



Cíntia Gama Sales

**Fibra de Curauá como Reforço em Matriz
Cimentícia para Fabricação de Telhas e
Placas de Fibrocimento**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza
Picanço

Belém – Pará – Brasil
2015

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Cíntia Gama Sales

**Fibra de Curauá como Reforço em Matriz Cimentícia para
Fabricação de Telhas e Placas de Fibrocimento**

Dissertação de Mestrado

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço

Belém
Outubro de 2015

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Cíntia Gama Sales.

TÍTULO: Fibra de Curauá como Reforço em Matriz Cimentícia para Fabricação de Telhas e Placas de Fibrocimento.

GRAU: Mestre ANO: 2015

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Cíntia Gama Sales

Rua Kazuma Oyama, nº2577, Novo Estrela.
68743-250 Castanhal – PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Central / UFPA, Belém – PA

Sales, Cíntia Gama.

Fibra de Curauá como Reforço em Matriz Cimentícia para Fabricação de Telhas e Placas de Fibrocimento/ Cíntia Gama Sales. – 2015.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço.

Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2015.

1. Fibra de Curauá. 2. Compósito. 3. Telha 4. Placa.

CDD - XX. ed. XXX.XXXXX

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



Cíntia Gama Sales

Fibra de Curauá como Reforço em Matriz Cimentícia para Fabricação de Telhas e Placas de Fibrocimento

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Prof. Marcelo de Souza Picanço

Orientador

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof.^a Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro

Examinador Interno

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Alcebíades Negrão Macêdo

Examinador Interno

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof.^a Angela Teresa Costa Sales

Examinador Externo

Universidade Federal de Sergipe - UFS

Belém, 26 de outubro de 2015.

A Deus,

A minha avó Perpétua (em memória),

Aos meus pais, Socorro e Marcelo,

Ao meu esposo Gleyson,

Aos meus filhos Valentina e Arthur,

Porque família é tudo.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à DEUS e a nossa de Nazaré, por me dar forças, não deixando eu desistir jamais e por ser presença constante em minha vida.

A minha avó Perpétua Gama (em memória) que sempre esteve ao meu lado me incentivando e acredito que onde estiver está sempre me protegendo.

Aos meus pais Socorro Gama e Marcelo Oliveira, pelo incentivo diário aos meus estudos, pelo apoio constante com meus filhos, pelo amor e carinho que sempre nos trataram e sem os quais eu não teria conseguido finalizar esta pesquisa.

Ao meu esposo Gleyson Sales pelo amor incondicional e pelo grande incentivo e apoio na realização deste sonho.

Aos meus filhos Valentina e Arthur pelo amor, orgulho e alegria que me dão e os quais são a razão da minha vida.

Ao Orientador Marcelo Picanço, pela honra de ter sido sua orientanda, pela simplicidade e generosidade com que passou seus ensinamentos, me despertando para a busca da perfeição e aprimorando meus conhecimentos científicos.

A Professora Luciana Cordeiro pela sua importante contribuição para o enriquecimento do meu trabalho.

A querida Cássia Marinho pela enorme ajuda com os ensaios de laboratório e por ser sempre tão atenciosa e amiga comigo em todos os momentos.

Ao aluno da iniciação científica, João, pela ajuda e apoio com os ensaios.

À Coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, em especial ao Professor Blanco, pela oportunidade de enriquecer meus conhecimentos.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia de Civil pela realização dos ensaios.

Ao meu irmão Mateus Gama pelo apoio em tudo e a minha sobrinha-afilhada Ana Sophia pelo amor e carinho.

Ao meu tio Júnior pelo carinho e porque sei que posso contar com ele.

A amiga Adriana Reis pelos ensinamentos acadêmicos e pela grande amizade.

A minha amiga Patrícia Batista que compartilhou comigo momentos difíceis e importantes nesta trajetória de Mestrado.

A todas as pessoas que contribuíram de maneira direta ou indireta para que eu conseguisse concluir mais essa etapa importante na minha vida, o meu muito obrigada a todos!

“Deus dá as batalhas mais difíceis
aos seus melhores soldados.”
Papa Francisco

Resumo

As fibras naturais, como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios, têm despertado grande interesse nos países em desenvolvimento, por causa de seu baixo custo, disponibilidade, economia de energia. O emprego dos compósitos em placas, telhas de cobertura e componentes pré-fabricados, pode representar significativa contribuição para o rápido crescimento da infraestrutura de países em desenvolvimento. Dentre as fibras naturais, a fibra de curauá, *Ananás erectifolius*, vem ganhando destaque, devido a sua elevada resistência à tração. O principal objetivo deste trabalho é a utilização da fibra de curauá como reforço da matriz com cimento Portland, para o emprego em elementos estruturais como placas e telhas. Para este estudo, foram realizados ensaios de compressão e módulo de elasticidade em misturas com fração volumétrica de 1% e 2,5% e comprimento de fibra de 1 e 2 cm e na argamassa plena sem adição de fibras. A mistura que apresentou melhor resultado em termos de trabalhabilidade, foi a com fração volumétrica de 1% e comprimento de fibra de 1cm, sendo escolhida para a fabricação das telhas e placas de fibrocimento. Para a avaliação dos compósitos, foi realizado ensaio de resistência à tração na flexão nas placas e telhas com fibras de curauá e sem fibras, para comparação. Os resultados comprovaram a influência das fibras na capacidade de deformação dos compósitos, aumentando em 46% a resistência à tração na flexão da placa com fibra de curauá, em relação à placa sem fibra, e aumentou a carga de ruptura da telha em 49%, com relação a telha sem fibra.

Palavras-chave: Fibra de Curauá, compósito, telha, placa.

