicial de hidratação é que neste período a metacaulinita consome rapidamente o hidróxido de cálcio, densificando a matriz cimentícia, limitando a mobilidade iônica necessária para que as reações pozolânicas ocorram, podendo desta forma, gerar um desdobramento maior de resistência em idades avançadas (ZHANG e MALHOTRA (1995) apud CORDEIRO (2001)).

2.1.11 Laminados cimentícios

Segundo Callister (2000), um compósito laminar é uma série de folhas bidimensionais, cada uma possuindo uma direção preferencial de resistência mais alta, prensadas umas sobre as outras segundo diferentes orientações; a resistência no plano do laminado é altamente isotrópica.

Isaia (2007) afirma que os compósitos laminados são painéis com diferentes camadas, empilhadas e firmemente aderidas umas às outras, para propiciar um com portamento monolítico. As camadas podem conter fibras, que são orientadas em direções diferentes, para aumentar a resistência transversal. Isso termina por gerar um material altamente resistente, com características isotrópicas, dúctil e com alta resistência a cargas de flexão ou de impacto.

Segundo Melo Filho (2005), componentes laminares (de seção fina) para construção civil são conhecidos desde o século XVIII, quando, na Áustria, Ludwing Hatschek produziu placas de cimento e asbesto com uma máquina de prensar papel modificada (GALE, 1994).

O aperfeiçoamento desse processo de fabricação, denominado Hatschek, fez com que o cimento amianto (cimento + fibras de asbesto) se tornasse o principal produto laminado utilizado na construção civil sob a forma de telhas, caixa d'água, painéis e divisórias.

Lima (2004) verificou que, mesmo utilizando fibras vegetais, com baixo módulo de elasticidade e baixa aderência fibra-matriz, é possível obter compósitos laminados com resistências, à tração e à flexão, superiores às da matriz. Além disso, obtém-se um produto

com maior tenacidade e deformação à ruptura, o que conseqüentemente lhe confere mais utilidade e segurança.

Para a produção de placas de concreto reforçadas com malhas de fibras de sisal ou fibras isoladas, Persson e Skarendahl (1980) classificam os métodos de produção em três níveis, a depender do desenvolvimento tecnológico empregado: nível manual; escala semi-industrial e mecanizado. No processo semi-industrial a matriz é produzida em betoneira simples e lançada sobre um molde plano ou corrugado, onde já se encontra o reforço. A mistura é então compactada sobre uma mesa de vibração.

Antes de ser colocada para curar, a superfície sofre um acabamento final. Esse processo gera produtos laminados, com camadas de propriedades bem definidas, seja na geometria, seja no tipo de material.

Jones (1975) classifica os materiais compósitos em três classes: compósitos com fibras, que consistem em fibras dispersas ou alinhadas dentro de uma matriz; compósitos laminados, que são constituídos de camadas de diferentes materiais e compósitos particulados (ou em partículas) que são partículas de um determinado material inserido dentro de uma matriz.

Nos dias de atuais, os compósitos mais produzidos consistem em fibras curtas dispersas no interior da matriz. Nesse tipo de reforço, a contribuição das fibras para as propriedades mecânicas do compósito é inferior à que ocorre quando são utilizadas fibras longas orientadas perpendiculares ao carregamento, quando estes são submetidos à flexão.

Diversas são as formas em que fibras podem ser dispersas no interior das matrizes. As diferentes distribuições de fibras em laminados podem ser distribuídas em forma de malhas e tecidos como reforço primário de polímeros e é utilizada extensivamente na indústria da aeronáutica. Essas configurações de fibras podem ser saturadas facilmente por polímeros, o quais não acontecem com matrizes cimentícias, devido à dificuldade de penetração da matriz no interior desses tecidos, o que pode explicar porque não tem sido utilizado para produção de

compósitos com matriz cimentícia (NAAMAN, 2000). Na Figura 7 estão representadas as formas de disposição das fibras em laminados cimentícios.

Têm-se também disponíveis no mercado fibras dispersas aleatoriamente e a hibridização com fibras curtas e longas.

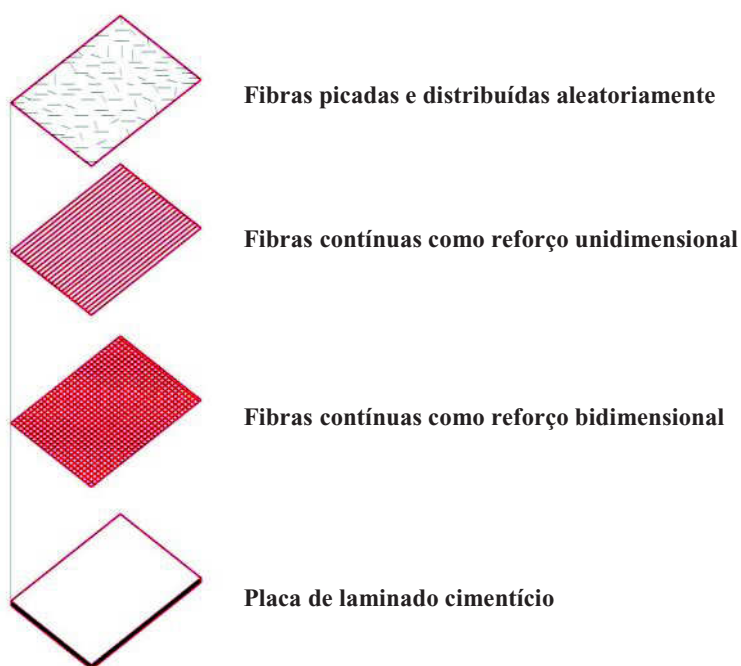


Figura 7. Representação das formas de disposição das fibras em laminados cimentícios.

Segundo Pardini *et al.* (2006), os compósitos obtidos a partir de lâminas reforçadas com fibras unidirecionais e tecidos bidirecionais, tendem a ser muito mais eficientes estruturalmente em relação aos compósitos obtidos com fibras picadas e mantas contínuas. Portanto, os esforços aplicados transversalmente conferem melhor desempenho estrutural, quando se trata de fibras contínuas unidirecionais ou bidirecionais. Subentende-se, portanto, que a orientação da fibra com relação aos esforços a que é submetida, influencia na resultante das propriedades mecânicas do compósito.

2.1.12 Formas de Reforço

São várias as formas que as fibras podem ser empregadas em estruturas de compósitos cimentícios, atuando como elemento de reforço, dentre as quais podem ser destacadas:

- **Roving**

É um cordão de filamentos contínuos enrolados em forma helicoidal em bobinas. Suas fibras possuem diâmetros de 9 ou de 13 μm . Sua produção poderá ser em fibras curtas, tecidos, ou mantas, entrançados, malhas ou híbrido (MOURA *et al.*, 2005), conforme Figura 8;

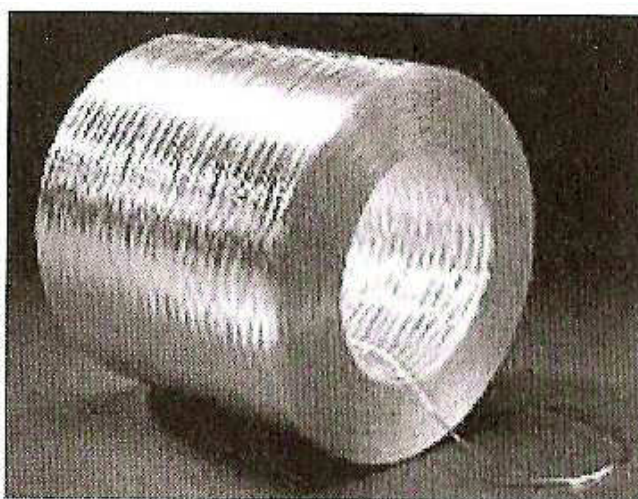


Figura 8. Fibra na forma de cordão de filamentos contínuos.
Fonte: Moura *et al.* (2005).

- **Mantas**

A distribuição das fibras nas mantas ocorre de forma aleatória e são aglomeradas por um ligante especial em emulsão ou em pó, devendo ser solúvel na impregnação (MOURA *et al.*, 2005), conforme Figura 9. Destacam-se três tipos de mantas:

- a) **Mantas de filamentos cortados ou *Chopped Strand Mat (CSM)*** – as fibras apresentam comprimentos típicos menores do que 50 mm e as propriedades mecânicas são baixas;
- b) **Mantas de filamentos contínuos ou *Continuous Random Mat (CRM)*** – Fornece melhor conformabilidade e conseqüentemente melhores propriedades do compósito;
- c) **Mantas de superfície** – Caracterizam-se pela sua leveza (20 a 30 g/m²) e são constituídas por fibras curtas pré-impregnadas com resina, nas quais se evita o afloramento de fibras à superfície.

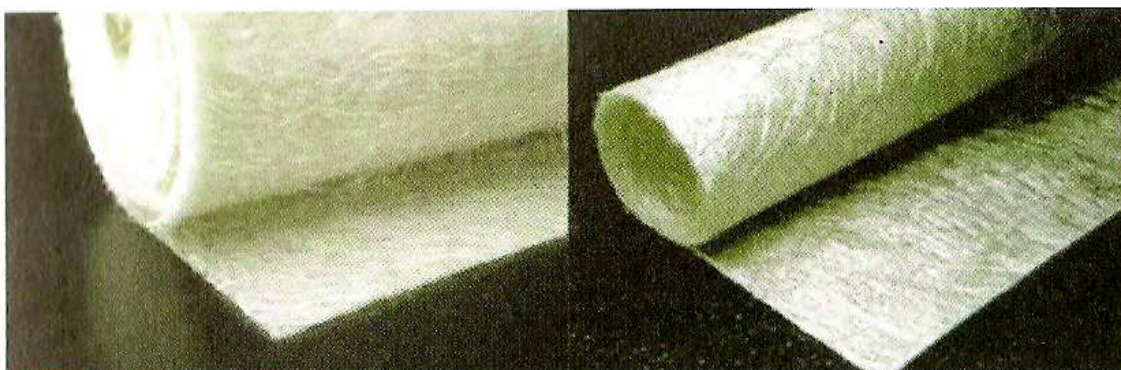


Figura 9. Fibras em forma de manta.
Fonte: Moura *et al.* (2005).

• Tecidos 2D

É a confecção de uma ligação entre feixes de fibras longas de carbono, aramida, vidro ou a combinação destas, para aplicações em elevadas propriedades mecânicas. Os tecidos são caracterizados pela orientação das fibras, pelos diferentes métodos empregados na sua confecção e classificados pela massa por unidade de área, similar as mantas, (MOURA *et al.*, 2005). Os tecidos 2D podem ser classificados como:

➤ **Tecidos entrelaçados**

São os produzidos pelo entrelaçamento de fibras segundo direções perpendiculares, com apresentação de padrões variados, dentre os quais citam-se:

○ **Plane Weave**

Cada fibra orientada a 0^0 passa, alternadamente, por baixo e por cima de cada fibra orientada a 90^0 , apresentando desta forma, certa simetria (Figura 10).

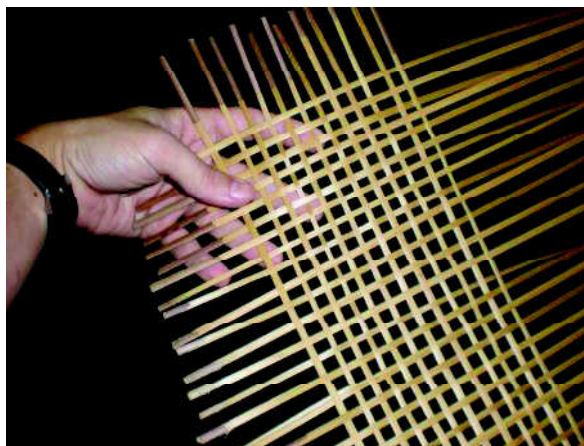


Figura 10. Representação de tecido entrelaçado do tipo Plane Weave.

○ **Twill Weave**

Uma ou mais fibras a 0^0 é tecida, alternadamente, por cima e por baixo de duas ou mais fibras a 90^0 , de forma regular ou repetitiva, (Figura 11).

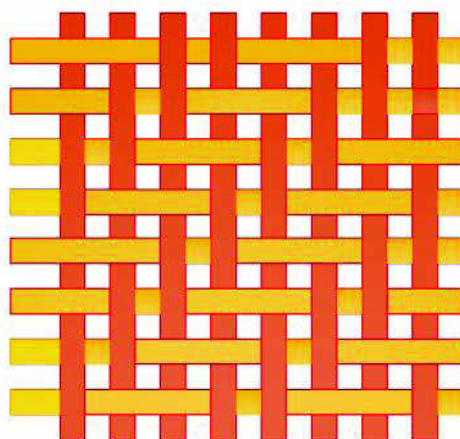


Figura 11. Representação de tecido entrelaçado do tipo Twill Weave.

- **Satin Weave**

São tecidas quase igualmente a dos tecidos Twill weave, com o diferencial apenas de poucas intersecções entre as fibras a 0° e as fibras a 90° (Figura 12).

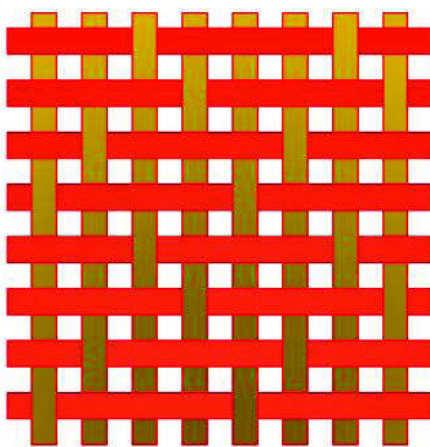


Figura 12. Representação de tecido entrelaçado do tipo Satin Weave.

- **Tecidos quase unidirecionais**

Caracterizados por apresentarem uma quantidade elevada de fibras orientadas a 0° , chegando a compor até 95 % da massa total. Sua principal função é oferecer estabilidade, dispondo as fibras no conjunto, no local preciso e em quantidade necessária (Figura 13).



Figura 13. Representação de tecido quase unidirecional.

➤ **Tecidos híbridos**

São resultantes de combinações de diferentes tipos de fibras (vidro, carbono e aramida). Este compósito apresenta, com relação aos compósitos convencionais, as características mais favoráveis das fibras diferentes, compondo desta forma, melhor resistência mecânica, rigidez, tenacidade e maior leveza.

• **Malhas**

As malhas são interligadas por sucessivas camadas de fibras alinhadas, resultando elevado módulo de elasticidade em tração e flexão com a melhor distribuição de cargas pelas fibras. Quando usadas em diferentes orientações, obtém-se um reforço com propriedades isotrópicas, (MOURA *et al.*, 2005), de acordo com Figura 14.

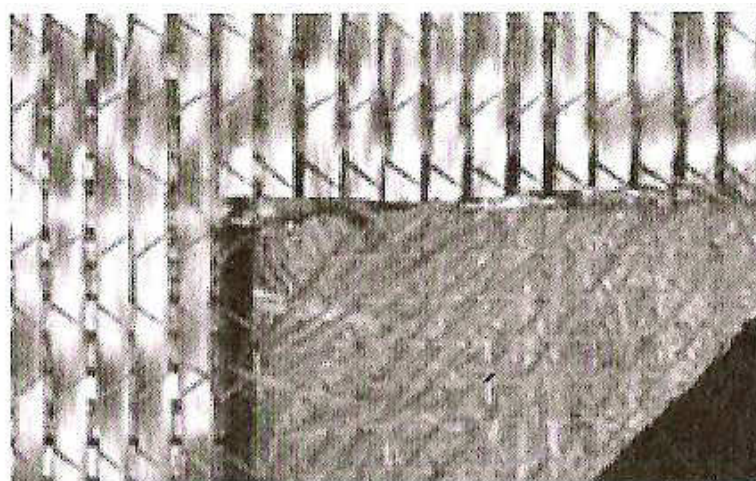


Figura 14. Fibras alinhadas em manta.
Fonte: MOURA *et al.* (2005).

- **Tecidos 3 D**

São obtidos a partir de processos especiais de tecelagem, que ligam múltiplas camadas de fibras com orientações diversas, sendo utilizados na confecção de fôrmas para painéis e perfis com fins estruturais, (MOURA *et al.*, 2005), conforme Figura 15.

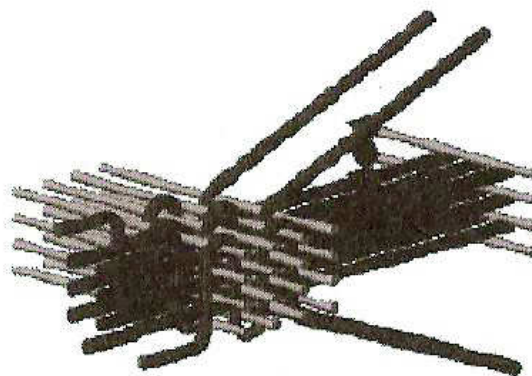


Figura 15. Representação de fibras tecidas na forma tridimensional.
Fonte: MOURA *et al.* (2005).

- **Entraçados – Braids**

Os entraçados possuem resistência específica elevada, sendo utilizados como reforço na produção de raquetes de tênis, pás de hélices de avião, etc. Devido o seu processo de fabricação, tornando o processo mais oneroso, conforme Figura 16 (MOURA *et al.*, 2005).

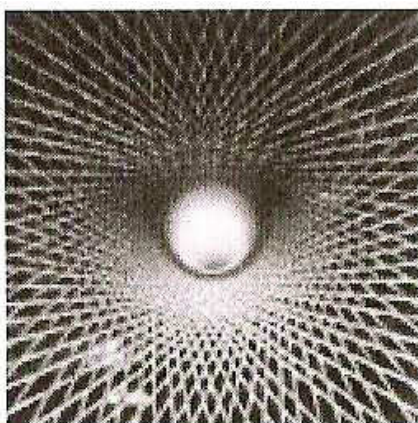


Figura 16. Fibras na forma de entrançados.
Fonte: MOURA *et al.* (2005).

- **Pré-formas**

São confeccionadas em formas de 2 D ou 3 D, constituídas por fibras curtas ou contínuas, sendo esta última resultante da união de camadas bidimensionais de tecidos com orientações diferentes (Figura 17.(a)), enquanto que as fibras curtas, são resultante do corte e sobreposição manual de mantas ou da projeção das fibras e de um ligante sobre uma armação perfurada, conforme Figura 17.(b), (MOURA *et al.*, 2005).



(a)



(b)

Figura 17. Fibras arranjadas em pré-formas, com (a) fibras longas e (b) fibras curtas.

2.2 Aplicações

As fibras naturais apresentam um grande potencial de aplicação na indústria automobilística, na área de revestimento interno de automóveis, ônibus e caminhões, e na construção civil.

Na construção civil, a utilização de fibras naturais cresce a cada ano, o uso de matérias-primas de fontes renováveis, objeto de diversos estudos e pesquisas, devido ao seu potencial na substituição de derivados petroquímicos.

Como já mencionado anteriormente, dentre as aplicações de fibras vegetais na engenharia civil, destaca-se o uso em compósitos cimentícios com a finalidade de adicionar estruturalmente à matriz a capacidade de suportar cargas de tração, uma vez que esta não possui capacidade de deformação e sim, considerável resistência à compressão, no estado endurecido, tendo assim a função principal de reforço mecânico da própria matriz.

Essa busca visa melhorar as propriedades específicas da matriz cimentícia, que possibilita ao compósito absorver mais energia propagada na forma de deformação caracterizada no estado pós-fissuração com o lento arrancamento e / ou ruptura das fibras vegetais manifestados mediante discretas fissuras no concreto, quando submetido à esforços de resistência à tração e a flexão. O aperfeiçoamento das propriedades resultantes do compósito, com a formação de um conjunto menos frágil à esforços de tração, flexão e a impactos, são os resultados obtidos neste processo.

Entre as diversas fibras existentes no Brasil, pode-se citar o *curauá*, o côco, o rami, o bagaço de cana-de-açúcar, a juta e casca do abacaxi como reforço em materiais poliméricos e em especial o sisal, devido as suas propriedades e seu baixo custo.

O Nordeste desponta como o maior produtor de sisal, em função das condições climáticas que são propícias para o desenvolvimento desta cultura. Desenvolvendo economicamente a região, que no momento não possui outra alternativa. A cultura sisaleira, tem gerado emprego e abrindo-se para o mercado externo e conseqüentemente diminuindo o êxodo rural. A utilização de tecnologias disponíveis em outros países é indispensável para a região produtora brasileira, por ser um produto biodegradável e de usos alternativos, quer por suas reais chances de expansão de vendas em algumas áreas, tais como: carpetes, tecidos, revestimentos de paredes e geotêxteis, polpa para papel e fios de qualidade.

Além deste ponto de vista de investimentos, hoje o sisal na construção civil, é utilizado como material de reforço em compósitos pelo seu baixo custo e fácil acesso. A fibra de sisal tornou-se a preferida entre outras fibras naturais, diante dos bons resultados obtidos em sua aplicação, abrindo este mercado para novas pesquisas com o uso racional de fibras vegetais para a geração de compósitos com propriedades diferentes ou especiais.

Os compósitos cimentícios por serem largamente empregados na indústria da construção civil, utilizados como pastas, argamassas ou concreto, necessitam de tecnologias e materiais que possam aperfeiçoar seu uso, minimizando a fragilidade destes quando submetidos à esforços de tração e cargas dinâmicas. Entre estes materiais, destaca-se a fibra de aço que lidera este mercado por corresponder de forma bastante eficiente.

Compósitos como vidros, fibras vegetais (sisal, côco, juta, bambu e fibras de celulose), têm sido amplamente usados como reforço de matrizes à base de cimento (produção de elementos de cobertura e revestimentos, painéis, divisórias e componentes habitacionais), principalmente nos países em desenvolvimento. São fibras de baixo custo, que existem em abundância, necessitando de baixo consumo de energia para a sua produção, potencializando assim, seus usos na indústria da construção civil.

Desta forma, pesquisas têm sido desenvolvidas com argamassas reforçadas com fibras naturais a fim de lançar no mercado o uso de materiais não convencionais com a aplicação das técnicas tradicionais de construção, tornando-se, portanto, uma das opções frente às pesquisas atuais, devido à grande disponibilidade de fibras naturais como as de c ôco, sisal, cipós, além das fibras de celulose, que se encontram no mercado a preço relativamente baixo.