Abstract

Natural fibers such as reinforcing fragile matrices based on cementitious materials, have attracted great interest in developing countries, because of its low cost, availability, energy saving. The use of composites in plates, roof tiles and prefabricated components, can make a significant contribution to the rapid growth of infrastructure in developing countries. Among the natural fibers, curauá fiber, *Ananas erectifolius*, has gained prominence because of its high tensile strength. The main objective of this work is the use of curauá fiber as reinforcement matrix with Portland cement, for use in structural elements such as slabs and tiles. For this study, testing and compression modulus of elasticity in mixtures with a volume fraction of 1% and 2.5% and fiber length of 1 cm and 2 cm, and full mortar without fibers were performed. The mixture showed the best results in terms of workability, was the volumetric fraction of 1% and 1 cm fiber length, was chosen for the manufacture of cement tiles and plates. For the evaluation of composites was conducted tensile strength test in bending the plates and tiles with curauá fibers and no fibers, for comparison. The results confirmed the influence of the fibers on the composite deformation capacity increasing by 46% the tensile strength in plate bending with curauá fiber relative to the plate without fiber, and increased tile breaking load of 49% with respect to tile without fiber.

Keywords: Curauá fiber, composite, tile, plate

Sumário

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Objetivo geral	20
1.2 Objetivos específicos	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Compósitos	22
2.1.1 Compósitos reforçados com fibras	22
2.1.2 Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais	25
2.1.3 Microestrutura x desempenho dos compósitos com fibras vegetais	28
2.1.3.1 Zona de transição	28
2.1.4 Comportamento mecânico dos compósitos com fibras vegetais	29
2.1.4.1 Comportamento sob compressão	30
2.1.4.2 Comportamento sob flexão	32
2.1.4.3 Comportamento sob tração	34
2.1.5 Durabilidade de compósitos com fibras vegetais	35
2.2 Fibras vegetais	37
2.2.1 Microestrutura das fibras vegetais	38
2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais	40
2.2.3 Fibras vegetais no Brasil	42
2.2.3.1 Fibras de Piaçava	42
2.2.3.2 Fibras de Sisal	43
2.2.3.3 Fibras de Juta	44
2.2.3.4 Fibras de Malva	45
2.2.3.5 Fibras de Açáí	46
2.2.3.6 Fibra de Curauá	47
2.2.3.6.1 A planta, características físicas e local de ocorrências	47
2.2.3.6.2 O uso da fibra de curauá	49
2.2.3.6.3 Características químicas e mecânicas da fibra de curauá	50
3 MATERIAS E MÉTODOS	52
3.1 Coleta da fibra vegetal Curauá	52
3.2 Caracterização dos componentes do compósito cimentício	52
3.2.1 Cimento	52

3.2.2 Areia	53
3.2.3 Água	54
3.2.4 Fibra de curauá	54
3.2.4.1 Determinação das propriedades físicas da fibra de curauá	54
3.2.4.2 Determinação da resistência à tração da fibra de curauá	56
3.3 Produção das placas e telhas	57
3.3.1 Estudo de dosagem e produção dos corpos de prova	57
3.3.2 Propriedades mecânicas das misturas	58
3.3.2.1 Ensaio à compressão simples e módulo de elasticidade	58
3.3.3 Sistematização de produção	59
3.3.3.1 Moldagem das placas	59
3.3.3.2 Moldagem das telhas	60
3.3.4 Propriedades mecânicas das placas e telhas	62
3.3.4.1 Ensaio de resistência à tração na flexão em placas de fibrocimento	62
3.3.4.2 Ensaio de resistência à tração na flexão em telhas de fibrocimento	64
3.3.5 Microscopia dos compósitos com fibra de curauá	65
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1 Caracterização do cimento e agregado miúdo	66
4.2 Caracterização da fibra de curauá	67
4.3 Ensaio de compressão e módulo de elasticidade das misturas	69
4.4 Ensaio de resistência à tração na flexão nas placas	70
4.5 Ensaio de resistência à tração na flexão nas telhas	72
4.6 Análise da microestrutura do compósito com fibras de curauá	74
5 CONCLUSÕES	75
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	75
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
Apêndice	85

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 1 – Características físicas e mecânicas das fibras vegetais, de amianto, polipropileno e celulose.	28
Tabela 2 – Valores de ensaios de compressão de autores diferentes.	31
Tabela 3 – Valores de ensaios de flexão.	32
Tabela 4 – Carga de ruptura à flexão das pastas. Fonte: Carneiro, 2010.	34
Tabela 5 – Comportamento de compósitos reforçados com fibras vegetais à tração direta. Fonte: Tolêdo Filho, 1997.	35
Tabela 6 – Propriedades físicas das fibras naturais vegetais.	40
Tabela 7 – Propriedades mecânicas das fibras naturais vegetais.	41
Tabela 8 – Composição química em termos de óxidos do CPIV. Fonte: Fabricante	53
Tabela 9 – Programa experimental das misturas.	58
Tabela 10 – Ensaio de Resistência à compressão e módulo de elasticidade – Programa experimental das misturas.	59
Tabela 11 – Programa experimental dos ensaios.	60
Tabela 12 – Granulometria.	66
Tabela 13 – Dados obtidos em laboratório no ensaio de absorção.	68
Tabela 14 – Valores restritos a fibra de curauá.	69
Tabela 15 – Resistência à compressão axial e módulo de elasticidade.	69
Tabela 16 – Ensaio de tração à flexão na placa.	71
Tabela 20 – Ensaio de tração à flexão na telha.	72