3 COMPOSIÇÃO DE UMA FIBRA VEGETAL

3.1 Composição química

As fibras vegetais são constituídas basicamente de teores de celulose, hemicelulose (polioses), lignina, pectina, e substâncias solúveis em água. Dentro deste estudo analítico das fibras, pode-se observar que esta é constituída por várias fibras elementares que estão ligadas entre si, basicamente por lignina. Essas fibras elementares são compostas por paredes cheias de microfibrilas que estão unidas à hemicelulose pela lignina. Vale ressaltar, que as fibras diferenciam-se entre si, influenciadas muitas vezes, pela sua origem, forma natural, localização geográfica, que normalmente são caracterizadas pelas suas propriedades mecânicas (SILVA, 2003).

Silva (2003), afirma ainda, que as hemiceluloses são solúveis em álcalis e são formadas por diferentes unidades de açúcares (pentoses, hexoses, 6 – desoxi – hexoses e ácidos urônicos).

A combinação de celulose e hemicelulose, chamada de holocelulose, compreendendo um intervalo de 65 – 75% do peso seco da planta, é composta de polímeros de celulose e de hemicelulose com quantidades reduzidas de outros polímeros de açúcares, como, amidos e pectinas (HAN e ROWELL, 1997).

Segundo os mesmos autores, a celulose é o componente químico orgânico mais abundante na face da terra, sendo um polímero glucan de unidades de D-glicopiranoose, as quais estão ligadas por ligações β - (1 – 4) – glicosídeo.

Estudos anteriores demonstram mediante às análises, que as plantas contêm um componente majoritário de carbono com 44,4%; hidrogênio de 6,2% e oxigênio de 49,3%, equivalendo, portanto a fórmula $C_6H_{10}O_5$.

Segundo KLOCK *et al.*, (2005), a celulose é um polissacarídeo que se apresenta como um polímero de cadeia linear (molécula constituída por um grande número de unidades

repetidas relativamente simples conectadas por ligações químicas), com comprimento suficiente para ser insolúvel em solventes orgânicos, água, ácidos e álcalis diluídos, à temperatura ambiente. Consiste de unidades de anidro D – glicose ($C_6H_{10}O_5$).

Em 1930, estudos realizados evidenciaram que a celulose é um polímero composto por grande número de unidades repetidas e que estas derivavam da condensação da D -glucose, açúcar simples, monossacarídeo hexose.

Sendo de natureza hidrófila, acabam influenciando nas propriedades mecânicas, físicas tanto da matriz como do compósito, constituindo assim, uma média de 40 a 50% de quase todas as plantas.

Esse composto orgânico é o principal constituinte estrutural, que tem por finalidade manter a fibra estável e resistente. Nas fibras, diferentemente das plantas suas unidades são constituídas de anidro – D – glicose ($C_6H_{10}O_5$), onde cada unidade contém três grupos de hidroxila, que formam ligações de hidrogênio, dentro da molécula (intramolecular) e entre as moléculas de celulose ligações de hidrogênio intermoleculares. Sendo, portanto, um polímero linear de cadeia uniforme, que através da estrutura fibrosa dá a celulose alta resistência à tração e é insolúvel na maioria dos solventes. A celulose mantém estruturas de interligações com substâncias de hemicelulose e lignina, conforme Figura 18, (SILVA, 2003).

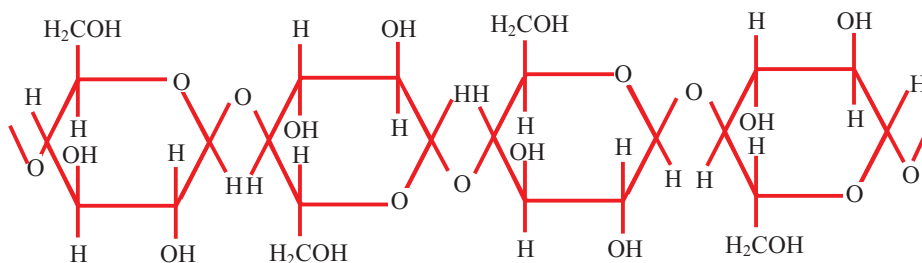


Figura 18. Representação da cadeia de celulose.

O grau de polimerização é determinado pelo número de unidades de glicose em uma molécula de celulose, sua média para celulose em uma planta varia pouco abaixo de 50% , são orientadas aleatoriamente e tem tendência de formar regiões intra -cristalinas.

As celulosas derivadas de plantas, em sua grande maioria são altamente cristalinas, contém áreas com regiões cristalinas em sua composição morfológica de até 80%, sendo , portanto o restante, celulose amorfa.

A hemicelulose nas plantas consiste de mais de um tipo de unidade de açúcar (galactoglicomanana, arabino-glicoronoxilana, arabino-galactan-glicoronoxilana, glicomanana, etc.), possuindo grupos substitutos de metil e acetil. Sua presença é marcada por cadeias de polissacarídeos de baixo grau de polimerização, açúcares, tais como, D-xilopiranosose, D-glicopiranosose, D-galactopiranosose, L-arabinofuranose, D-manopiranosose e ácido D-glico-piranosiloronico com menores quantidades de outros açúcares , que possuem uma cadeia com uma unidade de açúcar repetidora ligada β -4 com pontos ramificados (1-2, 1-3 e / ou 1-6), (HAN e ROWELL, 1997).

Nas fibras vegetais, as hemicelulosas são compostas de unidades diferentes de açúcares, que são solúveis em álcalis e seu grau de polimerização chega a uma faixa de 10 a 100 vezes menor que a celulose .

Segundo Lewin e Goldenstein (1991), as hemicelulosas são polissacarídeos formados pela polimerização de vários açúcares, tais como, glicose, xilose, galactose, arabinose e manose. São normalmente encontradas nas paredes celulares primárias e secundárias, constituindo cerca de 20 a 30% da estrutura da fibra, atuando como agente de ligação entre a lignina e celulose. Fragmentos de hemicelulose depois de extraídas com álcali, podem se tornar total ou parcialmente solúveis em água.

As pentosanas são os polímeros constituídos por açúcares de pentose, principalmente D-xilose e L-arabinose.

A identificação desta fração em uma amostra de planta foi importante para indicar seu potencial de utilização para tipos químicos de furano (HAN e ROWELL, 1997).

A ocorrência das macromoléculas de lignina não é incidente em todas as plantas, mas, somente em plantas vasculares, em funções tais como: transportar soluções aquosas, proteger e dar suporte mecânico para a planta, conferindo-lhe rigidez, em função de sua incorporação na parede celular, como último componente, por interpenetração desta forma, as fibrilas.

Diferentemente da celulose, a lignina por ser um polímero aromático possui um sistema heterogêneo e ramificado, sem unidade repetidora, portanto, é um sistema amorfo, quimicamente ligado as polioses (hemiceluloses). As ligninas possuem em sua composição estruturas diferenciadas entre si, conduzindo as plantas a desenvolverem estruturas não idênticas.

Esta substância macromolecular tem como principais funções na planta: aumentar a rigidez da parede celular; unir as células; reduzir a permeabilidade da parede celular à água; proteger a fibra contra microorganismos e serve como mecanismo de descarga dos lixos metabólicos da fibra (KLOCK, *et al.*, 2005).

Os extrativos são componentes acidentais, facilmente solúveis em solventes orgânicos neutros ou água, responsáveis pelas descolorações, mudanças de cores, resistência e durabilidade natural da fibra vegetal. Dividem-se em: 1) Materiais voláteis com vapor d'água; 2) Solúveis em solventes orgânicos; 3) Solúveis em água.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Coleta da fibra vegetal de *arumã*

O recolhimento da amostra da fibra vegetal de *arumã* foi feito em conformidade com o manejo executado pelos artesãos das populações tradicionais e pesquisadores da Fundação Vitória Amazônica - FVA (sd), compreendendo um corte na diagonal da haste da fibra vegetal, numa angulação de mais ou menos 30°, de cima para baixo, a 0,30 m acima da raiz. A limpeza da amostra retirada é feita primeiramente com água, seguida da pulverização com álcool 95° GL, Figura 19.



Figura 19. Coleta e pulverização da fibra de *arumã*.

O processo em série ocorre após a secagem da amostra ser seca com o armazenamento da mesma em prensas de madeira, a fim de que as amostras sejam bem distribuídas nas prensas. Para ensaios químicos, físicos e mecânicos, houve a necessidade do armazenamento adequado das fibras de *arumã*, sendo estas secas em temperatura ambiente, posicionada em um ângulo aproximadamente de 45°, sem manter contato com áreas frias ou molhadas, conforme Figura 20. O período médio para a efetiva extração da umidade foi cerca de três semanas.



Figura 20. Armazenamento e secagem da fibra de *arumã*.

4.2 Caracterização dos componentes do compósito cimentício

4.2.1 Cimento

Para a confecção do compósito laminado foi utilizado o Cimento Portland CP II F-32, cuja caracterização das propriedades químicas está apresentada na tabela 1. O cimento utilizado está disponível comercialmente no mercado brasileiro, sendo constituído por 90% a 94% de clínquer e gipsita e de 6 a 10% de material carbonático.

Tabela 1 - Propriedades químicas do cimento CP II F-32

Substância química	Prop. químicas (%)
CaO	62,80
SiO ₂	19,98
Al ₂ O ₃	3,70
Fe ₂ O ₃	3,12
MgO	3,10
K ₂ O	0,80
Na ₂ O	0,07
TiO ₂	-

Fonte: (GONÇALVES, 2005)

O cimento CP F – 32 foi selecionado para fazer parte deste estudo, em função do seu grande uso na produção de argamassas de revestimento, pisos, pré-moldados, estrutura de concreto armado e obras de maior vulto. Este amplo emprego deve-se, às propriedades físicas e mecânicas que o cimento apresenta e de sua composição como produto, que se constitui de filler, apresentando uma resistência à compressão da ordem de 32,0 a 49,0 MPa.

Na tabela 2, são apresentadas as propriedades físicas e mecânicas, do cimento CP II F-32.

Tabela 2 – Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP II F-32

Densidade (g/cm ³)	Resíduo Insolúvel (%)	Perda ao Fogo	Expansividade (mm) à frio	Expansividade (mm) à quente	T. Pega Início(h)	T. Pega Fim(h)
3,10	1,5	4,93	≤ 5	≤ 5	≥ 1	≤ 10,0

Fonte: (Gonçalves, 2005)

4.2.2 Caracterização da argila calcinada - metacaulinita

Na confecção das placas de materiais cimentícios com fibras, a dosagem utilizada para a argamassa foi 1: 1: 0,4 (material cimentante, areia e fator água / material cimentante).

A adição de metacaulinita teve como propósito, melhorar as características da matriz, com teores de substituição parcial do cimento de 50% de resíduos (sua composição, portanto, chega a ser metade da massa do material cimentante), tendo assim, a finalidade de acelerar as reações de hidratação, pela sua ação pozolânica, reduzindo deste modo da matriz, o hidróxido de cálcio, e efetivamente diminuindo o ataque alcalino à lignina das fibras. As argilas calcinadas foram caracterizadas quimicamente e fisicamente (Tabela 3), (GONÇALVES 2005).

Tabela 3 – Propriedades químicas e físicas para a metacaulinita .

PROPRIEDADES QUÍMICAS	
Substância química	Proporções Químicas (%)
CaO	2,62
SiO ₂	51,2
Al ₂ O ₃	35,30
Fe ₂ O ₃	4,00
MgO	0,40
K ₂ O	0,97
P ₂ O ₅	0,20
TiO ₂	0,41
MnO	0,16
SO ₃	0,09
PROPRIEDADES FÍSICAS	
Área Superficial (m²/kg)	22,60
Densidade (g/cm³)	2,65

Fonte: (GONÇALVES, 2005)

4.2.3 Areia

Foi empregada na fabricação da placa cimentícia uma areia quartzosa de rio com massa específica de 2,67g/cm³. Para tanto, utilizou-se durante as moldagens duas classes de areia, sendo feito dois cortes em sua granulometria:

- Uso de partículas menores que 2,36 mm e
- Uso de partículas menores que 1,18 mm. Com os cortes, os módulos de finura (MF) das areias utilizadas foram de 2,46 e 2,43, respectivamente.

4.2.4 Superplastificante

Para melhor trabalhabilidade da pasta a ser aplicada na produção do compósito foi utilizado o superplastificante FOSROC REAX CONPLAST SP 430, que tem sua composição baseada em Naftaleno Sulfonado com teor de sólidos de 44%. Estudos de compatibilidade e ponto de saturação do superplastificante com o cimento CP II F32 indicaram que os mesmos são compatíveis, (GONÇALVES, 2005).

4.2.5 Água

A água utilizada em toda a fase experimental foi proveniente da rede de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro, apresentando as características mostrada no Quadro 1.

Quadro 1. Características da água utilizada na confecção dos compósitos.

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

Fonte: SEDAE/RJ (2008).

4.2.6 Caracterização da fibra vegetal de *arumã*

Para caracterização da fibra vegetal de *arumã* foram efetuados ensaios físico-mecânicos e químicos, os quais são descritos a seguir.

Ensaio físico-mecânico

- **Massa específica (densidade)**

A massa específica é uma das propriedades físicas mais importantes da fibra, em função de manter uma relação direta com as propriedades de resistência mecânica, grau de alteração dimensional e perda ou absorção de água.

A massa específica reflete a quantidade de matéria fibrosa por unidade de volume, ou do volume de espaços vazios existentes em uma fibra.

Para determinação da massa específica foram empregados os métodos por deslocamento e de pesagem, os quais são descritos a seguir.

(i) Método por deslocamento

Saturação da peça em água – A fibra vegetal de *arumã* ficou por cinco dias imersa em água potável, Figura 21, a fim de que atingisse seu grau máximo de saturação (LOBÃO e PEREIRA, 2005).



Figura 21. Saturação em água da fibra de *arumã*.

Imersão da peça em água – Após a saturação da fibra, esta foi imersa em um recipiente contendo água destilada e com escala graduada indicativa do volume,

determinando-se o volume da peça diretamente pelo deslocamento de água, através da leitura do volume na escala, Figura 22.



Figura 22. Determinação do volume de água deslocada pela fibra de *arumã*.

(ii) Método de pesagem

Baseou-se no mesmo princípio da imersão, porém como a água possui massa específica igual a 1g/cm^3 , o volume deslocado pela imersão da peça da fibra é igual ao seu peso, onde este foi lido em uma balança digital com precisão de cinco dígitos numéricos (g). A secagem da fibra foi realizada no período de 12 horas em estufa a temperatura de $106^\circ \pm 5^\circ \text{C}$, seguida de pesagem da amostra em estudo, procedimento este repetido, até que a pesagem alcance valor constante.

O estudo da densidade foi realizado a partir de amostras tomadas das três partes do caule dos *arumãs* (superior, média e inferior). Para a obtenção da massa específica foi utilizado o valor médio, tanto do peso seco das amostras como do seu volume saturado.

A massa específica foi obtida pelo quociente da massa considerada (m) pelo volume correspondente (v). Logo temos:

$$p = m / v \quad (1)$$

Onde:

p = massa específica;

m = massa;

v = volume.

No sistema internacional, a massa é medida em kg e o volume, em m^3 . Outras unidades que podem ser adotadas são: g/cm^3 e g/l^3 .

Ressalta-se que para cada espécie de *arumã* foram realizados 3 ensaios, para a efetiva análise.

- **Análise termogravimétrica**

O ensaio da análise termogravimétrica foi realizado no equipamento TA STD Q600 V20.5. Inicialmente colocou-se por vez, uma amostra de 10mg de cada fibra vegetal de *arumã* (branco, *canela*, *tupé* e vermelho) nas hastes do equipamento. As amostras foram previamente moídas e emaceradas. Em seguida, introduziu-se no equipamento a amostra, fazendo-se as leituras e assinalando-se as devidas alterações e degradações da amostra, por meio de um programa instalado ao sistema de gerenciamento computacional do equipamento, figura 23.

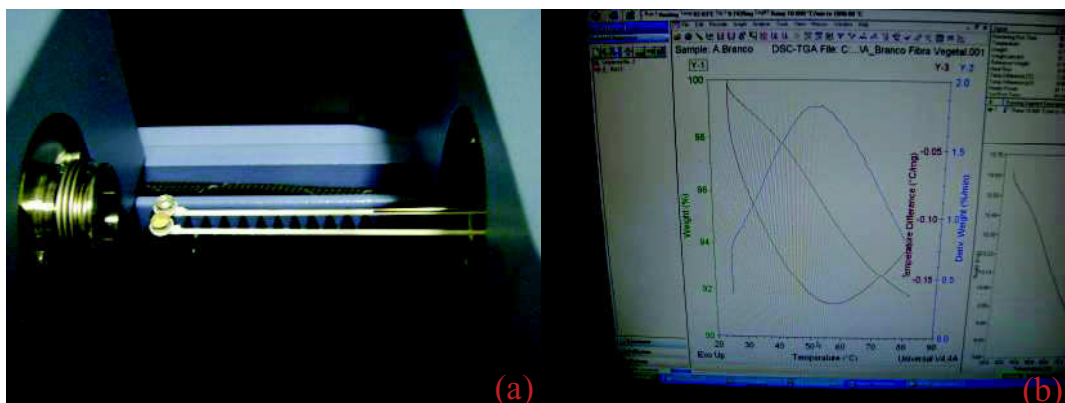


Figura 23. (a) Depósito da amostra de *arumã* nas hastes do equipamento; (b) Leitura das alterações da massa da amostra, no sistema de gerenciamento computacional do equipamento.

A análise termogravimétrica é o ensaio pelo qual, pode-se conferir a perda de massa de uma determinada amostra, em função do aumento de temperatura. Cada componente da fibra vegetal de *arumã*, assim como os componentes das fibras vegetais em geral, se encontram em diferentes intervalos de temperatura, onde podem ocorrer transformações como a fusão e cristalização. Entre outras alterações, comumente ocorre a incidência da degradação dos diferentes tipos de componentes da fibra vegetal, bem como, o fenômeno da sublimação, oxidação, redução e outros (NEIRA, 2005).

Em geral, nas fibras vegetais, há intervalos nos quais ocorrem os eventos químicos, são eles: até 105°C ocorre a perda da umidade da fibra; no intervalo de 240°C a 340°C ocorre a degradação da celulose e de 340°C até 600°C a degradação da lignina (NEIRA, 2005).

A caracterização da decomposição e estabilidade térmica de materiais fez-se mediante o traçado das perdas de massa das amostras no eixo das ordenadas pelo aumento da temperatura nos eixos das abscissas. A decomposição de um componente químico, se manifesta pelo pico da curva derivada a primeira, identificada pela mudança de inclinação da curva de perda de massa. A determinação do teor de um componente químico, é obtido através do cálculo estequiométrico medido por meio da temperatura identificada no momento das perdas de massa dos componentes químicos pelo dado de perda da massa do componente químico.

- **Módulo de elasticidade e tensão última à tração**

O módulo de elasticidade e a tensão última à tração foram determinados a partir dos ensaios de tração em amostras de fibras de *arumã*, com o comprimento de 15 cm e seção transversal variável. Sendo a largura e a espessura, as quais definem a seção transversal, medidas em cinco pontos diferentes, adotando-se para o cálculo das tensões a média desses

valores. Para tanto, foram realizados ensaios de tração em 15 (quinze) amostras de cada espécie, exceção do *arumã tupé*, para as quais foram realizadas ensaios em apenas 6 (seis) amostras, em virtude da pouca disponibilidade desse material.

Para os ensaios de tração foram empregados o equipamento SHIMADZU AUTOGRAPH AG-X 100 kN do Laboratório de Estruturas da COPPE-RJ, conforme Figura 24.



Figura 24. Ensaio para determinação do módulo de elasticidade da fibra de *arumã*.

Houve a necessidade de adaptação de chapas em alumínio como suporte nas extremidades das fibras, de modo a evitar o esmagamento destas, pelo dispositivo de fixação da máquina de ensaio, conforme indicado na Figura 25.

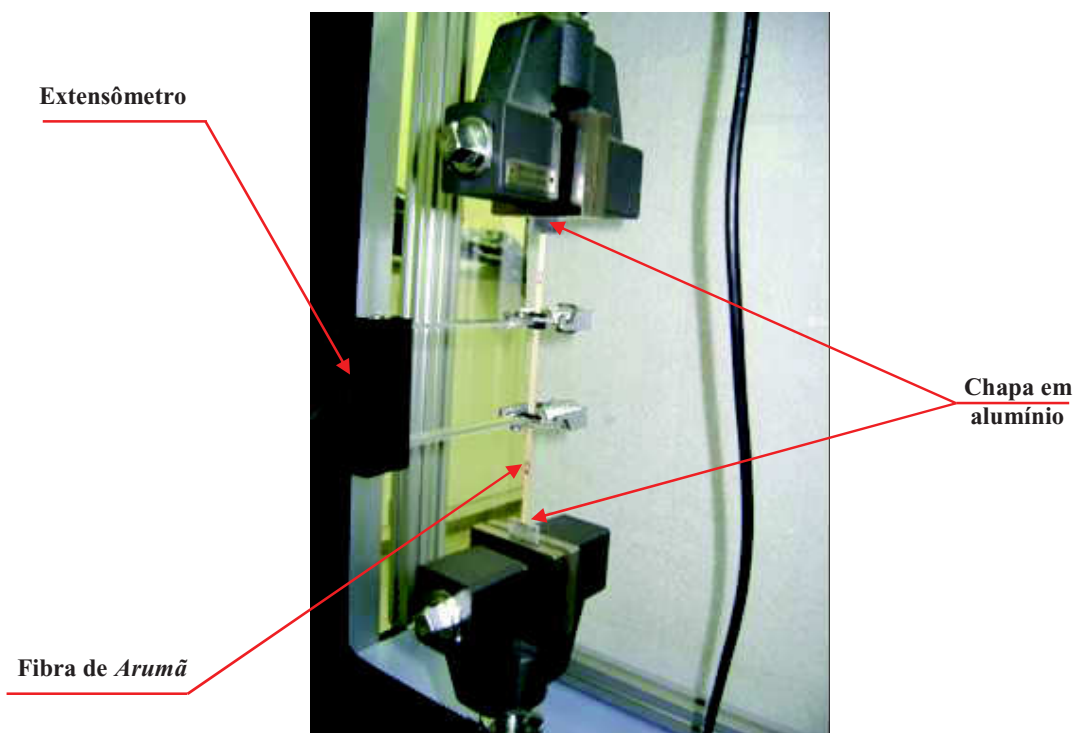


Figura 25. Sistema anti-esmagamento, adaptado à máquina SHIMADZU.

Os módulos de elasticidade, para cada amostra, foram obtidos através do gráfico tensão x deformação, traçado a partir dos resultados obtidos dos ensaios de tração executados para cada fibra. A Figura 26 mostra um exemplo de um gráfico a partir dos valores coletados pelo sistema de aquisição de dados ligados a máquina universal de ensaios.

A tensão máxima última foi determinada através do maior valor de tensão encontrado no gráfico da Figura 26, enquanto que o módulo de elasticidade foi calculado através da inclinação da reta apresentada neste gráfico, uma vez que, para materiais no regime elástico, a tensão é proporcional a deformação, sendo a constante de proporcionalidade o módulo de elasticidade.

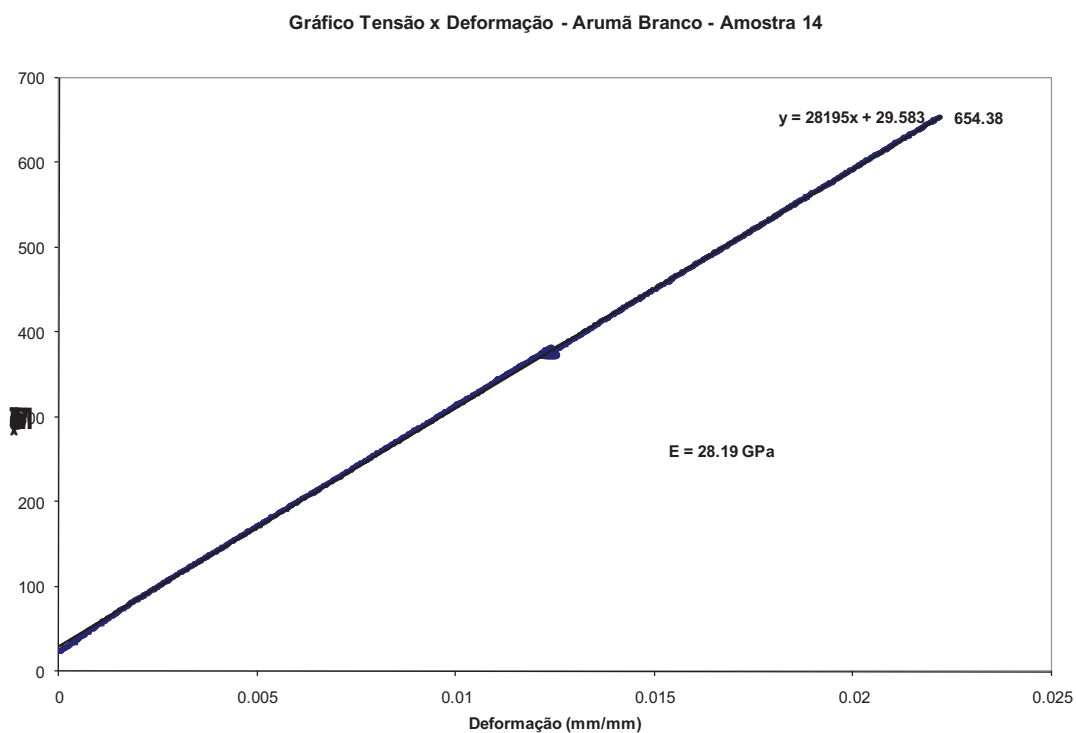


Figura 26. Exemplo de gráfico Tensão x Deformação obtido no ensaio de tração da fibra de *arumã*.

Após o ensaio realizado, conforme a Figura 27 foi possível observar o comportamento das fibras com relação aos esforços a que foi submetido.



Figura 27 – Comportamento das fibras de *arumã*, após ensaio de tração.

A tensão última à tração é o valor de tensão obtido na ruptura da fibra no ensaio à tração, quando esta deixa de oferecer resistência à aplicação do carregamento imposto pela máquina. Desta forma, para os ensaios realizados para as amostras de fibra de *arumã* este valor corresponde ao maior valor da força obtido no ensaio dividido pela área da seção transversal da fibra.

Ensaio químicos

Os componentes químicos da fibra vegetal são os agentes determinantes da sua atuação como elemento de adição em um compósito. Neste estudo, a caracterização química foi realizada no Laboratório da Química da Madeira, do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia – INPA. A efetivação da caracterização química deu-se pelos ensaios de lignina, celulose, extrativo etanol-tolueno, extrativo etanol, solubilidade em água e de umidade .

Os extrativos etanol-tolueno foram determinados pela ASTM D 1107-56, sendo que na primeira etapa (extração etanol-tolueno), pesou-se 4 g de fibra moída, em seguida fez-se a extração de etanol-tolueno 4:1, por 8 horas ou até a amostra da fibra de *arumã* ficar totalmente livre de extrativos.

Na segunda etapa (extração com etanol), conforme a ASTM D 1105, procedeu-se a extração empregando etanol, com o objetivo de extrair as substâncias mais pesadas (moléculas grandes), por um período de 8 horas no mínimo. A terceira etapa (extração em água) foi feita secando ao ar livre as amostras durante seis horas, e em seguida pesando-se 3g da amostra em Erlenmeyer, acrescentou-se 500 ml de água destilada, sendo e em seguida, levado ao banho-maria por quatro horas, conforme Figura 28.



Figura 28 – Água destilada – 500ml

Na sequência filtrou-se a amostra levando-a em seguida a estufa a temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, até atingir peso constante. Pesando-se o papel de filtro sem a amostra e subtraindo-se este valor do peso do papel de filtro com a amostra, obtém-se o peso da amostra livre de extrativos, conforme Figura 28. Procedeu-se da seguinte forma, para obter o teor de extrativo etanol-tolueno:

$$\text{TE (\%)} = (P_F - P_i) / P_s \times 100 \quad (2)$$

Onde:

TE = extrativos etanol-tolueno;

P_F = peso do balão com extrativos;

P_i = peso do balão seco inicial;

P_s = peso da amostra seca em umidade.

De acordo com a ASTM D 1106-56, a determinação de lignina, é feita pela pesagem de 1 g da amostra livre de extrativos, devendo em seguida, ser feito um tratamento com ácido

sulfúrico a 72%, e deixando-a em repouso por duas horas. Passadas essas duas horas, levou-se a amostra para banho-maria por quatro horas, depois de filtrado a amostra, esta foi levada para estufa a temperatura de $100^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ (quatro horas). Seu valor é determinado pela diferença do peso do filtro seco e o filtro com a amostra. Para calcular o teor de lignina, utilizamos a seguinte expressão:

$$\text{Lig (\%)} = (P_2 / P_1) \times 100 \quad (3)$$

Onde: Lig = Lignina;

P_1 = peso seco inicial da amostra;

P_2 = peso seco de lignina obtida.

A determinação da celulose foi feita de acordo com HALYARDI & SANCHEZ (1975), para tanto, pesa-se 1g da amostra livre de extrativos, e em seguida faz-se o tratamento com ácido nítrico e álcool na proporção 8:2, levando então a amostra ao banho-maria, por uma hora (momento que entra em ebulição), e em seqüência extraindo a celulose por meio de uma solução de ácido nítrico e álcool contida na amostra. Depois da seqüência repetida, filtrou-se a amostra e lavou-se esta com água e álcool na proporção 1:1 (100 ml), o processo continua com a lavagem da amostra em abundância com água destilada. Em seguida, levou-se a uma estufa a temperatura de $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, e determinou-se seu valor pela diferença do peso do cadinho filtrante seco e o cadinho com a amostra, conforme Figura 29.



Figura 29 – Lavagem das amostras com álcool, e em seguida levadas para estufa $103^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Para calcular o teor de celulose bruta, utilizou-se a seguinte expressão:

$$CB (\%) = (P_2 / P_1) \times 100 \quad (4)$$

Onde:

CB = celulose bruta;

P₁ = peso seco inicial da amostra;

P₂ = peso seco de celulose obtida

O teor de umidade foi determinado pela norma ASTM D 1110-84, pesou-se 1 g de fibra moída, levando-se a amostra para estufa por duas horas a temperatura de 103 °C ± 2 °C. Em seguida, levou-se ao dessecador para o esfriamento da amostra e repetiu-se o procedimento até atingir o peso constante. Com a diferença entre o peso do papel de filtro sem a amostra e o peso do papel de filtro com a amostra foi obtida a umidade da amostra. Para determinar a umidade do extrativo etanol utilizou-se a seguinte expressão:

$$U (\%) = 100 \times (P_v - P_s) / P_s \quad (5)$$

Onde:

U = teor de umidade;

P_v = peso verde;

P_s = peso seco.

Deve-se salientar que para os ensaios de lignina e celulose, há a necessidade da fibra vegetal de *arumã* estar livre de extrativos. Além disso, todos os ensaios foram feitos em duplicatas para cada espécie de *arumã* (branco, *canela*, *tupé* e vermelho).

4.3 Produção de laminados

No laboratório de estruturas da COPPE/UFRJ, foram realizados ensaios de placas cimentícias com a inserção de telas de fibras de *arumã* em camadas como reforço bidirecional (tecidos). Para tanto, foram moldadas placas de materiais compósitos com telas de *arumã* de 25 x 40 cm e telas 42,2 x 43,2 cm trançadas no padrão Plane Wave, dispondo-as em camadas no compósito. As dimensões aproximadas de cada fibra que compõe cada tela foi de (0,04 x 0,015 x L) cm, que são respectivamente, largura, espessura e comprimento, sendo este último variável conforme a placa a ser moldada. O espaçamento entre as fibras na tela é de aproximadamente 0,13 x 0,1 cm.

Para a produção da placa compósita, empregou-se uma argamassa com o traço 1 : 1 : 0,4 (material cimentante; areia; água), sendo este traço recomendado por (MELO FILHO, 2005).

Vale observar as seguintes situações que foram preliminarmente determinadas:

- Material cimentante □ 50% de cimento Portland CP II F 32 e 50% metacaulinita;
- Superplastificante FOSROC REAX CONPLAST SP 430: 1,5% em relação ao peso do cimento, Figura 30;



Figura 30. Superplastificante utilizado na produção do compósito.

- Areia com a granulometria não superior a 1,18 mm;
- Tecido de fibra vegetal de *arumã*, com dimensão (25 x 40) cm, conforme Figura 31.

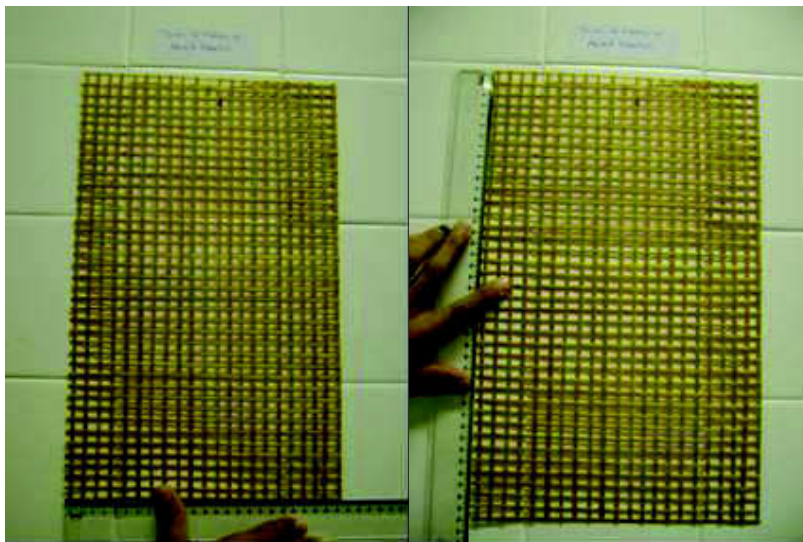


Figura 31. Tela de fibra de *arumã* de 25 x 40 cm utilizada no compósito.

O processo de fabricação dos laminados pode ser resumido nos seguintes passos:

(i) Produção da matriz

Os constituintes secos da argamassa foram misturados em um misturador de bancada, com capacidade de 20 dm³, na seguinte ordem: cimento, metacaulinita e areia. O material seco foi misturado durante 2 minutos, até que se verificasse a homogeneização completa da mistura. O superplastificante foi diluído na água de amassamento e adicionado lentamente à mistura, até que se obtenha a consistência desejada, conforme Figura 32.



Figura 32. Diluição do superplastificante em água, sendo em seguida adicionado a mistura.

A fôrma utilizada na moldagem das placas de 400 x 250 x 12 mm foi confeccionada em aço, possuindo contenção lateral, de modo a impedir a saída de material da amostra durante a vibração. Após a moldagem, foi colocada uma chapa de aço com espessura de 17 mm, que encaixava na fôrma, de modo que a pressão a ser aplicada na amostra fosse distribuída uniformemente sobre a superfície de contato. Depois, a fôrma foi colocada sobre uma chapa fina de aço que servia para o transporte do corpo-de-prova, sendo que esta foi forrada com um geotêxtil e um filtro de papel, de acordo com a Figura 33. O geotêxtil absorvia e permitia a passagem da água expulsa do corpo -de-prova durante a prensagem e o filtro impedia que os constituintes finos da argamassa se perdessem com a saída da água.



Figura 33. Fôrma de aço sendo forrada com filtro de papel.

(ii) Produção do laminado A – (250 x 400 x 12) mm

Na produção do laminado **A**, a partir da matriz produzida no item 4.3.(i), foram introduzidas e distribuídas camadas alternadas da matriz e do elemento de reforço analisados neste estudo.

Os compósitos utilizados nesse trabalho foram reforçados com fibras de *arumã*, alinhadas, contínuas e bidirecionais, as quais eram colocadas manualmente, em camadas

alternadas, no molde. As figuras de 34 a 38 mostram o esquema do arranjo das camadas do compósito mais a adição das telas de *arumã*.

Após a produção da argamassa, iniciou-se a moldagem do laminado, colocando-se a primeira camada de matriz no molde, de acordo com a Figura 34.



Figura 34. Primeira camada de argamassa.

Para se garantir a espessura dessa camada, foi calculado o seu volume e, com o peso específico da mistura fresca, calculou-se a massa de argamassa da primeira camada, procedimento que foi repetido para todas as outras camadas. Desta maneira, evitou-se que a camada ultrapassasse a espessura desejada. Após a colocação da primeira camada, foi usada uma espátula para regularização, sendo a mesma vibrada externamente logo em seguida. O procedimento seguinte foi colocar no molde a tela de fibra de *arumã*, conforme a Figura 35.



Figura 35. Segunda camada, arranjo da tela de *arumã* no molde.

Na figura 36, observa-se que após a colocação manual das fibras, uma nova camada de argamassa foi lançada, uniformemente regularizada com espátula.



Figura 36. Terceira camada, adição de argamassa.

A quarta camada é constituída por mais um adicionamento da tela de fibras de *arumã*, acondicionando-a uniformemente, conforme indica a Figura 37.

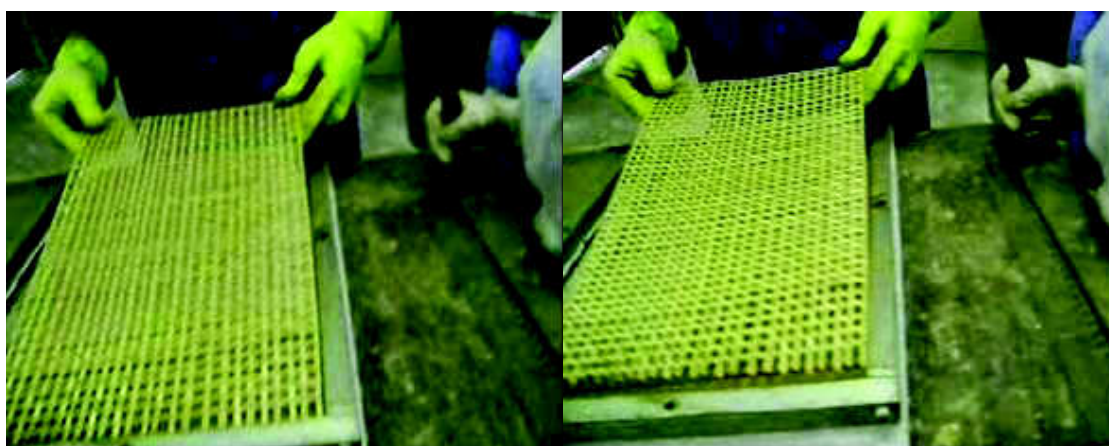


Figura 37. Quarta camada, segundo arranjo da tela de *arumã* no molde.

Os passos referentes à colocação das camadas de fibras e argamassa são repetidos, até chegar-se à última camada de argamassa, sua quinta camada, constituída pela última adição de argamassa, de acordo com a Figura 38.

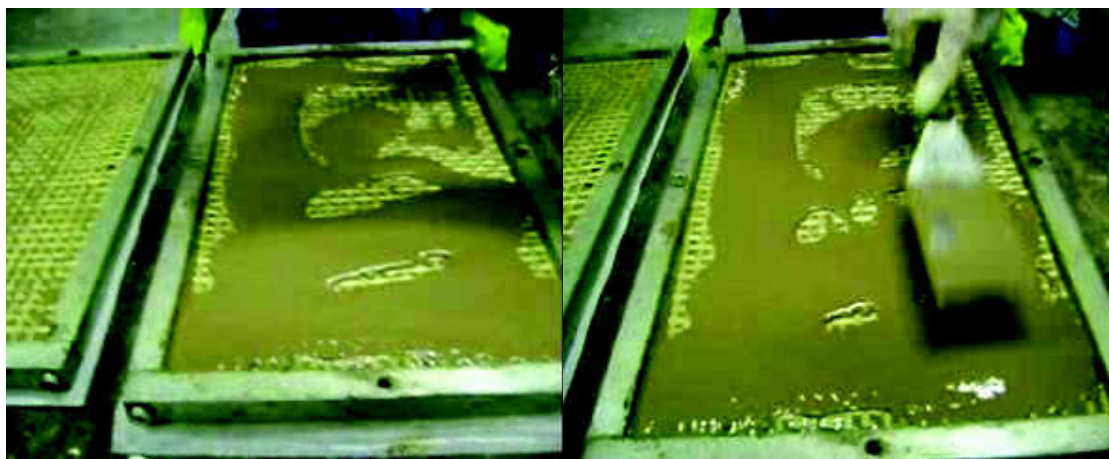


Figura 38. Quinta camada, colocação da última porção de argamassa.

Vale ressaltar, que foram colocadas três camadas de matriz cimentícia duas camadas de telas de *arumã*. Ao completar-se o volume total do molde, o mesmo foi depositado sobre a mesa vibratória, até surgir um filme de água na superfície das camadas, para evitar o maior número de vazios da mistura, de acordo com a Figura 39.



Figura 39. Compósito sendo vibrado.

A última etapa na produção dos laminados é a aplicação da pressão de moldagem.

A prensagem foi realizada em um pórtico da placa de reação do LABEST/PEC/COPPE utilizando um atuador servo-hidráulico, Figura 40, com capacidade de carga de 50 toneladas controladas pelo sistema MTS 406.



Figura 40. Atuador servo-hidráulico utilizado na prensagem do compósito.

Durante a aplicação da pressão, o deslocamento da amostra foi medido utilizando -se um relógio, conforme Figura 41. A carga foi aplicada a uma taxa de aproximadamente 1,8 ton/min. Ao atingir a taxa máxima (3 ton/min), a mesma foi mantida constante durante 5 minutos. O descarregamento foi realizado em cerca de 2 minutos.



Figura 41. Relógio medidor de pressão de moldagem.

Após a aplicação da prensagem no corpo-de-prova do laminado compósito, após a perda da umidade excessiva, obtém-se a amostra compactada, conforme Figura 42.



Figura 42. Laminados compósitos recebendo carregamento de pressão e compósito prensado.

O procedimento seguinte foi o armazenamento dos compósitos laminados sob cobertas totalmente umedecidas, para evitar a rápida evaporação da água existente no compósito que poderia comprometer sua estrutura com o aparecimento de fissuras (Figura 43).



Figura 43. Laminados compósitos armazenados após a prensagem.

Como último passo, fez-se o armazenamento do compósito laminado em câmara úmida (Figura 44), e após 28 dias o compósito foi submetido a ensaios mecânicos.



Figura 44. Câmera úmida para armazenamento dos laminados compósitos.

(iii) Produção de laminado B – (42,20 x 43,20 x 1,25) cm

Para produção do laminado **B**, os procedimentos utilizados foram os mesmos apresentados no item 4.3.(ii) com a pré mistura de todos os materiais secos homogeneamente, diferenciado somente pela parafina utilizada para untar a forma e as dimensões das telas que passaram a ser 42,20 x 43,20 m, tendo como procedimento em seqüência, o acondicionamento da primeira camada de argamassa, de acordo com a figura 45.

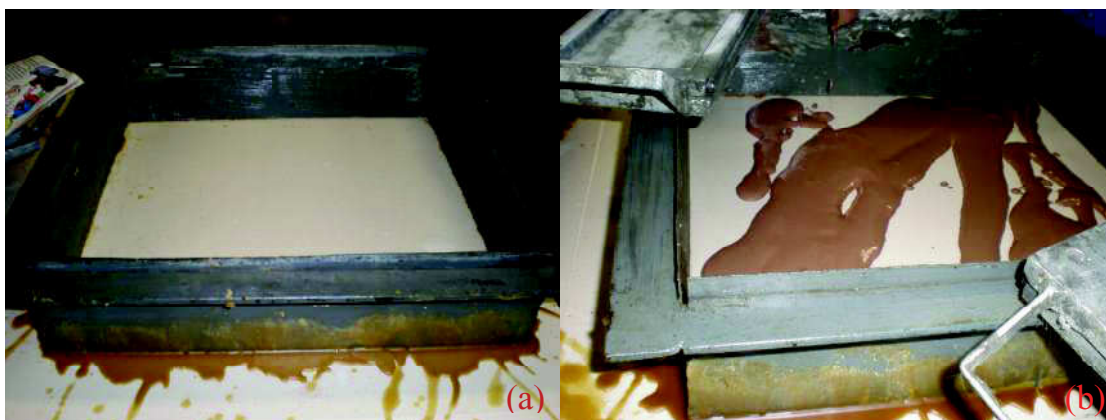


Figura 45. a) forma untada com parafina; b) primeira camada de argamassa.