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1 – Esquema de classificação dos compósitos. Fonte: Callister, 2002.	22
Figura 2 – Compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas. Fonte: Callister, 2002.	23
Figura 3 – Transmissão carga matriz-fibra. Fonte: Callister, 2002.	24
Figura 4 – Energia específica do compósito em diversas idades. Relação água/cimento=0,38, intervalo de confiança = 95%. Ensaio de tração na flexão. Fonte: Rilem, 1984.	30
Figura 5 – Diagrama típico carga x deslocamento do corpo de prova sem reforço. Fonte: Ventura, 2006.	33
Figura 6 – Diagrama típico carga x deslocamento do corpo de prova com reforço. Fonte: Ventura, 2006.	34
Figura 7 – Classificação das fibras vegetais. Fonte: Adaptado de Young, 1995.	38
Figura 8 – Estrutura de um filamento individual (fibra vegetal). Fonte: Adaptado de Silva et al, 2009.	39
Figura 9 – (a) Planta piaçava; (b) fibra piaçava. Fonte: Adaptado CONAB, 2012.	43
Figura 10 – (a) Planta do sisal; (b) fibra de sisal. Fonte: Adaptado Milanese, 2008.	44
Figura 11 – (a) Planta de juta; (b) fibra de juta. Fonte: Adaptado Quirino, 2010.	45
Figura 12 – (a) Planta de malva; (b) fibra de malva. Fonte: Adaptado Fraxe, 2007.	45
Figura 13 – (a) Açaizeiro; (b) fibra de açaí. (c) caroço de açaí. Fonte: Adaptado Quirino, 2010.	46
Figura 14 – Fibra de curauá branco e roxo, respectivamente. Fonte: Costa, Lameira e Yoshino, 2002.	47
Figura 15 – Plantação de curauá. Fonte: CEAPAC, 2013.	48
Figura 16 – Planta curauá com seu plantio adensado (a) e comprimento aproximado (b). Fonte: Picanço, 2005.	48
Figura 17 – Processo de extração da fibra de curauá. Fonte: Bicalti, 2015.	49
Figura 18 – Tapete feito com fibra de curauá. Fonte: CEAPAC, 2013.	50
Figura 19 – Superfície fraturada e área da seção transversal da fibra de curauá. Fonte: Gomes et al, 2007.	51
Figura 20 – Ponto de coleta da fibra de curauá. Fonte: Google Maps.	52

Figura 21 – Fibra cortada e proveta com água. Fonte: Própria autora.	55
Figura 22 – Fibras em imersão na água. Fonte: Própria autora.	55
Figura 23 – Esquema do ensaio de tração na fibra.	56
Figura 24 – (a) Ensaio à compressão simples, (b) ensaio de módulo de elasticidade. Fonte: Própria autora.	59
Figura 25 – Placas cimentícias moldadas em processo de cura. Fonte: Própria autora.	60
Figura 26 – Processo de produção das telhas.	61
Figura 27 – Forma para moldagem da telha. Fonte: Própria autora.	61
Figura 28 – Telha já moldada em processo de cura. Fonte: Própria autora.	62
Figura 29 – Disposição da placa para o ensaio. Fonte: NBR 15498 (ABNT, 2014).	63
Figura 30 – Disposição da telha para o ensaio. Fonte: NBR 7581-2 (ABNT, 2012).	64
Figura 31 – Curva granulométrica da areia. Fonte: Própria autora.	67
Figura 32 – Gráfico Tempo x Absorção de água da fibra de curauá. Fonte: Própria autora.	68
Figura 33 – Gráfico do diagrama Tensão x Deformação da fibra de curauá. Fonte: Própria autora.	68
Figura 34 – Gráfico comparativo das resistências à compressão. Fonte: Própria autora.	70
Figura 35 – Gráfico comparativo dos módulos de elasticidade. Fonte: Própria autora.	70
Figura 36 – Ensaio de tração à flexão aos 28 dias. Fonte: Própria autora.	71
Figura 37 – Gráfico do Ensaio de tração à flexão aos 28 dias. Fonte: Própria autora.	73
Figura 38 – Ponte fibra-matriz após o ensaio. Fonte: Própria autora.	73
Figura 39 a-d – Microscopia do compósito após o ensaio de flexão. Fonte: Própria autora.	74

Lista de Siglas

Símbolo	Significado
<i>ABCP</i>	Associação Brasileira de Cimento Portland
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>PUC</i>	Pontifícia Universidade Católica
<i>UFPA</i>	Universidade Federal do Pará

Lista de Abreviaturas

Símbolo	Significado
μm	micrômetro
C6 H12 O6	glicose
ϕ	diâmetro
mm	milímetro
H	teor de umidade
μ	massa específica
Kn	kilonewton
m^3	metro cúbico
MPa	mega pascal
E	módulo de elasticidade
GPa	giga pascal
cm	centímetro
m	metro
kg	kilograma
CO_2	gás carbônico
$CPIV$	cimento portland pozolânico
MF	módulo de finura
a/c	relação água/cimento
lc	comprimento crítico das fibras
σ_c	resistência teórica dos compósitos reforçados por fibras
$\mathcal{E}c$	módulo de elasticidade teórico dos compósitos reforçados por fibras
kJ	kilo joule
m^2	metro quadrado
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima
δ	módulo de ruptura máximo
A	absorção de água pelas fibras
kgf	kilograma força
V_f	fração volumétrica de fibras
F_t	resistência à tração por compressão diametral (MPa)

<i>Rf</i>	resistência à tração na flexão
<i>Pc</i>	carga de ruptura à flexão
<i>ml</i>	mililitro
<i>Pest</i>	peso seco em estufa
<i>Pum</i>	peso úmido
<i>I abs</i>	índice de absorção
<i>CV</i>	coeficiente volumétrico

1 INTRODUÇÃO

As constantes e crescentes transformações ocorridas nos diversos segmentos da economia mundial levam à busca de conhecimento, bem como a busca do aprimoramento em atividades relacionadas com as diversas funções do mercado de trabalho, sempre com o objetivo de se alcançar lucros, desempenho adequado e promovendo o uso racional de materiais e insumos, e, conseqüentemente, garantindo o desenvolvimento sustentável.

Juntamente com essa concepção, começa a se formar o questionamento do estilo de desenvolvimento adotado, que é ecologicamente predatório na utilização dos recursos naturais. Contudo, o desenvolvimento industrial, associado ao crescente vício de consumo, à obsessão pelos combustíveis fósseis, tais como petróleo, carvão e gás natural, e o desejo massificado pelo lucro a curto prazo, causam uma certa insensibilidade a alternativas mais sustentáveis.

A construção civil transforma grande parte dos recursos naturais extraídos no planeta, sendo a segunda indústria responsável pela emissão de dióxido de carbono. Dessa forma, há a necessidade do desenvolvimento de materiais alternativos como um novo caminho para a sustentabilidade. Felizmente, verifica-se que gradualmente vai se fomentando a procura desses tipos de materiais e maior é a tendência dos pesquisadores de estimular a busca de novas matérias-primas que sejam provenientes de fontes renováveis e menos poluentes, seja porque está surgindo uma mudança de mentalidade da sociedade, seja por uma questão de modismo ou mesmo pela simples necessidade de nova alternativa.

O custo dos materiais de construção tradicionais é bastante elevado no Brasil, o que pode ser explicado pelo alto consumo de energia e transporte. Dessa maneira, nos últimos anos, o estudo de novos materiais com bom desempenho e baixo custo tem levado à utilização de fibras vegetais em substituição às fibras sintéticas, normalmente empregadas como reforço em compósitos. Os países de clima tropical, como o Brasil, apresentam abundância e diversidade de cultivos vegetais fornecedores de fibras, o que possibilita suas aplicações em elementos da indústria da construção civil, melhorando características físicas e mecânicas.

As fibras naturais, como reforço de matrizes frágeis à base de materiais cimentícios, têm despertado grande interesse nos países em desenvolvimento, por causa de seu baixo custo, disponibilidade, economia de energia e também no que se refere às questões ambientais. São provenientes de plantas nativas que, quando adicionadas em componentes construtivos, favorecem a leveza do material, além de melhorar as propriedades mecânicas

destes componentes. Segundo Swamy (1990), o emprego dos compósitos em placas, telhas de cobertura e componentes pré-fabricados pode representar significativa contribuição para o rápido crescimento da infra-estrutura desses países.

O curauá, cujo nome científico é *Ananás erectifolius*, é bem popular no oeste do estado do Pará, a fibra foi estudada por Picanço e Ghavami (2008), que, através dos estudos das propriedades mecânicas, provaram ser uma fibra propícia para o reforço da matriz cimentícia. Seu uso não traz insalubridade, substituindo fibras como as de amianto, que são prejudiciais a saúde e tem seu processo produtivo como um agente agressor para o meio ambiente.

O crescente interesse pelas fibras lignocelulósicas se deve, principalmente, por ser uma produção de baixo custo e que não requer equipamentos sofisticados, apresentando-se também condições de trabalho mais seguras em relação às fibras sintéticas. O aspecto mais interessante em relação às fibras naturais é o seu impacto ambiental positivo (SARTORI, 2010).

A fibra de curauá apresenta menores valores de densidade e diâmetro e maior valor de tensão de tração na ruptura. O que indica que a fibra de curauá proporcionará um maior reforço, desde que a interação interfacial seja adequada, aos compósitos (Spinacé et al, 2009).

O uso da fibra pode baratear o processo produtivo de placas de fibrocimento, que tem uma ampla aplicação em diversos setores e ainda pode favorecer programas de construção de casas populares, se tornando parte de uma solução para o problema de moradias.

As telhas de fibrocimento oferecem soluções reais para a Engenharia Civil, proporcionando ótimos resultados estético, técnico e econômico. Porém, ela apresenta desvantagens, em relação ao custo quando comparado às telhas convencionais e também podem não oferecer uma grande resistência para suportar o peso de uma ou mais pessoas.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo a utilização da fibra de curauá como reforço da matriz com cimento Portland, para o emprego em elementos estruturais como placas e telhas.

1.2 Objetivos específicos

Para se alcançar o objetivo geral foram estabelecidos alguns objetivos específicos:

- Fazer um estudo de dosagem com algumas frações volumétricas para verificar a trabalhabilidade.

- Verificar através de ensaios mecânicos o desempenho das misturas.
- Avaliar a melhoria do desempenho mecânico das placas e telhas, causada pela inserção das fibras de curauá, na argamassa de cimento, através da comparação entre as características dos compósitos com essas fibras e da argamassa sem reforço.

Esse trabalho foi dividido em cinco capítulos: Introdução, Revisão bibliográfica, Materiais e métodos, Resultados e discussões e Conclusão. Na Revisão bibliográfica estão descritos os princípios básicos que nortearam esse estudo. É feita uma coletânea de dados existentes na literatura científica sobre as fibras vegetais e sua aplicação na fabricação de compósitos cimentícios.

No capítulo Materiais e métodos estão descritos os materiais utilizados, os ensaios de determinação das propriedades físicas e mecânicas das fibras, método de moldagem dos corpos-de-prova e ensaios de determinação das propriedades mecânicas nos compósitos (ensaio à compressão e flexão), além do estudo através de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nos compósitos com fibras de curauá.