Os passos referentes à acomodação das camadas de fibras e argamassa são repetidos, perfazendo, portanto, três camadas de argamassa para duas telas tecidas bidirecionalmente de *arumã*, conforme figura 46.



Figura 46. Acomodações na forma da tela de *arumã* e da camada de argamassa.

Após o arranjo em fôrma seguida da prensagem nos laminados, armazenou-se os compósitos laminados sob cobertas úmidas, para impedir a evaporação acelerada da água do compósito e conseqüentemente o surgimento de fissuras que pudessem comprometer sua estrutura, conforme Figura 47.



Figura 47. Laminados prensados e armazenados sob cobertas umedecidas.

4.4 Caracterização mecânica dos compósitos

Para caracterização mecânica dos compósitos produzidos com tela de *arumã* foram feitos ensaios de flexão, sendo empregado para isso o equipamento SHIMADZU AUTOGRAPH AG-X 100 kN do Laboratório de Estruturas da COPPE-RJ, o mesmo utilizado para os ensaios de tração nas fibras de *arumã*.

4.4.1 Ensaios de tração direta

Para este ensaio foi utilizado o sistema desenvolvido por LIMA (2004), sendo este sistema composto por um aparato metálico constituído por dois acessórios ligados entre si através de uma rótula esférica, de acordo com a Figura 48. O acessório da esquerda foi conectado na garra da máquina de ensaio enquanto o da direita foi conectado à outras placas por um pino, as quais eram coladas ao corpo-de-prova com uma camada fina de adesivo epóxi (Sikadur).

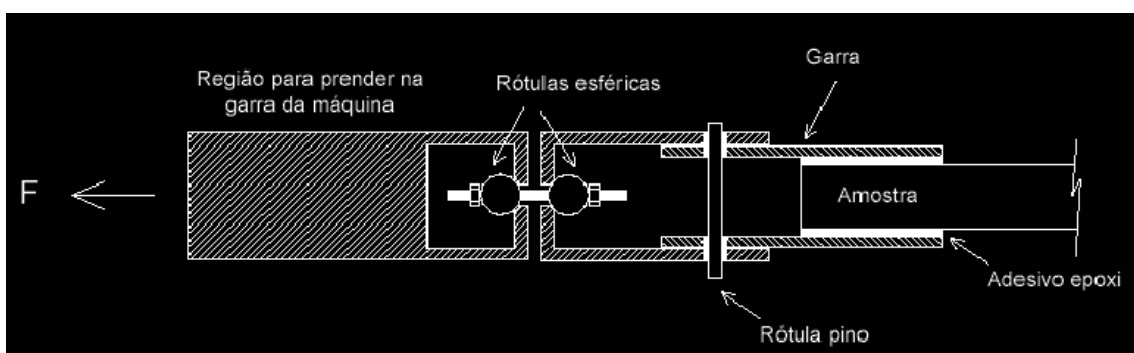


Figura 48. Sistema para o ensaio de tração, conforme LIMA (2004).

Deve-se observar que antes da fixação da placa de laminado à prensa, houve a necessidade de colar nas extremidades, em ambas as faces, de uma placa em alumínio revestida com um tecido de juta, conforme Figura 49, de modo que fosse minimizado o efeito de deslizamento do corpo-de-prova durante o ensaio.



Figura 49. Laminados com placas de alumínio coladas e revestidas com juta em suas extremidades.

Os corpos-de-prova utilizados nos ensaios de tração de dimensões 400 x 250 x 11,70 mm, seguiram as características definidas por MELO FILHO (2005), passando por um processo de corte em bancada de serra para adquirir a adequada dimensão para ensaio, passando, portanto, para dimensão 400 x 40 x 11,70 mm, conforme observado na Figura 50. Ressalta-se também, que os compósitos utilizados neste ensaio são reforçados com duas camadas de tela de *arumã* trançada no padrão Plane Weave, e foram pintadas previamente, para melhor visualização dos ensaios mecânicos nos surgimentos das fissuras. Este ensaio foi realizado para 4 amostras com fibras de *arumã* branco.

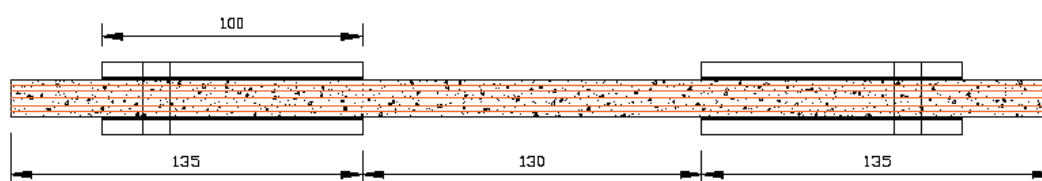


Figura 50. Configuração de corpo-de-prova para ensaio de tração (MELO FILHO, 2005).

4.4.2 Ensaios de flexão em quatro pontos

Para os ensaios de flexão foram produzidas placas com dimensões de 400 x 400 x 12,50 mm, que após cura em câmara por um período de 28 dias, foram cortadas em uma bancada de serra com potência SSP – 75 em amostras no padrão de 82,17 x 400 x 12,50 mm, de acordo com a figura 51. Antes do ensaio os corpos-de-prova foram retirados da câmara úmida e armazenados em uma sala com temperatura controlada de $21^{\circ} \text{C} \pm 1^{\circ} \text{C}$, sendo ensaiados após um intervalo de 40 horas (MELO FILHO, 2005).

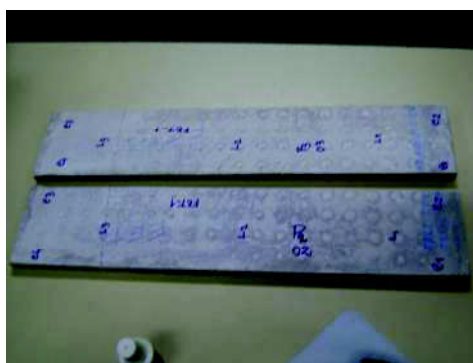


Figura 51. Corpo-de-prova, com dimensões 82,17 x 400 x 12,50 mm.

O dispositivo utilizado para este ensaio foi o mesmo empregado por MELO FILHO (2005), consistindo de quatro cutelos, montado sobre a máquina de ensaio, sendo empregado um sistema de aquisição de dados, contínuo, baseado no programa Trapézio, obtendo -se a carga e a flecha no meio do vão mediante um sensor da prensa e um LVDT (LINEAR VARIABLE DIFFERENTIAL TRANSFORME), respectivamente, Figura 52. Este tipo de configuração é chamado de ensaio de flexão em quatro pontos.

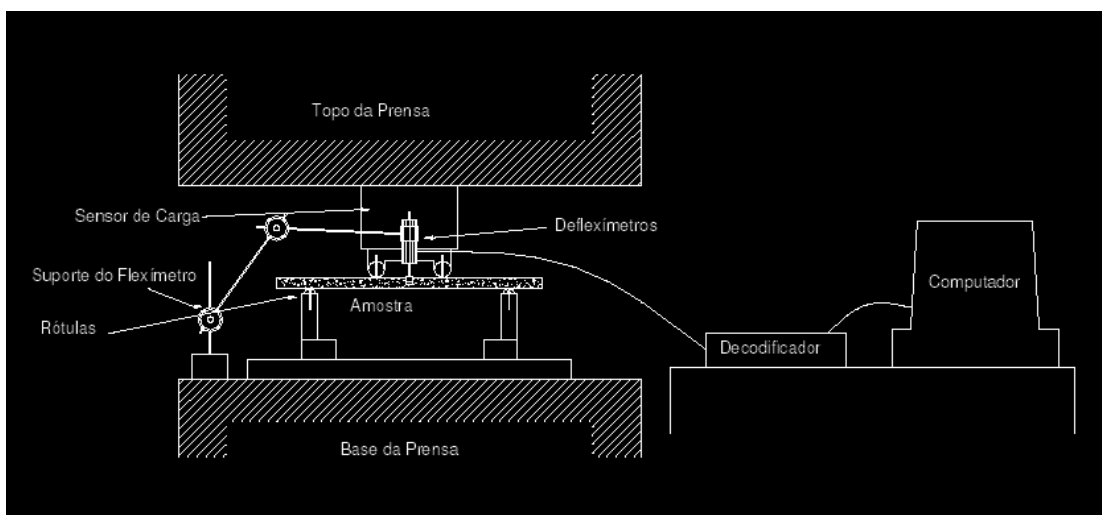


Figura 52. Configuração de ensaio de flexão em quatro pontos (MELO FILHO, 2005).

A finalidade do ensaio de flexão em quatro pontos em placa reforçada com fibra vegetal de *arumã* é avaliar a esbelteza desta sob carga de serviço, de acordo com figura 53.

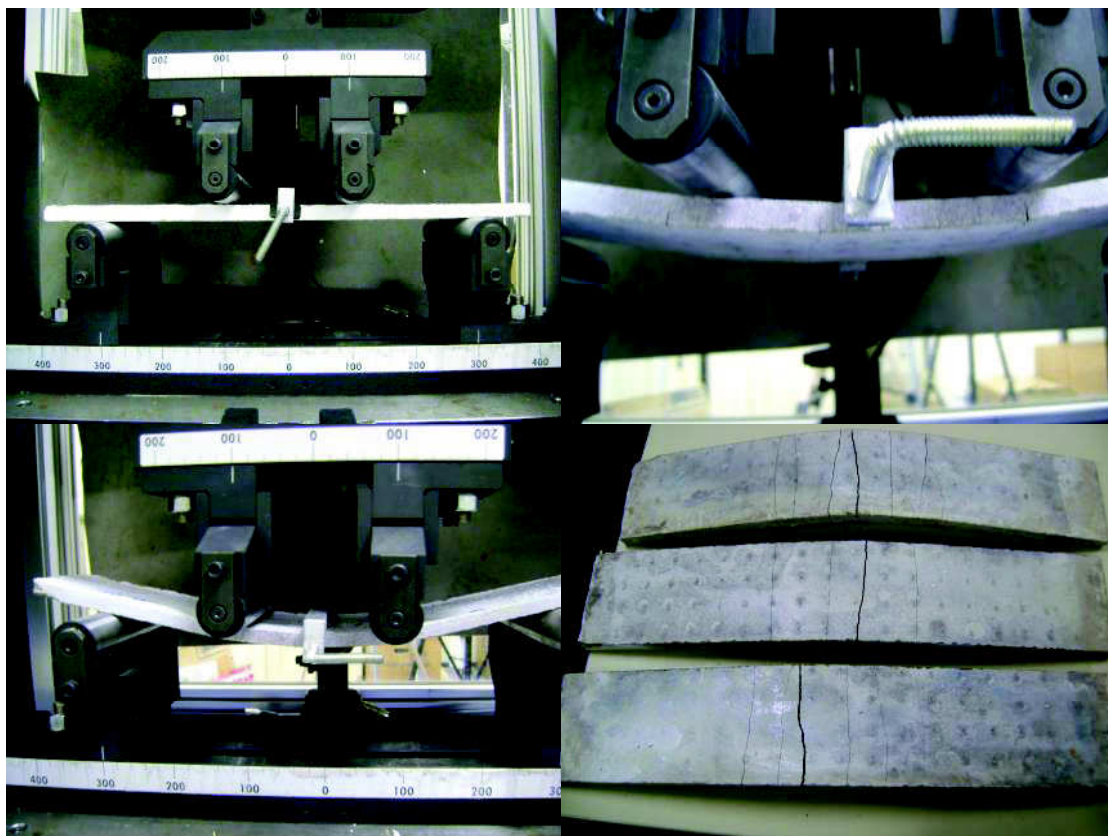


Figura 53. Ensaio ã flexão em quatro pontos - esbelteza da placa reforçada com fibra vegetal de *arumã*.

A velocidade de ensaio utilizada foi de 0,5 mm/min, padronizada para todos os ensaios de flexão. Os pontos de carga possuíam uma distância de 100 mm entre si e em relação a cada ponto de apoio, de modo que no centro o corpo-de-prova estivesse sob flexão pura. Sendo a tensão normal calculada pela expressão:

$$\sigma = \frac{6M}{bd^2} \quad (6)$$

Onde:

σ = Tensão normal;

M = Momento fletor na região central do vão;

b = Largura do corpo-de-prova;

d = Espessura do corpo-de-prova.

Considerando que para uma carga de intensidade P aplicada, o momento fletor na região central do vão é $M = P.L/2$, sendo L a distância entre os pontos de carga e também as distâncias destes em relação aos pontos de apoio, a equação (6) pode ser escrita na forma:

$$\sigma = \frac{3PL}{bd^2} \quad (6)$$

A equação (6) foi a expressão empregada para o cálculo das tensões atuando no corpo-de-prova ensaiado.

Este ensaio foi realizado para 3 amostras com fibras de *arumã* branco.

4.4.3 Ensaio de flexão em placas planas simplesmente apoiadas com carregamento central

Neste ensaio de flexão foram empregados corpos -de-prova com dimensões de 422 x 432 x 12,50 mm, após cura em câmara por um período de 28 dias. Antes do ensaio os corpos -de-prova foram retirados da câmara úmida e armazenados em uma sala com temperatura controlada de $21^\circ \pm 1^\circ$ C, sendo ensaiados após um intervalo de 40 horas. O objetivo deste ensaio é observar o comportamento de uma placa simplesmente apoiada em seus bordos, sob carregamento central, em termos de deslocamentos. Para tanto, foram analisadas placas com e sem a utilização de fibras. Sendo a placa sem fibra denominada neste trabalho de Placa sem Fibra (PSF) e as demais com fibras (PCF). As placas PCF foram reforçadas com 2 camadas bidirecionais de fibra vegetal de *arumã*. Para facilitar a análise, os corpos-de-prova foram previamente pintados de modo que fosse possível uma melhor avaliação dos mecanismos de surgimento e propagação das fissuras, conforme observado na figura 54.



Figura 54. Ensaio de flexão em placas planas simplesmente apoiadas com carregamento central: (a) Placa de laminado pintada; (b) Iniciação do carregamento central.

Para realização dos ensaios foi montado a estrutura mostrada na figura 55, composta por quatro apoios em estrutura metálica colocados em posições simétricas, tendo em sua parte superior um quadro em perfil metálico no qual a placa ficou com o seu bordo apoiado. A carga da máquina foi transmitida através de uma peça de madeira de 100 x 100 mm, de modo a melhor distribuir o carregamento na zona central da placa. Esta estrutura foi montado sobre a mesa da máquina de ensaios compressão de 1000 kN do Laboratório do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ. Este ensaio foi realizado para 2 amostras com fibras de *arumã* branco e uma amostra sem fibra.



Figura 55. Ensaio de flexão em placas planas simplesmente apoiadas com carregamento central : (a) Aparecimento das fissuras – superfície inferior da placa; (b) Fissuras cocêntricas – superfície superior da placa.

Para a observação dos deslocamentos foram empregados extensômetros posicionados de acordo com o esquema apresentado na figura 56, de tal modo, que fossem observados os deslocamentos no centro da placa (lvdt 3), onde espera-se o maior deslocamento; em uma borda (lvdt 1), de forma a que fosse verificado a condição de apoio simples, ou seja, rotação do bordo com elevação do trecho em balanço; e em uma das direções principais da placa (lvdt 2), para que fosse observado o comportamento em termos de deslocamento da placa nesta direção.

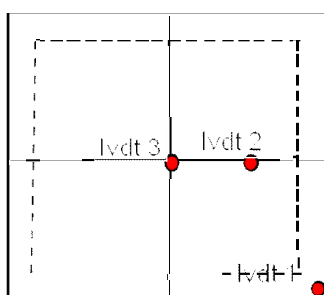


Figura 56. Esquema dos posicionamentos dos extensômetros, para melhor observação dos deslocamentos no centro da placa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O concreto é um compósito que apresenta uma excelente resposta quando submetido à esforço de compressão, porém, possui baixa capacidade de resistência quando submetido ao esforço de tração. Estudos comprovam que a minimização desta fragilidade pode ser adquirida pela adição de fibras neste compósito. Considerando este aspecto, o presente estudo procura apresentar a viabilidade técnica das fibras vegetais de *arumã* com a finalidade de aplicação ao reforço de placas de material cimentício.

Para tanto, diversos ensaios de caracterização tanto da fibra quanto do compósito resultante foram realizados e descritos no Capítulo 4. A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos nesses ensaios.

5.1 Caracterização da fibra de *arumã*

Segundo Carvalho (2005), o desempenho mecânico da fibra de sisal é elevado e indicativo para a aplicação na indústria tecnológica. Desta forma, os resultados obtidos com as fibras de *arumã* foram comparados com os resultados obtidos por outros pesquisadores com a fibra de sisal, tendo em vista, que esta fibra tem sido amplamente estudada e utilizada nas indústrias.

Inicialmente, para a análise da fibra vegetal de *arumã*, de forma isolada, foram caracterizadas suas propriedades químicas, físicas e mecânicas. A seguir são apresentados os principais resultados.

5.1.1 Densidade

Pelo método de determinação da densidade (deslocamento e pesagem) foram obtidos os valores para a fibra de *arumã* cujos resultados se aproximam da densidade de árvores com grande aplicação na indústria de construção civil da região Norte, tal como o cedrinho, cuja

densidade é da ordem de 0,5 g/cm³. Isto indica que a fibra possui uma estrutura fibrilar resistente a esforços de tração, porém, com a leveza equivalente da espécie dos cedrinhos.

Com os dados apresentados na Tabela 4, observa-se que as fibras vegetais de *arumã* destacaram-se pela densidade baixa obtida, apresentando assim, uma estrutura extremamente leve com potencial de aplicabilidade em compósitos estruturais sem aumento significativo do peso próprio deste após a introdução da fibra. A combinação de propriedades mecânicas e leveza estrutural tornam os compósitos com fibras de *arumã* interessantes materiais de aplicabilidade no ramo de engenharia, conforme Tabela 4.

Além disso, deve-se ressaltar que as fibras de *arumã* apresentaram valores de densidade menores do que aquele apresentado pelo sisal, que está em torno de 1,5 g/cm³ (CHAND *et. al*, 1988).

Tabela 4. Densidade básica das fibras vegetais de *arumã*.

Amostras	Vol. Saturado Médio - amostra externa (cm ³)	Peso Seco Médio – amostra externa (g)	Densidade Básica – Média (g/cm ³)
<i>Arumã tupé</i>	1,18	0,64	0,54
<i>Arumã branco</i>	0,27	0,10	0,37
<i>Arumã vermelho</i>	0,34	0,22	0,65
<i>Arumã canela-de-jacamin</i>	0,15	0,08	0,53

5.1.2 Composição Química

Pode-se observar que as fibras de *arumã* do ponto de vista químico, apresentaram resultados muito satisfatórios e promissores, quando comparados à fibra de sisal.

O estudo deve ser mais investigado em função das diversas discussões que giram em torno desta temática, por existirem vários aspectos que ainda poderão ser analisados, como por exemplo, condições e dados climáticos, idade e absorção de nutrientes podem influenciar a estrutura das fibras (Tabela 5).

Tabela 5. Componentes químicos das fibras de *arumã*.

Amostras	Extrativos etanol-tolueno (%)	Extrativos etanol (%)	Solubilidade em água (%)	Lignina (%)	Celulose bruta (%)	Umidade (%)
<i>Arumã tupé</i> - mat. Ext.	0,76	0,46	4,46	14,23	62,73	12,47
<i>Arumã branco</i> - mat. Ext.	0,43	0,14	8,29	14,19	62,24	10,09
<i>Arumã vermelho</i> - mat. Ext. (**)	0,42	0,29	7,09	14,09	-	10,64
<i>Arumã canela</i> - mat. Ext.	1,78	0,36	5,11	14,96	65,01	11,86
Sisal (*)	-	-	-	8	67	-

(*) Fonte: SANTOS, 2007.

(**) O teor de celulose da fibra vegetal do *arumã* vermelho não foi obtido, em virtude da insuficiência de material no período dos ensaios.

A celulose nas fibras vegetais funciona como um elemento estrutural fundamental a resistência à tração. O módulo de elasticidade e sua resistência à tração são diretamente proporcionais ao teor da celulose contido nas fibras vegetais (CHAND *et al.*, 1988). Portanto, a celulose é o principal componente constituinte da fibra, por mantê-la estável e resistente, o que justifica a viabilidade de um estudo mais aprofundado da fibra de *arumã*, tendo em vista que os resultados apontam para valores expressivos aos encontrados em outras fibras vegetais já estudadas (sisal, côco e etc.), chegando a atingir valores superiores a 60%, conforme a tabela 5.

Além disso, as fibras vegetais de *arumã* apresentaram teores de celulose equivalentes aos apresentados pelo sisal, destacando-se em ordem crescente de teor de celulose as amostras do *arumã canela*, *tupé* e o *arumã* branco. Portanto, deve-se esperar um

comportamento das propriedades mecânicas, referente às tensões e deformações, das fibras de *arumã*, igual ou similar ao das fibras de sisal. Suposição que pode ser confirmada pelos resultados a serem apresentados na seção 5.1.4.

A lignina por ser um polímero de estrutura amorfa, fornece ao tecido celular uma estrutura de resistência e indiretamente protege a fibra contra ataques químicos. Desta forma, os teores de lignina das fibras de *arumã*, encontrados foram de aproximadamente acima de 14% para todas as espécies estudadas. Pode-se verificar que os teores de lignina dos *arumãs*, são superiores aos encontrados nos estudos com a fibra de sisal. Indicando desta forma, que a fibra de *arumã* possui uma estrutura fibrilar resistente e com um potencial de defesa ao ataque químico bem elevado, propiciando aos elementos componentes do compósito, maior coesão.

Deve-se destacar, ainda, que essa substância macromolecular, além de aumentar a rigidez da parede celular da fibra, tem como característica, a redução da permeabilização da parede celular à água, propiciando, portanto, à fibra mais resistência à ataques de microorganismos e / ou oxidação.

Observa-se também, que neste estudo, os teores de cinzas, açúcares e material inorgânico não foram pesquisados ficando, portanto, alguns componentes da fibra vegetal de *arumã* para serem determinados e quantificados, para estudos futuros.