Nos Resultados e discussões, os dados alcançados para os materiais utilizados nesse trabalho são tratados e é feita a comparação entre esses e os resultados de trabalhos anteriores. O que pôde ser deduzido dessa análise foi compilado no capítulo Conclusão, juntamente com as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Compósitos

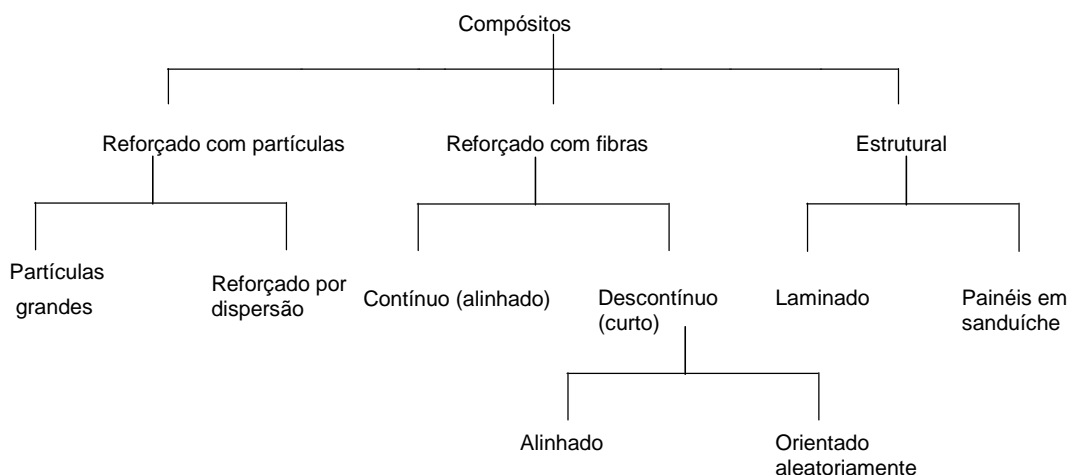
De forma simplificada, pode-se dizer que materiais compósitos são aqueles constituídos pela combinação de dois ou mais materiais, que após a mistura ainda podem ser perfeitamente identificados macroscopicamente em sua massa, sendo que as propriedades individuais destes materiais quando unificados, resultam numa melhor combinação de propriedades.

As propriedades dos compósitos são, portanto, funções das propriedades das fases constituintes, das suas quantidades relativas, e da geometria da fase dispersa, entendendo-se por geometria da fase dispersa, o formato, o tamanho, a distribuição e a orientação de suas partículas.

Callister (2002) propõe o seguinte esquema de classificação para os vários tipos de compósitos:

FIGURA 1 – Esquema de classificação dos compósitos

Fonte: Callister, 2002, p.360



2.1.1 Compósitos reforçados com fibras

Para os compósitos reforçados com fibras, a fase dispersa tem geometria com uma razão alta entre comprimento-diâmetro. Esta relação, conhecida como coeficiente de forma, é tomada para definir como fibras curtas aquelas cujo valor situa-se abaixo de 100. As fibras

utilizadas em compósitos influem nas suas propriedades, basicamente resistência e dureza, em função de:

- comprimento da fibra (magnitude da ligação interfacial entre a fibra e a matriz)

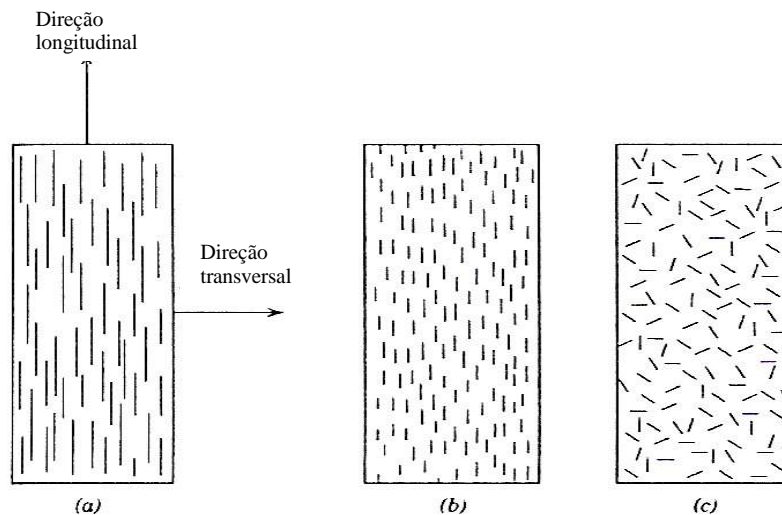
- orientação e concentração das fibras quando se apresentam
 - alinhadas e contínuas

 - alinhadas e descontínuas

 - aleatórias e descontínuas

Fibras alinhadas e de maior comprimento tendem a apresentar um melhor conjunto de propriedades. As possíveis orientações e concentrações das fibras, quando utilizadas como fase dispersa em um compósito, são ilustradas na Figura 2.

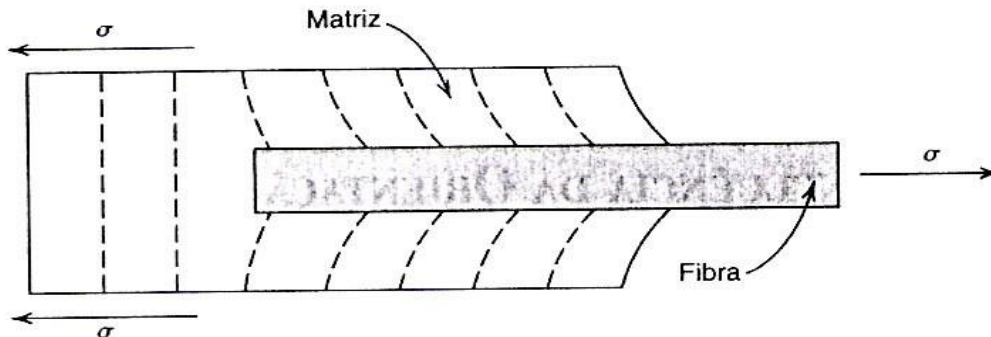
FIGURA 2 - Compósitos reforçados com fibras (a) contínuas e alinhadas, (b) descontínuas e alinhadas, e (c) descontínuas e aleatoriamente orientadas
Fonte: Callister, 2002, p.365