5.1.3 Termogravimetria

Nos ensaios de termogravimetria, a estabilidade térmica das amostras das fibras de *arumãs* foram avaliadas nos intervalos previstos das perdas de massas pela temperatura, no interior do equipamento TA STD Q600 V20.5, que alcançam alterações físicas (sublimação, evaporação e sorção). Essa decomposição de substâncias orgânicas pode demonstrar quantitativamente dados para o traçado do gráfico, que relaciona as variações de massa

ocorridas nas amostras das fibras de *arumã* durante seu aquecimento e a temperatura, conforme análises dos gráficos apresentados na Figura 57.

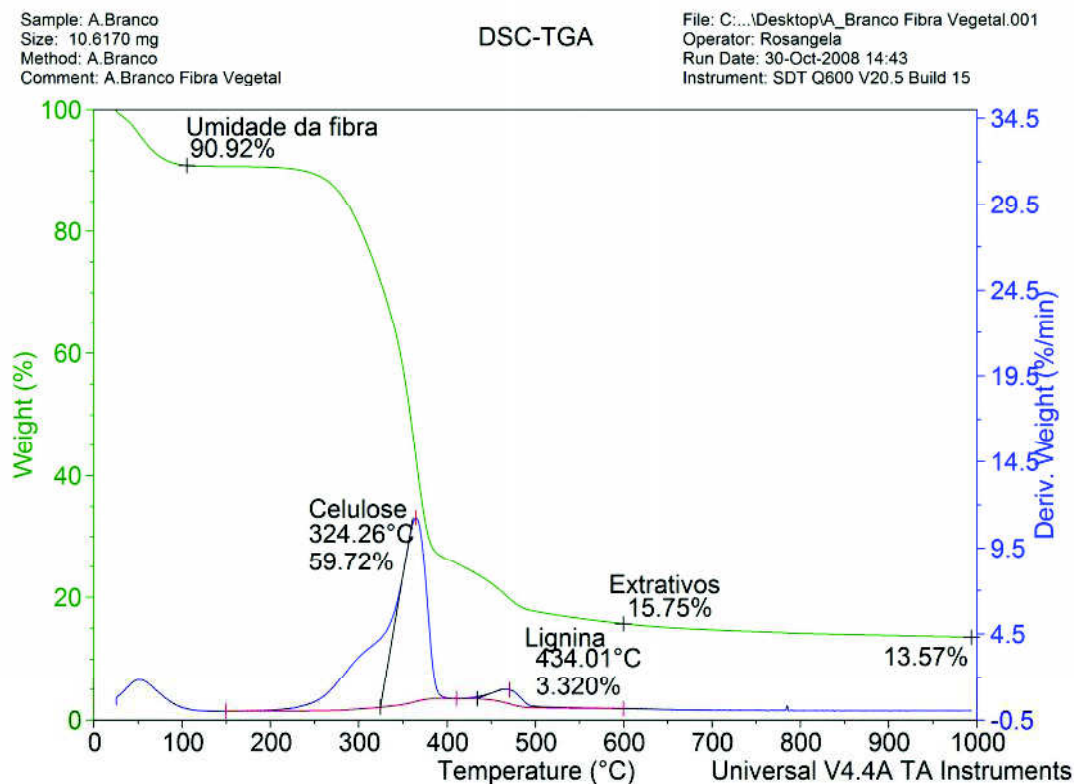


Figura 57. Análise termogravimétrica da fibra vegetal do *arumã* branco.

As análises por Análise Termogravimétrica (TGA) têm sido utilizadas para várias finalidades, uma vez que estes materiais apresentam estabilidades térmicas bastante distintas.

A estabilidade térmica das amostras das fibras de *arumã* branco foi avaliada por TGA, configuradas dentro de cada intervalo previsto para cada componente químico das fibras vegetais: até 105° C, na curva TG ocorre uma perda de massa, indicando uma reação exotérmica, como pode ser caracterizada pela curva DTA, resultando numa perda de 8,5% da umidade (desidratação) da fibra do *arumã* branco; no intervalo de 240° C a 340° C, ocorre a degradação da massa da celulose de 26,5%, e na curva DTA, acontece um pico na temperatura de 324,26° C, onde incide a reação exotérmica de maior perda percentual por unidade de

tempo; por outro lado, no intervalo de 340 ° C a 600 ° C, observa-se uma perda da massa da lignina de 47,5%, e a partir de 600 ° C restam 15,75% de extrativos.

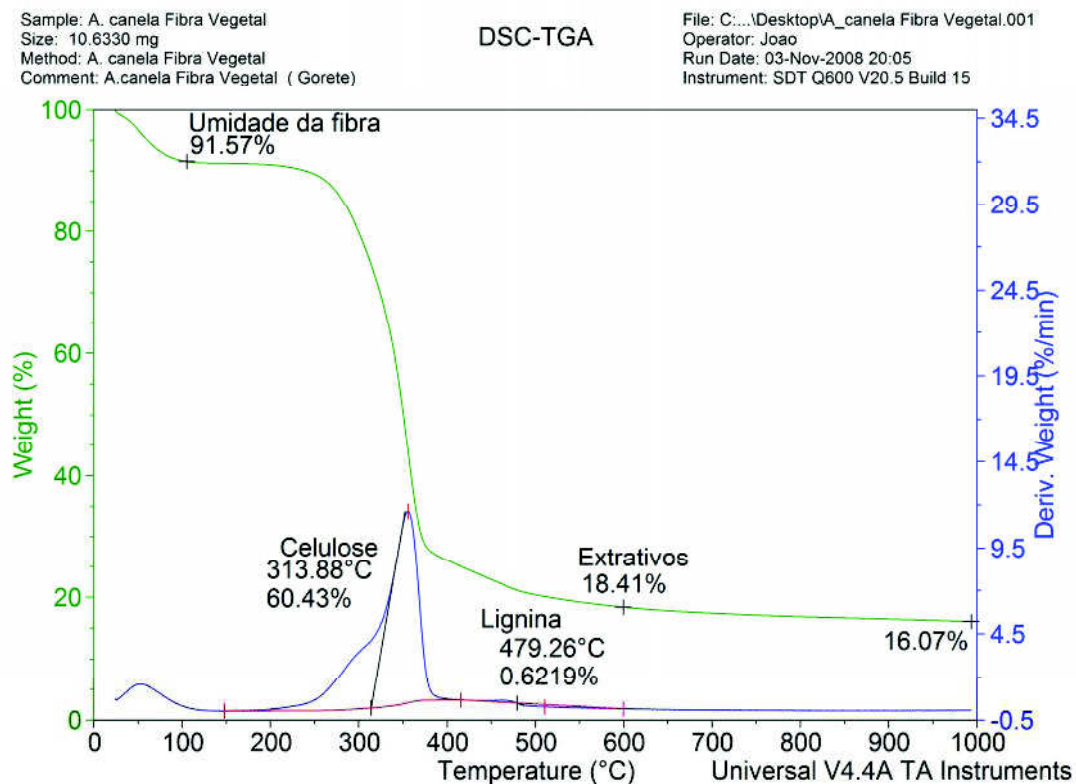


Figura 58. Análise termogravimétrica da fibra vegetal do *arumã canela*

Conforme a Figura 58, a estabilidade térmica das amostras das fibras de *arumã canela* avaliadas através de análise termogravimétrica, configuradas dentro de cada intervalo previsto para cada componente químico das fibras vegetais: até 105 ° C, na curva TG ocorre uma perda de massa, indicando uma reação exotérmica, como pode ser caracterizada pela curva DTA, resultando numa perda de 8% da umidade (desidratação) da fibra do *arumã* branco; no intervalo de 240 ° C a 340 ° C, ocorre a degradação da massa da celulose de 34%, e na curva DTA, acontece um pico na temperatura de 313,88 ° C, onde incide a reação exotérmica de maior perda percentual por unidade de tempo; por outro lado, no intervalo de 340 ° C a 600 ° C,

observa-se uma perda da massa da lignina de 37%, e a partir de 600 ° C restam 18,41% de extrativos.

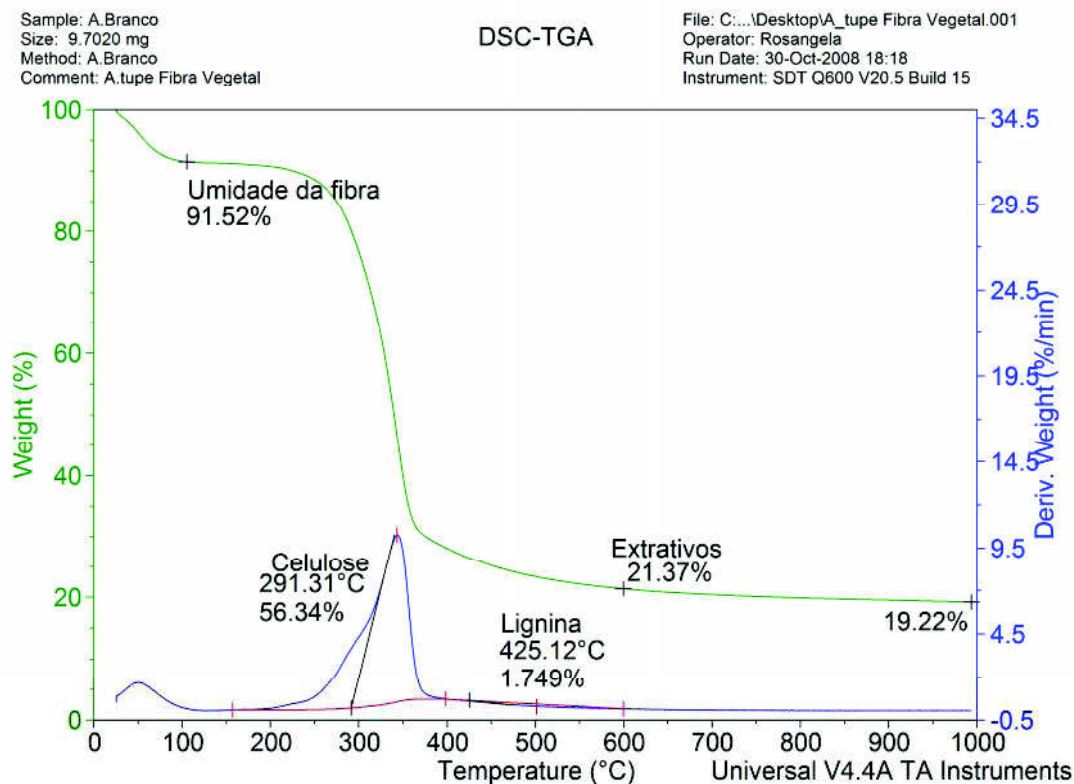


Figura 59. Análise termogravimétrica da fibra vegetal do *arumã tupé*.

Conforme a Figura 59, a estabilidade térmica das amostras das fibras de *arumã tupé* avaliadas através de análise termogravimétrica, configuradas dentro de cada intervalo previsto para cada componente químico das fibras vegetais: até 105 ° C, na curva TG ocorre uma perda de massa, indicando uma reação exotérmica, como pode ser caracterizada pela curva DTA, resultando numa perda de 11,50% da umidade (desidratação) da fibra do *arumã* branco; no intervalo de 240 ° C a 340 ° C, ocorre a degradação da massa da celulose de 43%, e na curva DTA, acontece um pico na temperatura de 291,31 ° C, onde incide a reação exotérmica de maior perda percentual por unidade de tempo; por outro lado, no intervalo de 340 ° C a 600 ° C,

observa-se uma perda da massa da lignina de 24%, e a partir de 600 ° C restam 21,37% de extrativos.

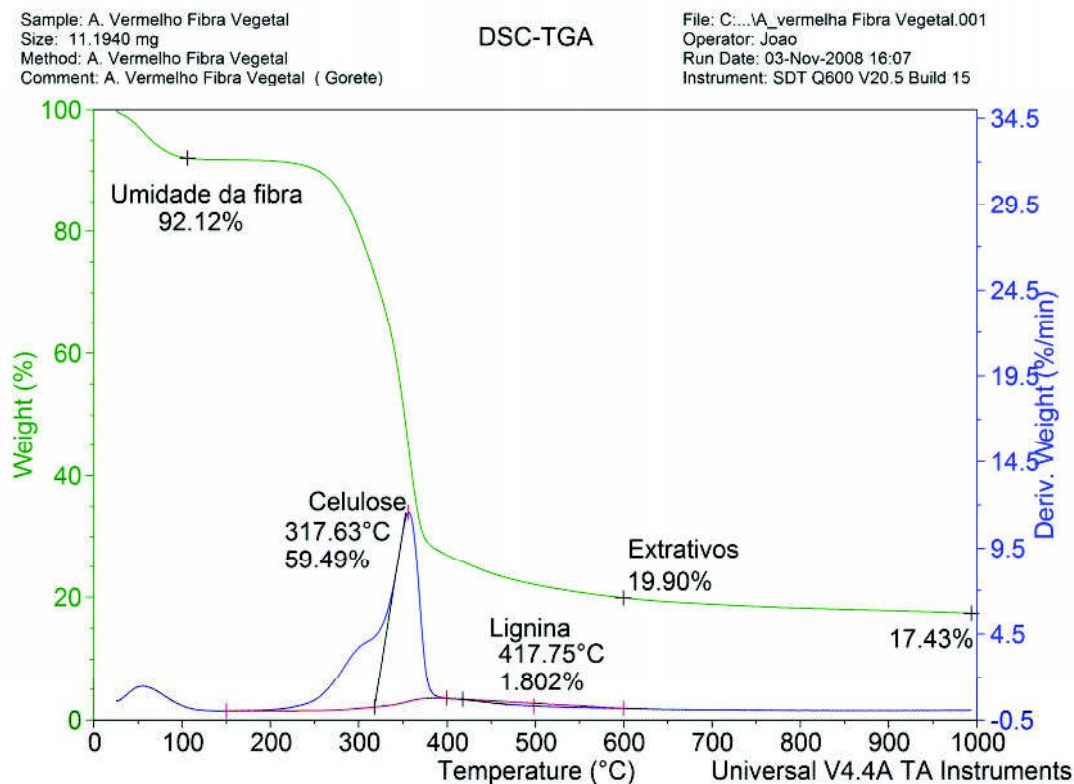


Figura 60. Análise termogravimétrica da fibra vegetal do *arumã* vermelho.

Conforme a Figura 60, a estabilidade térmica das amostras das fibras de *arumã* vermelho avaliadas através de análise termogravimétrica, configuradas dentro de cada intervalo previsto para cada componente químico das fibras vegetais: até 105 ° C, na curva TG ocorre uma perda de massa, indicando uma reação exotérmica, como pode ser caracterizada pela curva DTA, resultando numa perda de 7,65% da umidade (desidratação) da fibra do *arumã* branco; no intervalo de 240 ° C a 340 ° C, ocorre a degradação da massa da celulose de 26%, e na curva DTA, acontece um pico na temperatura de 317,63 ° C, onde incide a reação exotérmica de maior perda percentual por unidade de tempo; por outro lado, no intervalo de

340° C a 600° C, observa-se uma perda da massa da lignina de 45%, e a partir de 600° C restam 19,90% de extrativos.

A partir dos gráficos mostrados nas Figuras 57 a 60, as curvas de TG e DTG referentes às quatro fibras foram sobrepostas nas Figuras 61 e 62, respectivamente, de modo a possibilitar uma análise mais concisa.

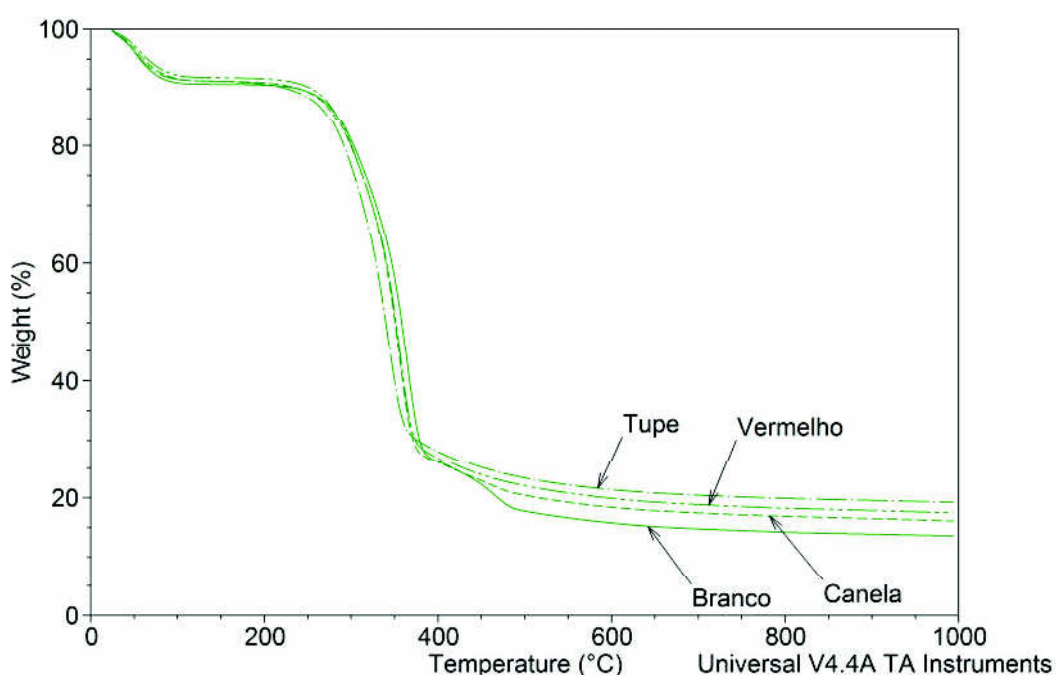


Figura 61. TG das fibras vegetais dos *arumãs*.

Os picos de capacidade térmica de cada fibra se diferenciam em escala bem reduzida, porém, a curva referente à fibra de *arumã* branco, apresentou um pico maior de absorção térmica em relação às outras fibras, tendo uma perda de massa de celulose de 59,72%, componente este, importante na constituição de um compósito, pois, suas propriedades físicas e mecânicas influenciam de forma positiva nas propriedades deste compósito resultante.

Dada a curva TG, pode-se concluir que a fibra de *arumã* vermelho, apresentou melhor estabilidade térmica em relação às demais fibras, apresentando um percentual de perda de

celulose de 26%, conforme Quadro 2. Portanto, quanto maior a perda de celulose menor a agregação dos constituintes na formação do compósito.

Quadro 2 – Percentuais de perdas de massa dos principais componentes químicos da fibra vegetal de *arumã*, pela curva TG.

TIPO DE FIBRA DE <i>ARUMÃ</i>	% PERDA DE CELULOSE	% DE PERDA DE LIGNINA
BRANCO	26,5	47,5
CANELA	34	37
TUPÉ	43	24
VERMELHO	26	45

A partir dessas curvas, pode-se obter sua primeira derivada e determinar as temperaturas limites das reações das fibras de *arumãs*, podendo verificar a ocorrência de reações sobrepostas na mesma faixa de temperatura, conforme gráfico da figura 62.

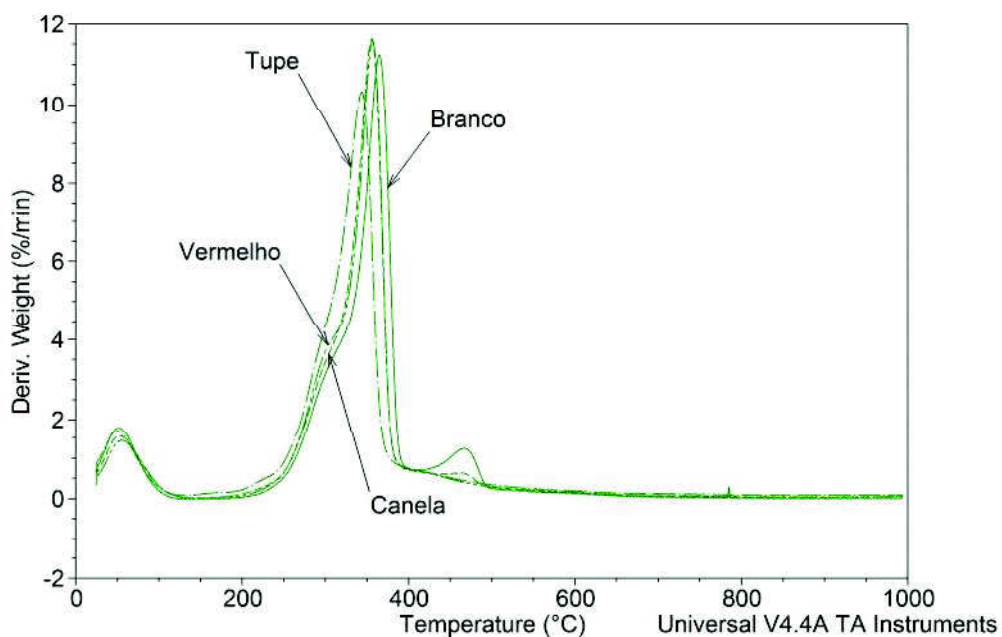


Figura 62. DTG das fibras vegetais dos *arumãs*.

Pode-se observar pelo Quadro 3, que o maior pico exotérmico de maior perda percentual por unidade de tempo representa a celulose, o qual ocorre a 324,3 °C.

Quadro 3 – Picos exotérmicos de maiores perdas percentuais/unid. tempo-curva DTA.

TIPO DE FIBRA DE ARUMÃ	TEMPERATURA (°C)	TEOR DE CELULOSE (%)	TEOR DE LIGNINA(%)
BRANCO	324,26	59,72	-
BRANCO	434,01	-	3,32
<i>CANELA</i>	313,88	60,43	-
<i>CANELA</i>	479,26	-	0,62
<i>TUPÉ</i>	291,31	56,34	-
<i>TUPÉ</i>	425,12	-	1,75
VERMELHO	317,63	56,34	-
VERMELHO	417,75	-	1,80

5.1.4 Módulo de elasticidade e tensão última de tração

Para determinação dos módulos de elasticidade e das tensões últimas à tração, conforme já mencionado no Capítulo 4, foram plotados gráficos tensão x deformação a partir de valores discretos coletados pelo sistema de aquisição de sinais acoplados a máquina universal de ensaios. Na Figura 63 apresenta-se, o gráfico tensão x deformação para a amostra b14 da fibra de *arumã* branco, a qual obteve o melhor resultado para este ensaio dentre todas as fibras ensaiadas.