Os compósitos reforçados com fibras não dependem somente das propriedades das fibras e da matriz, mas também do grau de interação entre as fases, matriz/fibra, que irá definir o grau de transmissão da carga aplicada da matriz para a fibra. A magnitude da ligação interfacial entre as fases fibra e matriz é importante para a extensão dessa transmissão de

carga. Com uma tensão aplicada, essa ligação fibra-matriz cessa nas extremidades da fibra, produzindo um padrão de deformação da matriz como está mostrado esquematicamente na Figura 3, (CALLISTER, 2007).

FIGURA 3 – Transmissão carga matriz – fibra
 Fonte: Callister, 2002, p. 363



Para projetar-se, com padrões de Engenharia, compósitos reforçados com fibras otimizando-se suas propriedades, faz-se necessário avaliar alguns parâmetros como o comprimento crítico das fibras e a resistência da interface fibra/matriz (HULL e CLYNE, 1996).

É necessário um comprimento crítico de fibra para um aumento efetivo na resistência e na rigidez de um material compósito. Esse comprimento crítico depende do diâmetro da fibra (d), e de sua resistência. Depende também da resistência da ligação fibra-matriz. O diâmetro crítico l_c , pode ser calculado através da Equação 1.

$$l_c = \frac{\sigma_f * d}{2\tau_c}$$

Eq.1 – Comprimento crítico das fibras

Onde: d é o diâmetro da fibra, σ é o limite de resistência à tração da fibra, τ é resistência ao cisalhamento da ligação fibra/matriz.

Os compósitos cujas fibras possuem comprimento muito maior que comprimento crítico aproximadamente $15l_c$ são denominadas fibras contínuas; as fibras descontínuas ou curtas possuem comprimentos menores do que este. Para fibras descontínuas com

comprimentos significativamente menores do que o comprimento crítico, a matriz se deforma ao redor da fibra tal que não existe efetivamente qualquer transferência de tensão e há apenas um pequeno reforço devido à fibra. Esses correspondem aos compósitos particulados. Para que se desenvolva uma melhoria significativa na resistência do compósito, as fibras devem ser contínuas, através do padrão de deformação na matriz que está envolvendo uma fibra submetida a uma carga (CALLISTER, 2007), uma vez que os compósitos foram constituídos apenas das fases fibra e matriz, contínuas e alinhadas, é possível calcular a sua resistência σ_c , e o módulo de elasticidade E_c , para a direção de alinhamento das fibras. As Equações 2 e 3, relacionam estas mesmas propriedades com as características das fibras e da matriz.

$$\sigma_c = \sigma_M \cdot V_M + \sigma_f \cdot V_f$$

Eq. 2 – Resistência teórica dos compósitos reforçados por fibras

$$E_c = E_M \cdot V_M + E_f \cdot V_f$$

Eq. 3 – Módulo de elasticidade teórico dos compósitos reforçados por fibras

Onde: σ é resistência, E é o módulo de elasticidade, V é a fração volumétrica, (CALLISTER, 2007).

Quando se usa fibras contínuas com alinhamento preferencial, o compósito assume um caráter direcional, (anisotropia). Desta maneira o material deverá ser utilizado de modo que a força aplicada seja paralela ao sentido da fibra, pois esse será o sentido (sentido longitudinal), de maior resistência do compósito. No entanto, na prática, a maioria das estruturas está sujeita a cargas complexas, logo necessitam do uso de fibras orientadas em diversos sentidos.

2.1.2 Compósitos cimentícios reforçados com fibras vegetais

O estudo sistemático de fibras com finalidade de reforço de matrizes começou na Inglaterra em 1970. No Brasil, a pesquisa pioneira coube ao Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CEPED), Camaçari, Bahia, com início em 1980.

O uso das fibras vegetais como reforço de matrizes com aglomerantes minerais vem desde o Renascimento, sendo conhecido há décadas, porém seu emprego em escala industrial não é significativo no Brasil, mesmo com grande número de pesquisas apontando sua viabilidade, sendo uma das causas os custos para adaptação do processo produtivo. A estimativa da produção mundial de compósitos cimentícios com reforço de fibras vegetais, é de 1,4 milhões de toneladas ao ano, produção essa localizada, em grande parte, nos EUA, Europa, Oceania, Ásia e África do Sul (BERALDO, CHEN e AZZINI, 2003; SAVASTANO Jr., 2000).

O emprego vantajoso de fibras vegetais depende de suas propriedades estruturais e mecânicas, que são geralmente influenciadas pelo local de origem, condições climáticas, idade das plantas e dos métodos de extração que são usados (KABIR, LAU e CARDONA, 2012).

As fibras vegetais empregadas como reforço dos compósitos devem ser facilmente dispersas na mistura, ter boas propriedades mecânicas e possuir uma configuração geométrica apropriada (WANG, WU e LI, 2000).

O uso de fibras vegetais, como reforço, tem a possibilidade de proporcionar às matrizes cimentícias maior resistência causada por maior absorção de energia frente a esforços dinâmicos, possibilidade de trabalho no estágio pós-fissurado, no qual seu comportamento é alterado, ao invés de romper subitamente após o início da fissuração da matriz. Pode apresentar uma deformação plástica considerável, tornando-se um material adequado para a construção civil (SOARES, 2012; SILVA, GHAVAMI e ALMEIDA, 2004; BERALDO e VIEIRA, 2003).