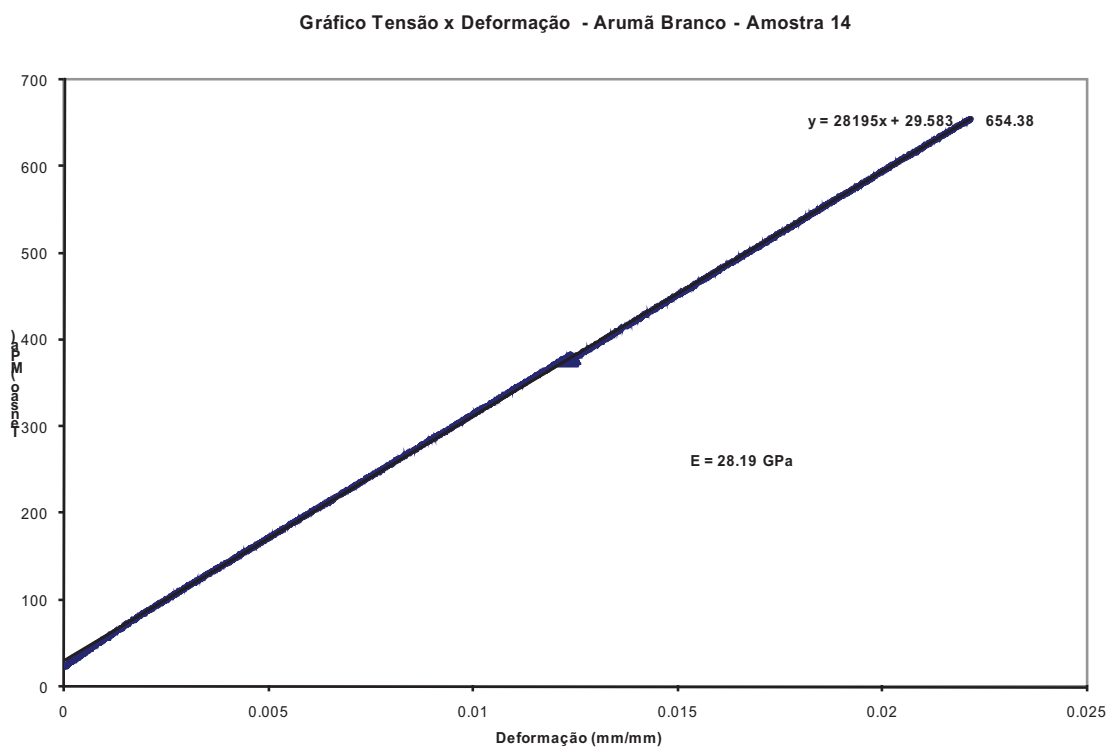


Figura 63. Gráfico tensão x deformação da amostra de *arumã* branco.

Deve-se ressaltar que os gráficos obtidos neste tipo ensaio, para todas as amostras ensaiadas de fibra de *arumã*, apresentaram o mesmo padrão do gráfico mostrado na Figura 63, característicos de uma reta. Desta forma, observa-se que a fibra de *arumã* é um material com comportamento elástico linear considerando as suas propriedades mecânicas relacionadas às tensões e deformações. Sendo linear, o módulo de elasticidade é constante e de valor igual à tangente do ângulo de inclinação da reta, neste caso, 28,19 GPa.

Com os valores fornecidos pelos gráficos tensão x deformação das amostras de fibras de *arumã* ensaiadas, fez-se tabelas com os valores do módulo de elasticidade e tensão última de tração (Anexo 1). Os intervalos de variação destas grandezas estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Módulo de elasticidade e tensão última à tração (intervalo de variação).

Amostras	Módulo de elasticidade (GPa)	Tensão última (MPa)
<i>Arumã tupé</i>	14,89 – 20,89	211,47 – 487,00
<i>Arumã branco</i>	11,40 – 28,19	176,53 – 654,38
<i>Arumã vermelho</i>	11,55 – 24,00	167,50 – 378,68
<i>Arumã canela-de-jacamin</i>	11,59 – 16,67	195,44 – 464,10

O módulo de elasticidade e a tensão última de tração, para as espécies de *arumã* ensaiadas, apresentaram um intervalo de variação considerável entre os valores máximos e mínimos. Deve-se destacar que a grande variação dessas duas propriedades mecânicas reflete o fato de que as fibras vegetais apresentam uma variação em sua composição química, cuja distribuição se diferencia ao longo das partes de uma mesma planta, sendo esta quantitativamente mensurável. Essa variação é decorrente de sua origem, forma natural, localização geográfica, idade, clima e condições do solo, descritos no capítulo 3, item 3.1.

Deve-se salientar que nos ensaios do *arumã* branco foram obtidos resultados excelentes, entre eles, destacam-se as amostras b4, com módulo de elasticidade de 27,65 GPa e tensão última de 559,69 MPa; e a amostra b14, com módulo de elasticidade de 28,19 GPa e tensão última de 654,38 MPa, valores superiores ao sisal.

Com relação às amostras do *arumã* vermelho, destacam-se a amostra v5 que apresentou um módulo de elasticidade de 20,33 GPa e tensão última de 284,68 MPa; e a amostra v7 onde o módulo de elasticidade foi de 24 GPa e a tensão última foi de 366,11 MPa.

Segundo Carvalho (2005), o módulo de elasticidade da fibra de sisal atinge valores no intervalo de 9,4 a 22,0 GPa.

Diante do exposto, observa-se que os melhores resultados obtidos com as fibras de *arumã*, no ensaio de tração, foram àqueles realizados com as amostras do tipo branco. Assim, a partir dos resultados obtidos nos ensaios físicos, mecânicos e químicos com as fibras de *arumã*, foram confeccionados os compósitos com esta fibra, uma vez que esta apresentou os melhores resultados.

5.2 Caracterização do compósito

Esta etapa deu-se por meio dos ensaios físicos e mecânicos do compósito, demonstrando a influência que a fibra exerce sobre o compósito quando submetidas à cargas de flexão, confirmando a transferência de tensão de forma mais eficiente entre a fibra vegetal de *arumã* e matriz .

Observou-se que os compósitos, possuem duas fases distintas. A fase denominada matricial, onde esta apresenta um baixo módulo e são frágeis quando submetidas a esforços de tração e a fase estrutural, representada normalmente, por um elemento de reforço (fibras), e que possuem um módulo alto e elevada resistência mecânica.

Após a moldagem e cura aos 28 dias do compósito com fibra de *arumã* branco foram realizados os ensaios de caracterização mecânica conforme descrito no capítulo 4.

5.2.1. Flexão em quatro pontos

Os resultados obtidos para o ensaio do compósito com fibra de *arumã* foram comparados com aqueles apresentados por MELO FILHO (2009) obtidos no mesmo tipo de ensaio, com a fibra de sisal. O mesmo autor estudou o comportamento mecânico para o ensaio de flexão em quatro pontos do compósito, utilizando algumas percentagens de sisal em relação

ao volume do compósito. Os gráficos obtidos por ele para este ensaio, considerando percentuais de fibra variando de 2% até 10%, são apresentados na Figura 64.

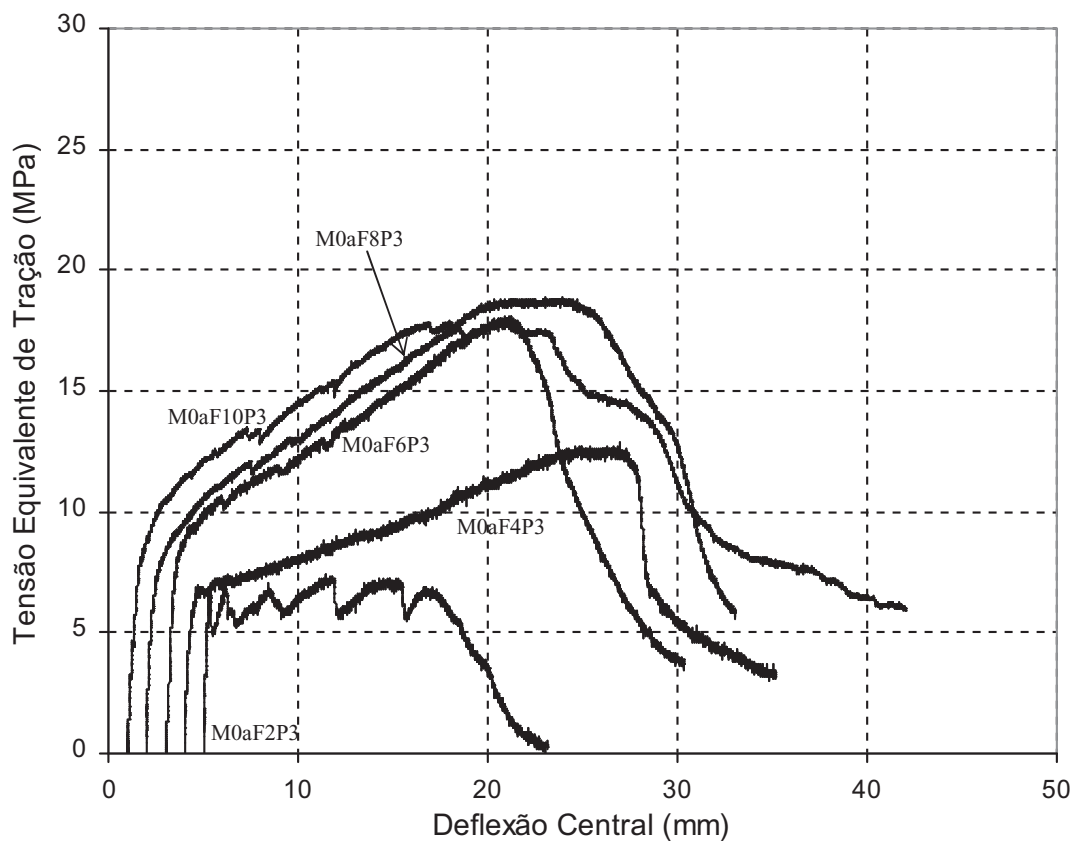


Figura 64. Curvas típicas de tensão x deflexão de tração na flexão, obtidos em compósitos com fibras de sisal (MELO FILHO, 2009).

Para comparar os resultados obtidos para os compósitos com fibras de *arumã* e sisal, as curvas apresentadas na Figura 64 foram digitalizadas pelo do aplicativo Digitizelt (2006), o qual transformou os gráficos em dados digitais que possibilitaram a sua montagem empregando uma planilha Excel, de modo que foi possível montar os gráficos referentes aos resultados obtidos para o compósito com *arumã*, vide Figura 65.

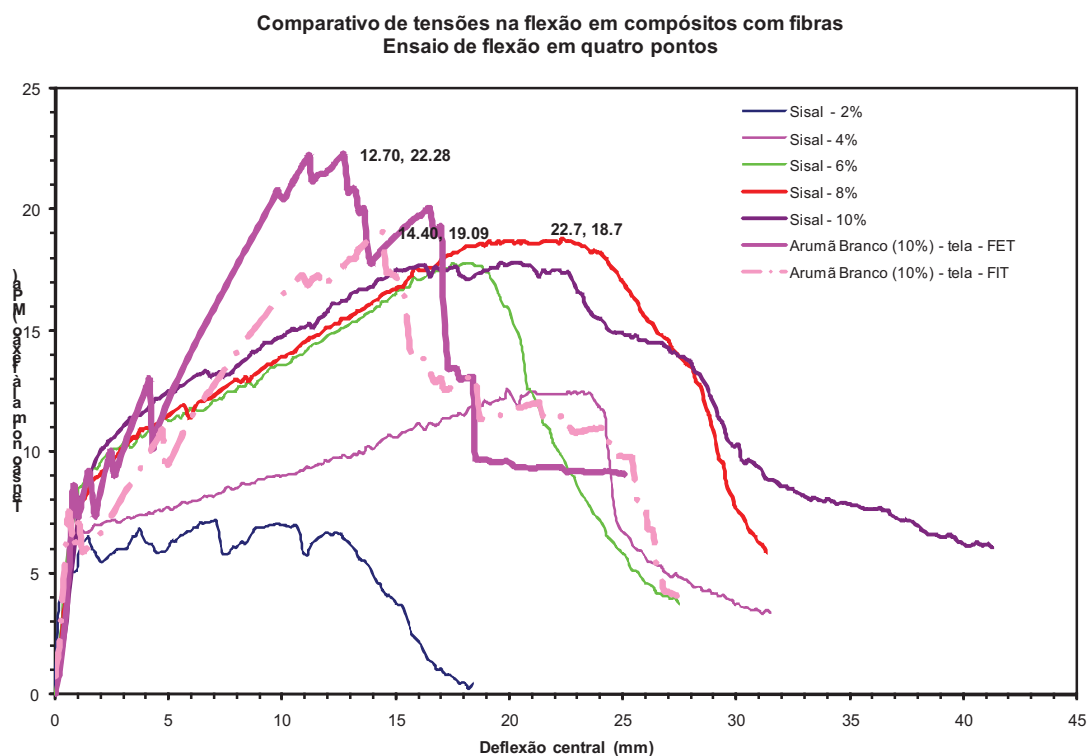


Figura 65. Curvas típicas de tensão x deflexão de tração na flexão obtidas em compósitos com fibras de sisal e de *arumã*.

Na Figura 65 são apresentados os gráficos obtidos para o compósito com fibras de *arumã* considerando duas situações distintas. A primeira, denominada por FET, representa a situação na qual a superfície externa da fibra foi posicionada para baixo, enquanto na segunda situação, FIT, esta superfície foi posicionada para cima. Estas duas situações foram consideradas, tendo em vista a questão da menor ou maior adesão da fibra à matriz cimentícia.

Em ambas as situações o percentual de fibra em relação ao volume do compósito foi de 10%.

Dos gráficos da Figura 65, observa-se que em termos de adesão da fibra à matriz cimentícia, o posicionamento da fibra, FET ou FIT, não alterou de forma significativa os resultados com relação à deflexão central, indicando que a posição de colocação da tela não influencia a adesão.

Em termos de tensões, os compósitos com fibra de *arumã* apresentaram valores máximos bem superiores ao valor máximo obtido para a fibra de sisal, com valores máximos

de 22,28 MPa e 19,09 MPa, respectivamente, enquanto o valor máximo para o compósito com fibras de sisal foi obtido para um percentual de 8%, 18,7 MPa. Portanto, a tensão máxima obtida para o compósito com fibras de *arumã* foi 1,19 vezes superior a obtida pelo compósito com fibras de sisal.

Em relação à deflexão central, ao serem comparados os valores obtidos para os compósitos com fibras de sisal e de *arumã*, considerando a mesma proporção de fibra (10%), verifica-se que o primeiro possibilitou uma deflexão maior do compósito do que aquela em relação ao compósito de *arumã*.

Deve-se salientar que os resultados superiores em termos de deslocamentos para os compósitos de sisal, com exceção daquele com percentual de 2%, provavelmente está relacionado à superfície específica das fibras de sisal, as quais por apresentarem um valor bem maior às fibras de *arumã* possibilitam uma maior aderência com a matriz cimentícia.

A Figura 66 mostra uma placa de compósito com fibras de *arumã* em estágio de pós-fissuração durante o ensaio de flexão, percebe-se nesta figura que as fissuras ocorrem em maior frequência e intensidade na região central da placa, sendo as maiores observadas no centro da placa, conforme o esperado, uma vez que esta região fica submetida a um estado de flexão pura com momento de flexão máximo.

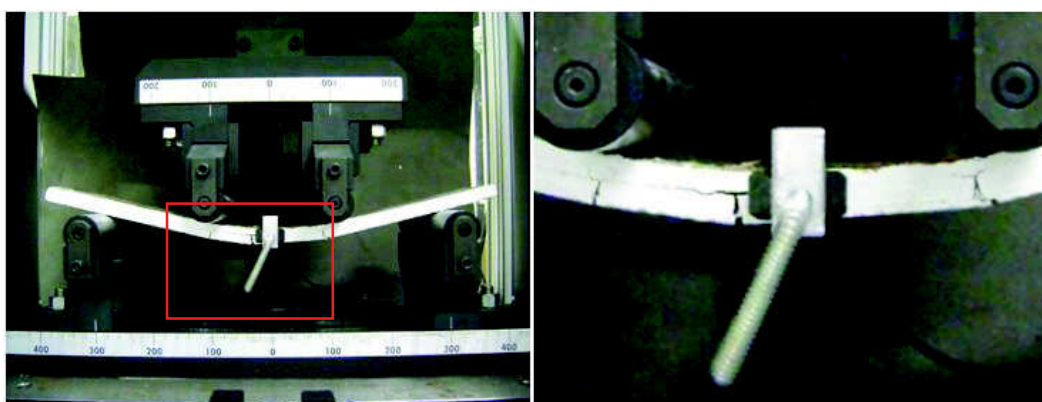


Figura 66. Compósito no estágio de pós-fissuração em ensaio de flexão.

A utilização de metacaulinita neste compósito, com teor de 50% do material cimentante, reduziu consideravelmente a porosidade da placa, e conseqüentemente ocorreu também a redução do teor do hidróxido de cálcio, tornando a matriz mais resistente.

A adição de fibras vegetais na matriz originou um compósito mais resistente em seus estágios de primeira fissura e pós-fissura, avaliados nos ensaios mecânicos. Isto ocorre em função da fibra dissipar energia durante o atrito mecânico, ou seja, no seu processo de descolagem da matriz, tendem a cessar a propagação da trinca, evitando a concentração de tensões nas áreas em que as mesmas se encontram.

As concentrações de tensões normalmente ocorrem:

- Nas áreas onde não aconteceu uma boa adesividade da fibra matriz,
- Onde as fibras se interceptam e,
- Nas extremidades das fibras.

O comportamento de transferência de tensões entre as fissuras originadas é proveniente da adição do elemento de reforço, as fibras, que evitam a perda de resistência e aumentam a capacidade de resistência à flexão do compósito.

5.2.2. Flexão de Placa Simplesmente Apoiada

Conforme a metodologia apresentada no item 4.4.3. foram realizados os ensaios com as placas sem e com reforço de fibras, sendo os resultados apresentados nas figuras 67 e 68.

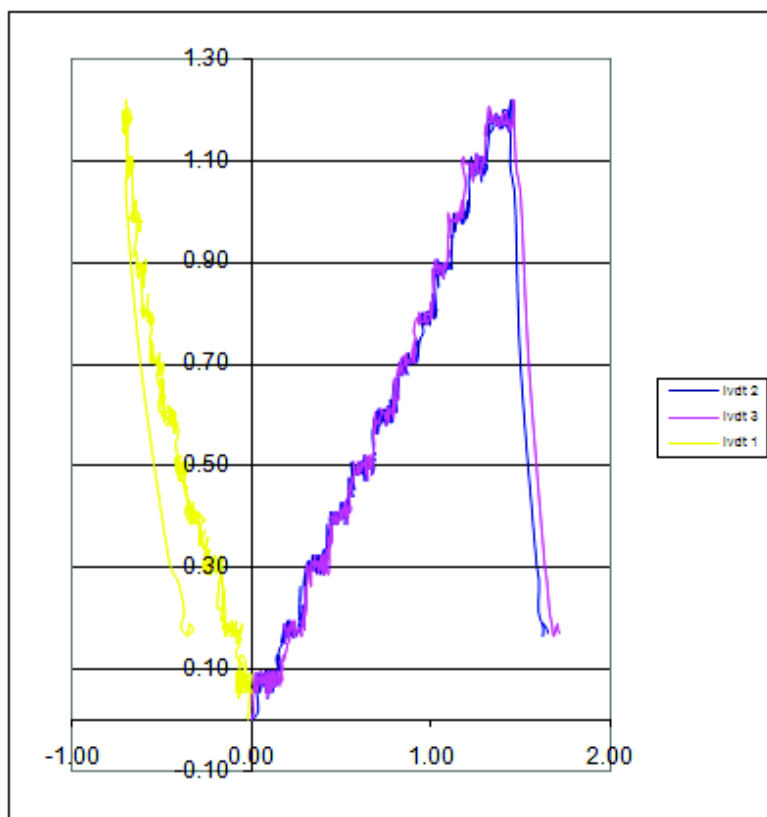


Figura 67. Ensaio de flexão com placa simplesmente apoiada sem o reforço da fibra vegetal de *arumã* branco.

Na figura 67, observa-se que à medida que a carga é aplicada, a placa apresenta uma resposta linear em termos do deslocamento (lvd2 e lvd3), ou seja, o deslocamento é proporcional a força aplicada. Sendo que o valor máximo da força aplicada é de cerca de 1,20 kN com um deslocamento do ponto central de 1,33 mm. Observa-se que o deslocamento do ponto localizado em uma das direções principais (lvd2) apresenta valores muito próximos àqueles apresentados pelo ponto central (lvd1) a medida que a carga é aplicada, ambos apresentando uma ruptura repentina, característica de materiais frágeis. Além disso, os valores negativos observados no ponto localizado no bordo da placa (lvd1) sugerem que neste ponto

houve deslocamentos no sentido oposto aos apresentados pelo ponto central, confirmando deste modo que o bordo da placa sofreu rotação, característica esperada para uma placa com bordos simplesmente apoiados, figura 68.

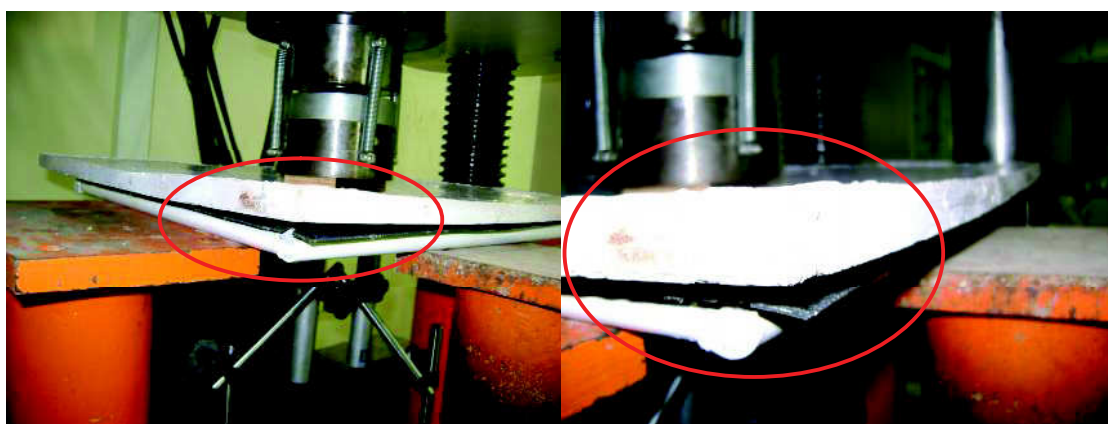


Figura 68. Placa com os bordos simplesmente apoiados, ao receber carregamento central sofre rotação em seu bordo.

Com relação aos gráficos da figura 69 para a placa com fibras, observa-se também, um comportamento linear no início da aplicação da carga, sendo este comportamento mantido até atingir um valor em torno de 1,20 kN. Se comparado com os gráficos apresentados na figura 67, este comportamento mostra que a resistência oferecida pela placa até o limite de carregamento de 1,20 kN deve-se essencialmente a matriz cimentícia, isto é comprovado pela ruptura abrupta já mencionado anteriormente da placa sem fibras quando atingi -se este valor de carga aplicada.

Além disso, na figura 69, observa-se que do mesmo modo que ocorreu com a placa sem fibras, o ponto localizado no bordo da placa com fibras (lvdt 1) apresentou deslocamento no sentido contrário ao ponto central desta, indicando que a placa com fibras no ponto de apoio apresenta rotação, confirmando a condição de placa com bordos simplesmente apoiados.

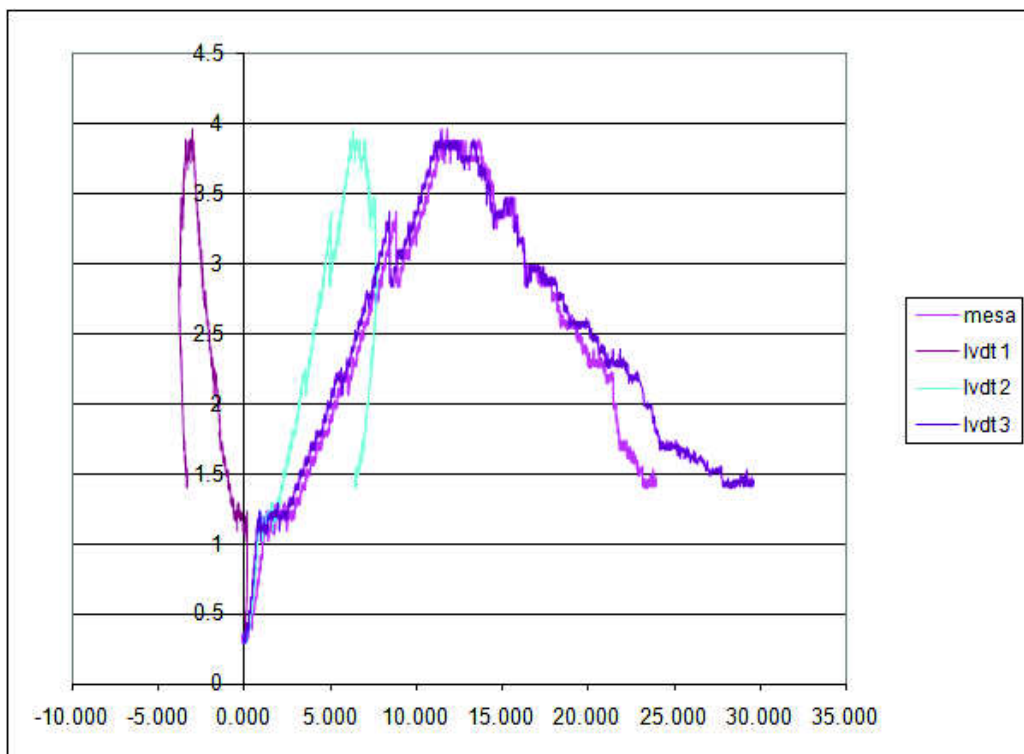


Figura 69. Ensaio de flexão com placa simplesmente apoiada com o reforço da fibra vegetal de arumã branco.

Por outro lado, os gráficos referentes ao ponto central (lvdt 3) e o ponto em uma das direções principais (lvdt 1) mostram um deslocamento maior do primeiro em relação ao segundo, o que indica uma distribuição de tensões mais uniforme da placa com fibras, sendo está maior no centro e menor em direção as bordas. Esta distribuição de tensões na placa com fibras apresenta-se na forma radial, ou seja, raios concêntricos, conforme se pode observar do estado de fissuração apresentado na figura 70, que quando comparados com aquele apresentado para a placa sem fibras (figura 71), mostram que a tela bidirecional de arumã, distribui de forma eficiente as tensões atuantes na placa.

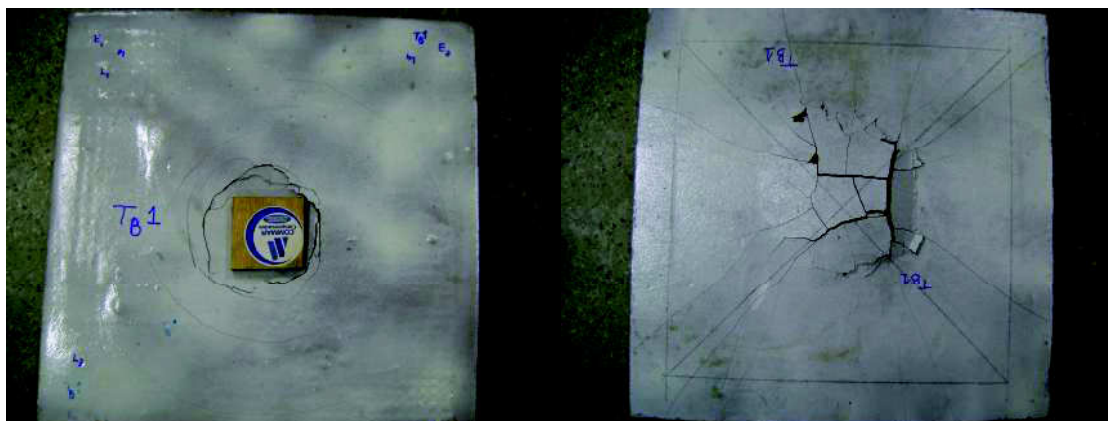


Figura 70. Distribuição das tensões atuantes na placa reforçada com fibra vegetal de *arumã*.

A placa sem reforço da fibra vegetal apresenta diferentemente da outra com reforço de fibra, um comportamento com perdas bruscas de resistência e surgimento de fissuras radiais do centro às extremidades dos bordos da placa, indicando desta forma, um comportamento não dúctil indicado na figura 71.

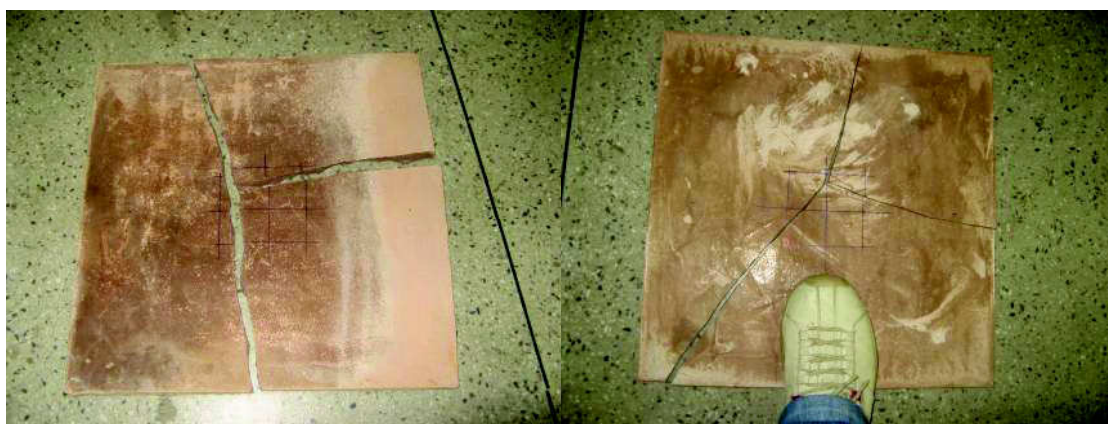


Figura 71. Distribuição das tensões atuantes na placa sem o reforço da fibra vegetal de *arumã*.

Dos gráficos apresentados na figura 72, observa-se o ganho em termos de resistência oferecida pelo reforço com as telas de *arumã* a matriz cimentícia, fazendo com que a placa com material compósito adquirisse um comportamento de um material mais dúctil, tendo em vista que este sem as fibras comporta-se como material essencialmente frágil. Além disso, é notório o deslocamento máximo e a força máxima aplicada conseguidos com a placa com

fibras em relação àqueles obtidos com a placa sem fibras. Portanto, observa-se o quanto foi o ganho obtido com o reforço com telas de *arumã*.

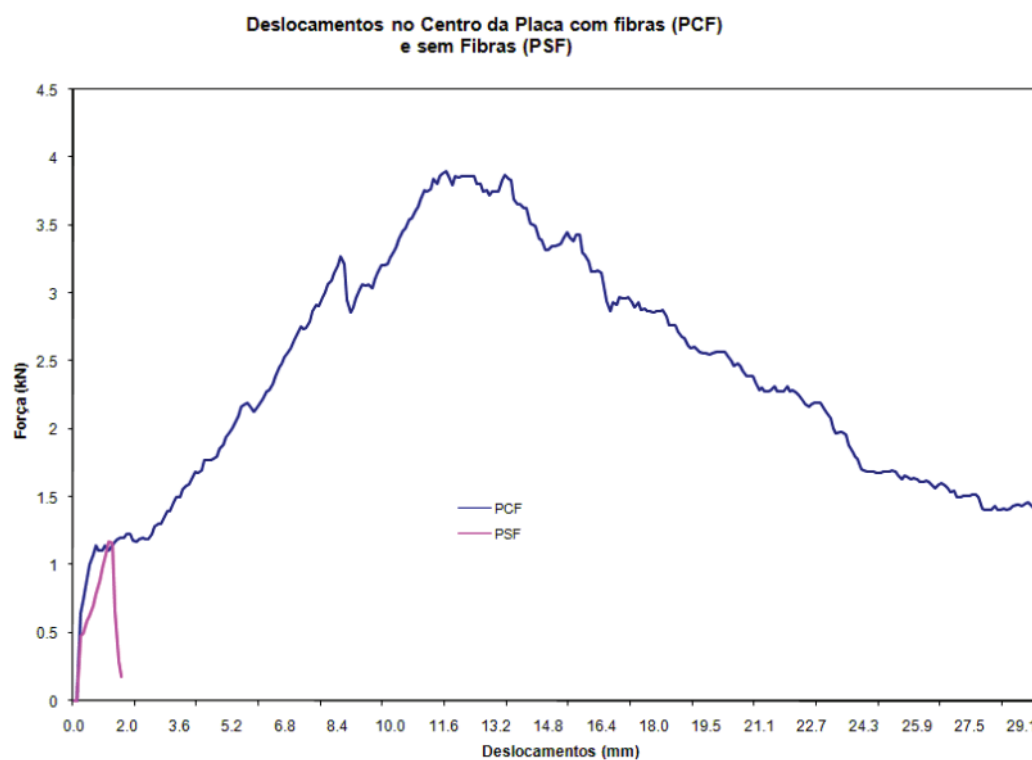


Figura 72. Demonstrativo dos gráficos com os deslocamentos ocorridos no centro das placas com e sem o reforço da fibra vegetal de *arumã*.

5.2.3 Tração Direta

Ao serem executados os ensaios de tração direta dos compósitos com fibra de *arumã*, a despeito de todos os cuidados que foram tomados, o sistema montado não foi eficiente para a realização do ensaio, tendo em vista, que para todas as amostras ensaiadas foram observados deslizamentos nos pontos de fixação destas com o aparato de ensaio (figura 73), comprometendo os resultados finais.

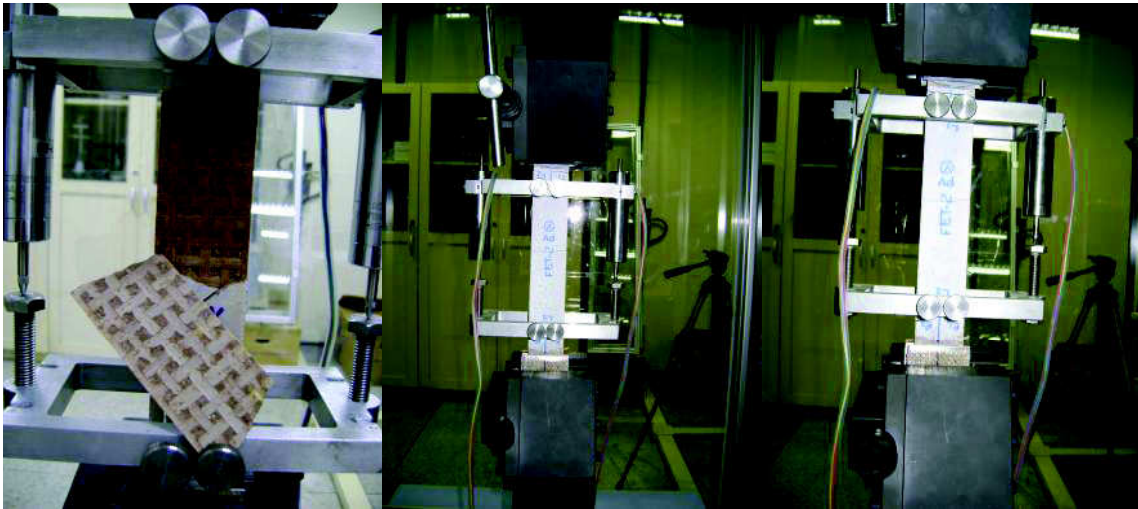


Figura 73. Ensaio de tração direta em placas reforçadas com fibras vegetais de *arumã*.

5.3 Comentários Finais

O estudo deve ser mais investigado mais intensamente em função das diversas discussões desta temática, por existirem vários aspectos que ainda poderão ser analisados, como por exemplo, condições climáticas, estudo do solo, idade e absorção de nutrientes, que não só influenciam a estrutura das fibras, mas também a sua composição química.

Um problema encontrado nas fibras vegetais é sua estrutura porosa, que causa elevada capacidade de absorção de água e inchamento, causando uma redução da aderência entre a fibra e a matriz, sendo esta região fundamental para a determinação das propriedades dos compósitos, pois é através da interface que os esforços atuantes na matriz são transmitidos ao reforço. Métodos químicos e físicos podem ser usados para modificar a fibra e aperfeiçoar a interface. A tensão de aderência da interface fibra/matriz pode ser melhorada por várias operações, dentre as quais destacam-se:

(i) Limpeza da superfície dessas fibras eliminando gorduras e camadas de restos de resinas e graxas;

(ii) Reação das fibras com substâncias que proporcionem às fibras vegetais uma menor capacidade de absorção de água;

(iii) Reação das fibras com substâncias que tornem a superfície das mesmas mais protegidas do meio externo, propiciando uma maior rugosidade para uma melhora na transferência de tensões;

(iv) Um processo de moldagem que com homogeneidade de distribuição das fibras no interior da matriz.

Há pesquisadores que inovaram neste mercado utilizando métodos de modificação das fibras vegetais através de tratamento alcalino, aumentando assim, sua rugosidade e aderência mecânica entre a fibra e a matriz. Pode ser efetuado o tratamento com 0,5% de hidróxido de

cálcio que tende a proporcionar um melhor desempenho mecânico e limpar a superfície das fibras.

Neste trabalho, para reduzir o ataque às fibras vegetais pelos álcalis do cimento portland e pela ação do hidróxido de cálcio (que é originário da hidratação dos silicatos), como já mencionado, utilizou-se metacaulinita na matriz, pela inclusão de materiais pozolânicos, com a substituição parcial do cimento, provocando uma reação pozolânica que consumisse o hidróxido de cálcio. São vários os benefícios agregados as propriedades do compósito com a reação pozolânica, destacando-se: baixa permeabilidade; alta resistência inicial; evita a acomodação das partículas do cimento Portland na interface agregado -matriz. Essas propriedades são necessárias ao compósito reforçado com fibras vegetais, uma vez que, estas possuem a capacidade de absorver água (hidrofílicas), expandindo-se, e no processo de cura, tendem a retrair-se, provocando assim, o aumento da relação água/cimento na região de interface fibra/matriz.

Outro problema encontrado com o uso destas fibras em matrizes cimentícias é relacionado à sua durabilidade ao ser inserida em meios alcalinos. Como alternativas para se evitar a deterioração das fibras vegetais, em consequência da alcalinidade ou da umidade do meio a que estão expostas, observar os diversos procedimentos de aplicação viável. Um desses procedimentos é o desenvolvimento de uma matriz livre de hidróxido de cálcio através da substituição parcial do cimento por pozolanas as quais consomem o hidróxido de cálcio formando o C-S-H.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo sobre a caracterização da fibra vegetal de *arumã* possibilitou adentrarmos em novos caminhos que até então eram desconhecidos, mas que nos transportou a um estágio diferenciado, cujos resultados satisfatórios, os quais ainda deverão ser complementados com outros ensaios, demonstram o potencial de utilização desta fibra. Deve-se procurar o aprimoramento dos métodos dos ensaios, uma vez que a análise desta fibra é um experimento novo, que ainda deverá passar por processos de adaptações na obtenção da matéria-prima, bem como a aquisição de outras técnicas que possibilitem a sua otimização na produção dos compósitos. Isto se deve a forma natural como se apresentam as fibras vegetais de *arumã*, bem como suas propriedades que são bem diferenciadas daquelas apresentadas por outras fibras que estão disponíveis no mercado.

Comparando-se os resultados dos ensaios físicos e mecânicos da fibra de *arumã* com a de sisal, cuja aplicação em compósitos de matriz cimentícia é amplamente utilizada, observou-se que a fibra de *arumã* possui um grande potencial para este tipo de uso.

Além disso, verificou-se que a adição das fibras de *arumã* na matriz cimentícia melhorou o desempenho do compósito adicionando-lhe maior resistência aos esforços de tração na flexão, isto em função do comportamento da fibra, que proporciona uma resistência adicional quando do surgimento de fissuras, distribuindo uniformemente as tensões internas, com conseqüente aumento da ductilidade do material.

Deve-se ressaltar que o módulo de elasticidade e a resistência mecânica são as propriedades mais importantes na definição da capacidade de reforço que a fibra pode proporcionar ao compósito, desta forma, os resultados obtidos com as fibras de *arumã*, considerando estes dois parâmetros, mostram-se muito promissores quando comparados com o sisal, possuindo, portanto, uma potencial viabilidade técnica.

A proposta deste projeto é dar continuidade à pesquisa, tendo como parâmetros linhas de ensaios convencionais e inovadores, que possam conduzir a resultados satisfatórios de aplicação desta fibra na indústria da construção civil, ficando, portanto, a proposta do prosseguimento e conclusão da pesquisa como contribuição científica para uma etapa de doutorado.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa ora apresentada mostrou parcialmente a potencialidade que a fibra de *arumã* pode propiciar a indústria da construção civil, com propriedades equivalentes ou superiores às fibras disponíveis neste mercado.

Para a eventual utilização desta fibra vegetal, há a necessidade de um estudo mais detalhado, com a realização de ensaios que poderão ainda fornecer resultados mais plausíveis no aspecto viabilidade técnica. Novos caminhos ainda precisam ser trilhados, com a investigação por meio dos ensaios da microscopia da fibra vegetal e do compósito, termogravimetria do compósito, absorção de água tanto da fibra como do compósito, infravermelho, açúcares redutores e não-redutores, entre outros. A inovação tecnológica da introdução de fibra natural capacita-a para a indústria da construção civil. Deve-se investigar outras alternativas para o traçado das telas de fibra de *arumã*, bem como analisar fatores de forma que possibilitem um ganho maior de resistência tanto da fibra quanto do compósito. Além disso, estudar métodos de tratamento de superfície que possibilitem uma melhor adesão na interface da fibra com a matriz cimentícia.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO DOS ARTESÃOS DE NOVO AIRÃO; FUNDAÇÃO VITÓRIA AMAZÔNIA (FVA). Fibras vegetais para artesãos - técnicas para a produção de fibra de *arumã*, cipó ambé e tucumã. sd;

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma Brasileira NBR 7215 - Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997;

ASTM – AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS. ASTM D 1107 -56 – Extração em álcool;

ASTM – AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS. ASTM D 1106 -56. Determinação da porcentagem de lignina;

ASTM – AMERICAN SOCIETY TESTING MATERIALS. ASTM D 1105 – Análise de solubilidade em álcool (etílico);

CALISTER, WILLIAM D. Jr. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução . 5ª. Edição. LTC Editora. Rio de Janeiro, 2.000;

CARVALHO, R. Fernandes. Compósitos de Fibras de Sisal para Uso em Reforço de Estruturas de Madeira. Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo, 2.005;

CHAND, N. Tiwary, R. K., ROGHATI, P. K. Bibliography: Resource Structure Properties of Natural Cellulosic Fibres. In: Annotated Bibliography. **Journal of Materials Science**, v.23, n.2, 1988;

CORDEIRO, G. C. Concreto de Alto Desempenho com Metacaulinita . Dissertação de mestrado. Campos dos Goytacazes, 2001. Universidade Estadual do Norte Fluminense, Centro de Ciência e Tecnologia;

CUNHA, M. P. S. Carneiro. Estudo Fitoquímico de *Clarisia Racemosa*. Tese de mestrado em Química Orgânica. Rio de Janeiro, 1990;

DIGITIZELT 1.5.8. Barmann, I. Köln, Deutschland, 2006;

GALE, D.M. “Synthetic fibers in thin-section cement products: a review of the state of the art. In: ACI SP146 Thin Reinforced Concrete Products and Systems, Porto Rico, 1992, Edited by P. Balaguru, Detroit, p 160, 1994 ;

GONÇALVES, J. P., “Desenvolvimento de materiais utilizando argila calcinada como substitutivo parcial do cimento portland”. Seminário de Tese de Doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004;

GOVERNO FEDERAL, Ministério do Meio Ambiente. Projeto Corredores Ecológicos - Novos Cenários para a Conservação da Biodiversidade Brasileira. Brasília -DF, 2000;

HALYARDI & SANCHEZ, Procedimentos e métodos para determinação de teor de celulose. 1975;

HAN, James S.; ROWELL, Jeffrey S. Chapter 5 – CHEMICAL COMPOSITION OF FIBERS, pg 85, Paper and Composites from Agro-based Resources. 1997 by CRC Press, Inc.;

ISAÍÁ, G. Cechella (editor). Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações, vol 2. Editoração SmartSystem Consulting Ltda, 2.007;

JONH, V. M.; NITA, C. “Materiais Pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa”. São Paulo: EPUSP, 2007;

JONES, R. M., “Mechanics of Composite Materials”, McGraw -Hill Company, 1975.