A finalidade do emprego de fibras vegetais é melhorar as propriedades de um material de construção, basicamente as mecânicas. A grande vantagem da fibra como reforço de um material frágil é o comportamento do material compósito após rompimento, a tenacidade e a resistência à tração que as fibras vegetais proporcionam. Elas diminuem a fissuração da matriz e viabilizam esses compósitos como materiais de construção (AGOPYAN, SAVASTANO Jr. e JHON, 2005; LOPES, 2010).

A adição de fibras vegetais em argamassas e concretos tem como finalidade melhorar as propriedades desses materiais, quando submetidos a esforços mecânicos, entretanto deve haver estabilidade e aderência das fibras no interior da matriz cimentícia para que seja garantida a durabilidade desses compósitos (BETIOLI, 2003).

A aderência fibra /matriz em compósitos cimentícios é conseguida através do melhor desempenho na zona de transição, fazendo com que as fases da fibra e da matriz trabalhem em conjunto, sendo que a melhor adesão se consegue com a diminuição da porosidade e pela menor concentração de cristais de hidróxido de cálcio nas proximidades da fibra (SAVASTANO Jr., 2000).

O comportamento de compósitos reforçados com fibras vegetais depende, geralmente, da relação entre a fibra e a matriz e a capacidade de transferência de tensão da matriz para a fibra, sendo que a eficiência dessa transferência tem um papel importante na determinação das propriedades mecânicas do composto (FERRAZ, 2011).

Apesar das já citadas vantagens obtidas com a adição do reforço fibroso, em termos de capacidade de deformação, observa-se que tais benefícios vêm acompanhados por diminuição na resistência à compressão. Contudo, em aplicações voltadas para a produção de componentes construtivos, principalmente para habitação popular, os elementos não são comumente solicitados por consideráveis cargas de compressão, sendo tais desvantagens plenamente compensadas pelo acréscimo da capacidade de absorção de energia do compósito, o que o torna mais resistente a impactos.

Nos ensaios de trabalhabilidade realizados por Tolêdo Filho (1997), com compósitos cimentícios com fração volumétrica de fibras vegetais entre 2% e 3%, foi observada uma trabalhabilidade entre média e alta. No entanto, foi mostrado que o aumento na fração volumétrica de 2% para 3% foi suficiente para reduzir a trabalhabilidade em 70%. Logo, frações volumétricas maiores não são recomendadas quando se pretende fazer compósitos com fibras vegetais em matriz cimentícia sem utilização de plastificantes.

A Tabela 1 apresenta uma compilação realizada por Savastano Jr. (2000) das características físicas e mecânicas das fibras vegetais já utilizadas com reforço de matrizes à base de cimento, em comparação com os reforçados com fibras de amianto crisotila e polipropileno.

Tabela 1 – Características físicas e mecânicas das fibras vegetais, de amianto, polipropileno e celulose.

Fibras	Propriedades				
	Massa específica (kg/m ³)	Absorção máxima (%)	Alongamento na ruptura (%)	Resistência à tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
Coco	1177	93,8	23,9 a 51,4	95 a 118	2,8
Sisal	1370	110,0	4,9 a 5,4	347 a 378	15,2
Malva	1409	182,2	5,2	160	17,4
Amianto	2200 a 2600	-	2	560 a 750	164
Polipropileno	913	-	22,3 a 26,0	250	2,0
Celulose	1609	643	-	700	10 a 40

Fonte: (SAVASTANO Jr., 2000)

O emprego dessas fibras traz algumas dificuldades associadas ao uso em compósitos à base de cimento, dependendo de um aperfeiçoamento dessa tecnologia. Algumas dificuldades em seu uso estão relatadas:

- A presença de contaminantes que interferem, por exemplo, na hidratação dos aglomerantes.
- A adequação dos processos de produção dos compósitos. Os processos convencionais de mistura e moldagem, geralmente originam problemas de má distribuição das fibras na matriz (SILVA, 2002), onde ocorre uma incorporação de vazios em excesso causando um aumento na porosidade do compósito.

2.1.3 Microestrutura x desempenho dos compósitos com fibras vegetais

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

2.1.3.1 Zona de transição

Em compósitos à base de cimento, a maior aderência fibra-matriz é conseguida por meio do melhor desempenho da zona de transição, fazendo com que as duas fases (fibra e

matriz) trabalhem em conjunto, efetivamente. A melhor adesão se consegue pela redução da porosidade e pela menor concentração de portlandita (cristais de hidróxido de cálcio) nas proximidades da fibra.

Define-se zona ou auréola de transição como a região da pasta de aglomerante próximo à fibra, com espessura de 10 µm a 100 µm, e que apresenta características diferenciadas do restante da matriz (Savastano Jr. et al., 1994).