KLOCK, Umberto; MUNIZ, G. I. Bolzon; HERNANDEZ, J. Anzaldo; ANDRADE, A. Sulato. Química da Madeira. Curitiba, 2.005;

LEA, F. M. The Chemistry of Cement and Concrete. Third Edition. Chemical Publishing Company Inc., 1971, 727 p;

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

LIMA, P. R. L., “Análise teórica e experimental de compósitos reforçados com fibras de sisal”. Tese de doutorado, PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004 ;

LOBÃO, M. Silveira; PEREIRA, K. R. Mendes. Tecnologia da Madeira – Propriedades Físicas e Mecânicas da Madeira. Rio Branco-Ac, 2.005;

MASSAZZA, F. Pozzolan Cements. *Cement & Concrete Composites*, v.15, p.185 - 214, 1993;

MEHTA, P. KUMAR. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. Editora IBRACON. São Paulo - SP, 2008;

MELO FILHO, J. A. Desenvolvimento e caracterização de laminados cimentícios reforçados com fibras longas de sisal. Dissertação de mestrado em engenharia civil - PEC/COPPE/UFRJ Rio de Janeiro, 2005;

MELO FILHO, J. A. Desenvolvimento e caracterização de compósitos com fibras longas e curtas de sisal. Qualificação ao doutorado em engenharia civil - PEC/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2009;

MOURA, Marcelo F. S. F. de; MORAIS, Alfredo. B. de; MAGALHÃES, Antônio G. de. *Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Porto-Portugal, 2.005;

NAAMAN, A. E., “Fibre Reinforced for Concret: LookingBack, Looking Ahear,” Ann Arbor, USA, RILEM – 2000. pp 65 – 82;

NAKAZONO, Érika Matosuno. O impacto da extração da fibra de arumã (*ischnosiphon polyphyllus, marantacea*) sobre a população da planta em Anavilhanas, Rio Negro, Amazônia Central. Tese de mestrado em Ciências Biológicas. Manaus/Am. 2006;

NEIRA, D. S. M., “Fibras de sisal (*Agave sisalana*) como isolante térmico de tubulações”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Centro de Tecnologia - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Natal-RN, 2005;

PARDINI, L. Claudio; NETO, F. Levy. *Compósitos Estruturais – Ciência e Tecnologia*. Editora Edgard Blucher, 2.006;

PERSSON, H.; SKARENDAHL, “A. Sisal-fibre concrete for roofing sheets and other purposes”, In: *Appropriate Industrial Technique for Construction and Building Materials. Monographs on appropriate industrial technique*, N.12, 1980, United Nations, 1980;

RODRÍGUEZ-CAMACHO, R. E., URIBE-AFIF R. “Importance of using the natural pozzolans on concrete durability” *Cement and Concrete Research* v. 32, pp. 1851– 1858, 2002;

ROY D. M., ARJUNAN P, SILSBEE M.R., “Effect of silica fume, metakaolin, and lowcalcium fly ash on chemical resistance of concrete”. *Cement and Concrete Research*, v. 31, pp.1809–1813, 2001;

ROSSETTI, J. Paschoal. *Introdução à Economia*. Rio de Janeiro, 1993;

SANTOS, E. F dos. Efeito de agentes de acoplamento em compósitos de polipropileno com fibras de coco. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de química – Programa de pós-graduação em química. Porto Alegre, 2.007;

SILVA, R. Vilarim da. Compósito de Resina Poliuretano Derivada de Óleo de Mamona e Fibras vegetais. Tese de doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. São Carlos, 2.003;

TOLÊDO FILHO, R. D., Natural fibre reinforced mortar composites: experimental characterisation, 1997. Tese de Doutorado em Engenharia - DECPUC-Rio / DEC Imperial College, Rio de Janeiro, 1997.

ANEXOS

ANEXO 1. Resultados dos ensaios de tração em fibras de arumã.

Tabela dos resultados de módulo de elasticidade e tensão última das fibras vegetais de arumã

<i>Arumã branco</i>		<i>Arumã canela</i>		<i>Arumã tupé</i>		<i>Arumã vermelho</i>	
Módulo Elasticidade (GPa)	Tensão Última (MPa)	Módulo Elasticidade (GPa)	Tensão Última (MPa)	Módulo Elasticidade (GPa)	Tensão Última (MPa)	Módulo Elasticidade (GPa)	Tensão Última (MPa)
18,05	374,95	16,65	251,24	14,89	344,17	17,18	350,96
12,35	176,53	14,87	280,46	16,18	350,25	14,03	200,03
15,32	338,25	16,67	324,01	20,89	487,00	11,55	199,44
27,65	559,69	17,10	355,77	17,93	449,81	13,48	167,50
16,67	314,14	14,88	283,24	18,49	455,56	20,33	284,68
11,96	301,06	14,01	316,78	10,01	211,47	15,99	271,39
12,73	269,22	8,54	246,48			24,00	366,11
11,40	267,43	11,59	358,20			17,39	378,68
8,90	186,57	12,51	246,79			6,26(*)	18,25
17,42	412,02	19,14	464,10			16,81	61,60
15,94	420,86	13,55	336,98			15,14	303,20
18,18	371,18	9,91	308,38			13,29	254,16
12,99	309,87	13,71	321,43			13,97	240,78
28,19	654,38	6,78	195,44			17,11	265,66
13,37	272,24	17,38	281,62			14,15	267,28

(*) Resultado invalidado, ocorreu deslizamento da fibra no momento em que foi submetida ao esforço de tração.

ANEXO 2: Seqüência dos ensaios de flexão em 4 pontos – placas bidirecionais.

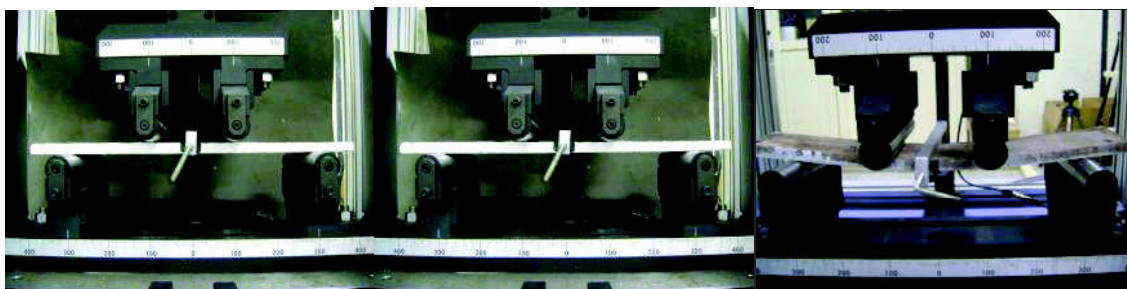


Figura A2a. Ensaio de flexão em quatro pontos – início do carregamento sobre a placa reforçada com telas de fibra vegetal de *arumã*.

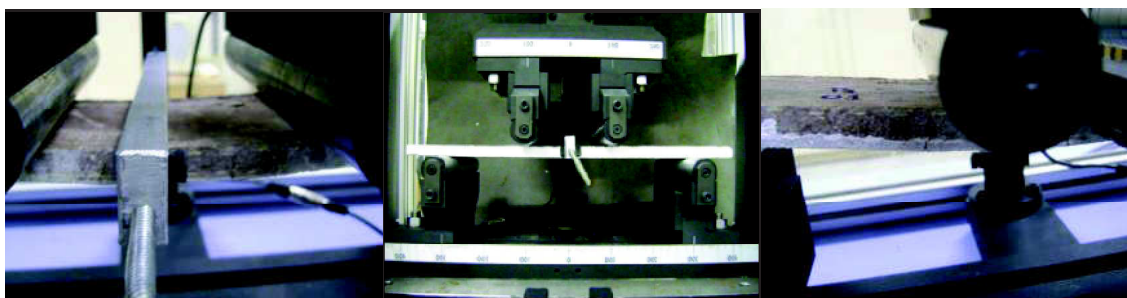


Figura A2b. Surgimento das primeiras fissuras nas placas em função do carregamento recebido .

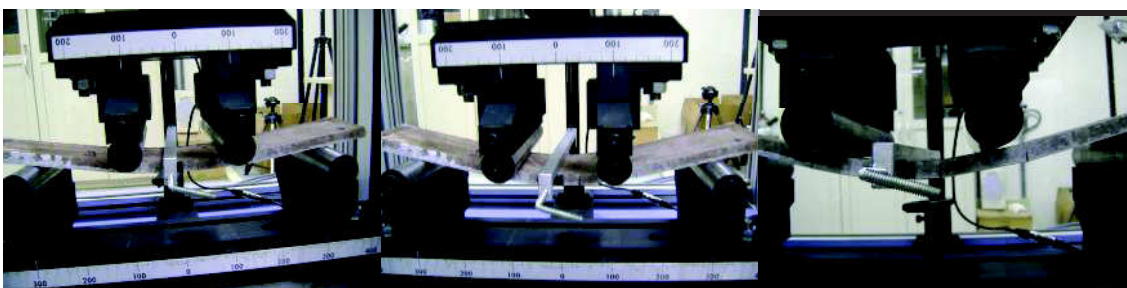


Figura A2c. Grandes deslocamentos indicando a esbeltez da placa com a resistência do elemento de reforço (fibra vegetal de *arumã*).

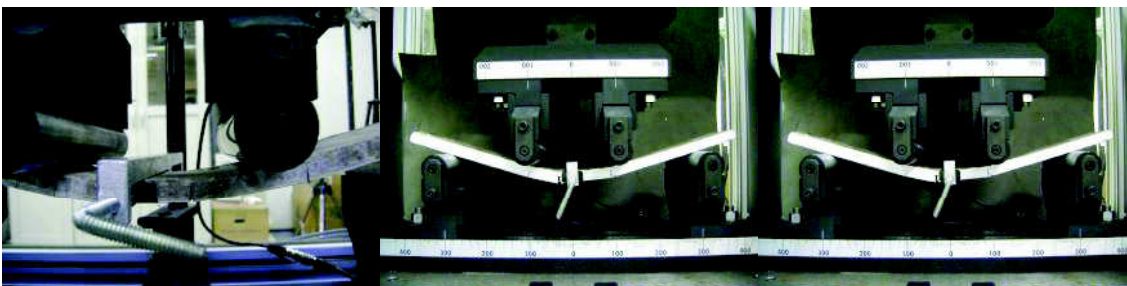


Figura A2d. Ruptura do compósito com a tela da fibra vegetal de *arumã*, devido o colapso do elemento de reforço.



Figura A2e. Mapa das fissuras nas placas após conclusão dos ensaios.

ANEXO 3: Seqüência da confecção da placa de laminado.

Figura A3a. Preparo da argamassa para confecção da placa cimentícia .

Figura A3b. Distribuição da argamassa e das telas da fibra vegetal de *arumã*.

Figura A3c. Prensagem da placa moldada após a última camada depositada.



Figura A3d. Placa moldada, seguida de umedecimento sob coberta, finalizado com a sua cura em câmara úmida.



Figura A3e. Textura da placa após a idade de 28 dias de cura.

ANEXO 4: Seqüência dos ensaios de flexão em placa simplesmente apoiada.

Primeira Etapa: Procedimento do ensaio.



Figura A4a. Após a secagem da pintura da placa iniciou-se o ensaio.



Figura A4b. Vista da superfície inferior da placa, com o surgimento de fissuras em forma radial (placa sem reforço).

Segunda Etapa: Resultado do ensaio com placa sem reforço de fibra vegetal.



Figura A4c. Vista da superfície superior e inferior da placa, com o surgimento de fissuras radiais, atingindo até a extremidade da placa (placa sem reforço).



Figura A4d. Distribuição das fissuras na placa sem reforço..

Terceira Etapa: Resultado do ensaio com placa com reforço de fibra vegetal.



Figura A4e. Vista da superfície inferior da placa, com o surgimento de pequenas fissuras em forma concêntrica, com seus bordos levemente levantados (placa reforçada com fibra vegetal de *arumã*).



Figura A4f. Vista da superfície superior da placa, com fissuras em forma concêntrica, durante o carregamento.



Figura A4g. Vista da superfície inferior e superior da placa, com a formação de acentuado número de fissuras em forma concêntrica, durante o carregamento de cargas, onde o elemento de reforço resiste ao esforço, impedindo a ruptura abrupta da placa.



Figura A4h. No final do ensaio, observa-se o número de fissuras, sem a ocorrência da ruptura total da placa, mantendo a matriz ainda unida pelo elemento de reforço (tela de fibra vegetal de *arumã*).



Figura A4i. Vista inferior e superior da placa, após o término do ensaio, visualizando-se fissuras concêntricas.

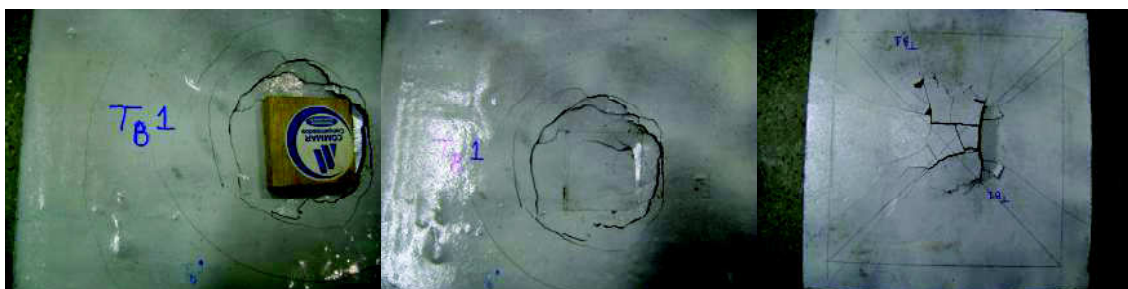


Figura A4j. Detalhe das fissuras concêntricas nas partes superior e inferior da placa, após o término do ensaio.

ANEXO 5: Seqüência dos ensaios termogravimetria.Figura A5a. Emaceração da amostra da fibra vegetal de *arumã* para ensaio de termogravimetria.

Figura A5b. Introdução da amostra no equipamento TA STD Q600 V20.5.

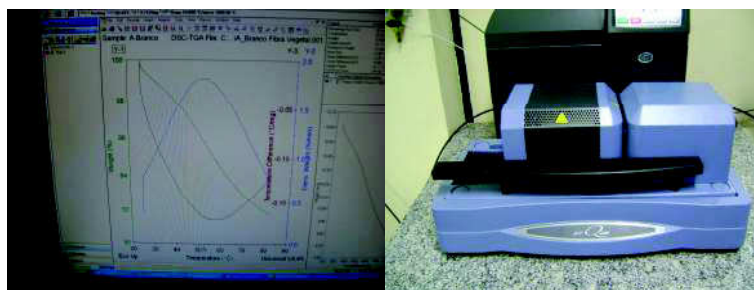


Figura A5c. Leitura do resultado do ensaio, realizada pelo sistema computacional da TA STD Q600 V20.5.

ANEXO 6: Seqüência dos ensaios químicos.

Figura A6a. Equipamento e acessórios utilizados para os ensaios dos extrativos.

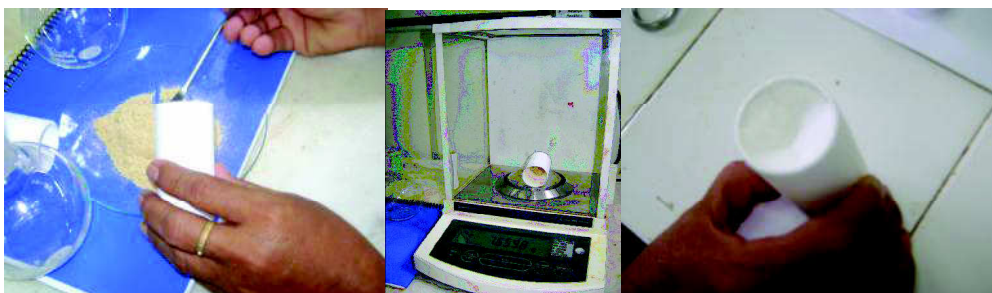
Figura A6b. Pesagem da amostra da fibra vegetal de *arumã* e do cartucho de celulose com a amostra.Figura A6c. Pesagem da fibra vegetal de *arumã* após secagem em estufa e passagem pelo dessecador.



Figura A6d. Dosagem para a extração etanol-tolueno.



Figura A6e. Extração etanol-tolueno.



Figura A6f. Processo de extração com etanol.



Figura A6g. Finalização da extração. Cartucho de celulose com a amostra da fibra vegetal de *arumã*, após o término da extração.

ANEXO 7: Uso da fibra vegetal de *arumã* na região.



Figura A7a – Cestarias, baú e tapetes.
Fonte: www.tokstok.com.br – 17/08/09 (foto: Carolina Riva).



Figura A7b – Povo Baniwa tecendo a fibra de *arumã*.
Fonte: www.tokstok.com.br – 17/08/09 (foto: Carolina Riva).

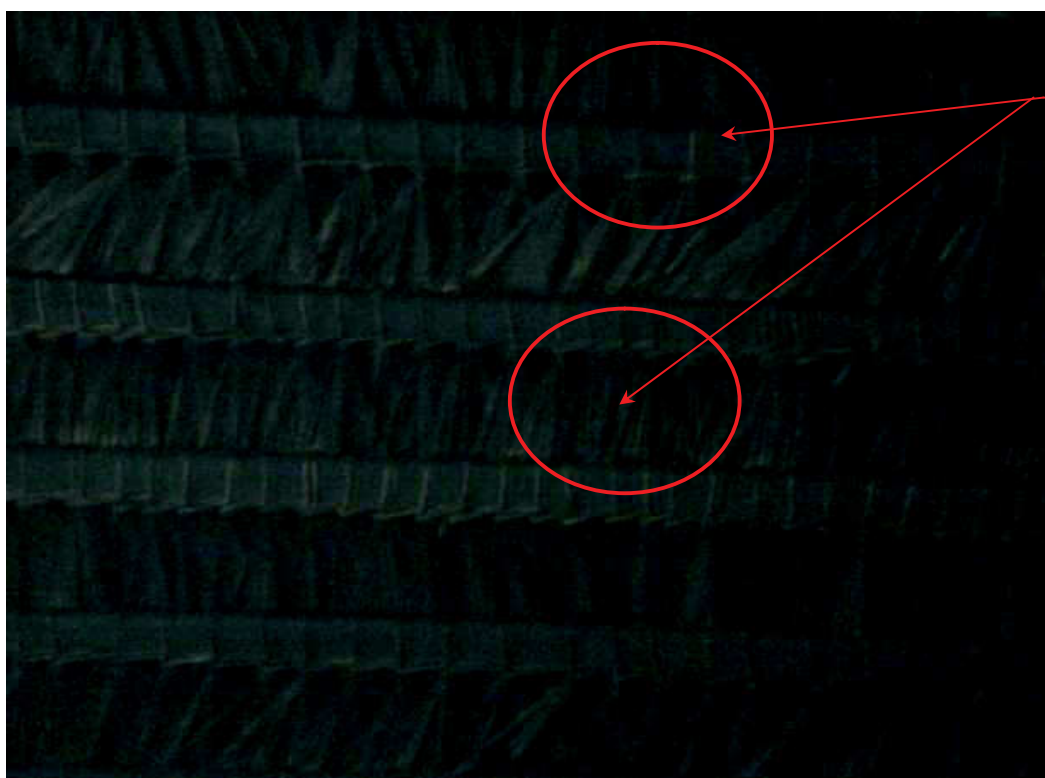


Figura A7c – Tapete e cestos da fibra de *arumã*.
Fonte: www.tokstok.com.br – 17/08/09.



Figura A7d – Uso da fibra de *arumã* em amarrações de coberturas em palhas.

Amarrações
com *arumã*



Amarra
ções
com
arumã

Figura A7e – Detalhe de amarrações de coberturas em palhas com fibra vegetal de *arumã*.



Figura A7f – Cúpula do auditório do Centro Cultural Povos d a Amazônia toda tecida em fibra vegetal de *arumã* – Manaus-AM.

Fonte: www.tokstok.com.br – 170809.

ANEXO 8: Equipe de pesquisadores e servidores envolvidos nesta pesquisa.



Figura A8a – Maria Gorett dos Santos Marques (Mestre PPGEC/UFAM); b) Dr. Basilio Frasco Vianez (membro da banca - INPA), Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos (Orientador – UFAM), Dra. Maria de Jesus Coutinho Varejão (membro da banca – INPA) e Dr. Romildo Dias Toledo Filho (Co-orientador – COPPE/UFRJ).



Figura A8b – Ivana Reis (Secretária do PPGEC/UFAM); Prof. Nilton Campelo e Prof. Ruy Sá (PPGEC/UFAM).



Figura A8c – Prof. Dr. Rubem César R. Souza (Diretor CDEAM/UFAM); Prof. Omar Seye e Prof. Fernando (CDEAM/UFAM).



Figura A8d – Mirian Dayse (Mestranda PPGEC/UFAM), Beatriz Mar (Secretária Nutec/UFAM); Gorett Marques (Mestre PPGEC/UFAM), Jorge Euvaldo (Técnico Lab. FT/UFAM), Prof. Dr. Raimundo Vasconcelos (Orientador) e Vera (Secretária do PPGEC/UFAM); Prof. Dr Kennedy e Prof^a. Dra. Adalena Kennedy (UFAM).



Figura A8e – Esther Souza (Laboratório de Saneamento - UFAM); Manoel Reis (Mateiro).



Figura A8f – Irineide Cruz (Laboratório Química da Madeira - INPA); Clodoaldo (Tec. Lab. COPPE/UFRJ); Cristiane Daliassi (Doutoranda em química CDEAM/UFAM); Jadi Souza Rocha (Mestre/INPA) .