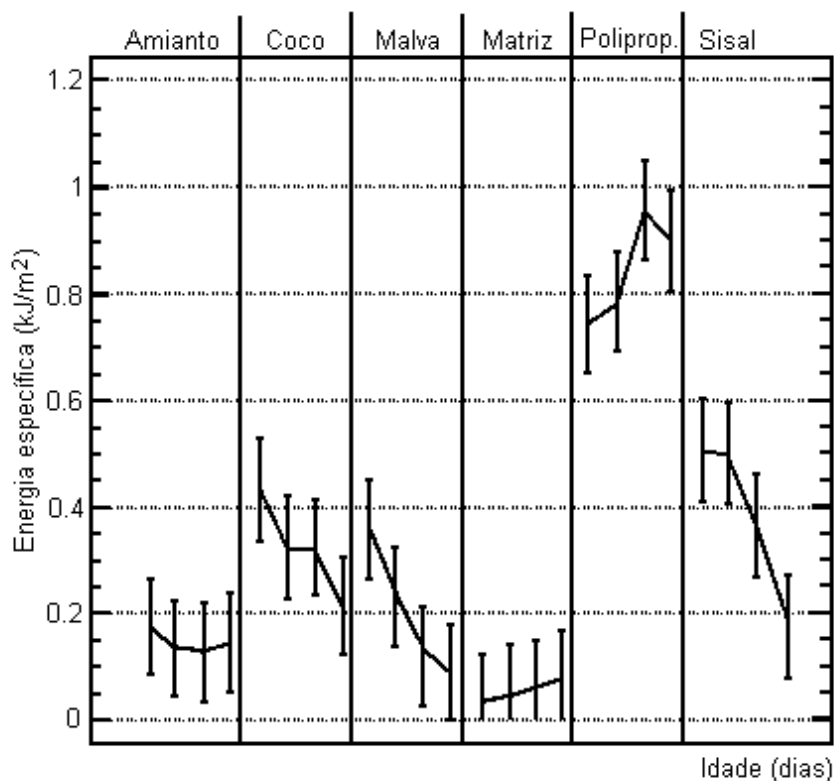
Percebe-se, no caso das fibras vegetais, que a elevada porosidade favorece a formação de grandes cristais de portlandita, que não se formam na superfície da fibra, mas, sim, no interior da zona de transição. Os descolamentos das fibras são visíveis e ocorrem em decorrência de sua variação dimensional, ao perder a água absorvida durante a mistura do compósito. Esses descolamentos, de grande incidência nos compósitos com fibras vegetais, constituem fator adicional para prejudicar a aderência entre as fases.

2.1.4 Comportamento mecânico dos compósitos com fibras vegetais

Savastano Jr. et al. (1994) apresentaram resultados de ensaios mecânicos de compósitos à base de pastas de cimento Portland, com relação água/cimento igual a 0,38, reforçadas com fibras vegetais (coco, sisal e malva), de amianto e de polipropileno.

O ensaio de tração na flexão utilizou equipamento de quatro cutelos, segundo RILEM (1984). A Figura 4 mostra o comportamento da energia específica: percebe-se como foi significativa a queda dessa propriedade aos 180 dias de idade, para compósitos com fibras vegetais, em decorrência da degradação dessas fibras em condições severas de exposição (umidade relativa superior a 95%). O compósito que absorve a maior quantidade de energia é aquele com fibras de polipropileno, cujos resultados chegam a atingir o dobro daqueles com fibras de sisal e de coco. Os compósitos com fibras de amianto e de malva apresentam valores ainda menores, em consequência do pequeno comprimento de ancoragem das fibras. A matriz sem fibras, obviamente, absorve menos energia que todos os compósitos.

Fig. 4 Energia específica do compósito em diversas idades. Relação água/cimento = 0,38, intervalo de confiança = 95%. Ensaio de tração na flexão. (Rilem, 1984).
 Legenda: para cada tipo de fibra, as idades se repetem na seqüência de 7, 28, 90 e 180 dias.



2.1.4.1 Comportamento sob compressão

Resultados de estudos experimentais anteriores demonstraram um decréscimo na resistência à compressão com fibras vegetais de sisal, acompanhado de ligeiro decréscimo do módulo de elasticidade (Tolêdo Filho 1997, Fujiyama 1997, Rodrigues 1999). Nota-se que a resistência à compressão do compósito é influenciada pelo tipo, comprimento e fração volumétrica das fibras. A redução dessa resistência foi promovida para frações volumétricas aumentadas, refletindo o fato de que, sob esforços de compressão, as fibras não agem como reforço e podendo, na verdade, aumentar o teor de falhas no material.

Na produção de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais vegetais, a cura do corpo de prova é geralmente feita por imersão em água. Após a retirada dos moldes, depois de 28 dias, os mesmos são secos naturalmente sob condições atmosféricas, ocorrendo assim a perda da água anteriormente absorvida e conseqüentemente a retração de volume das fibras. Essa retração provoca o

deslocamento na interface fibra-matriz, reduzindo a resistência de aderência. Tem-se tornado consenso, entre os pesquisadores que lidam com compósitos cimentícios com fibras vegetais, o fato de que esse método de cura pode ser inadequado, por induzir esse tipo de falha no material, ainda em sua produção.

Observa-se, durante um ensaio de compressão desses compósitos, que é comum que o corpo de prova, embora já rompido, mantenha suas partes unidas pelas fibras, não perdendo, assim, sua continuidade e evitando sua fratura catastrófica. Isso vem reafirmar o papel das fibras como elementos capazes de ligar as faces das fissuras, conferindo ao material uma certa capacidade, mesmo que mínima, de carregamento, após a fissuração da matriz. A Tabela 2 apresenta resultados de diferentes autores do grupo de pesquisa sobre materiais e tecnologia não convencionais da PUC-Rio de ensaios à compressão.

Tabela 2 – Valores de ensaios de compressão de autores diferentes.

Autor	Material	$\epsilon_{axial} (x 10^{-3})$	Coef. de Poisson	$\sigma_{máx.}$ (MPa)	E (GPa)
Rodrigues(1999)	CPN	3,62	0,17	42,15	23,14
	CPF25	1,63	0,23	23,37	17,04
	CPF45	1,34	0,18	18,41	18,40
Toledo Filho(1997)	M1	3,78	0,23	70,10	29,80
	M1S325	3,00	0,21	47,80	26,10
	M1S315	2,90	0,23	47,30	24,80
	M1S225	2,53	0,23	51,30	28,00
	M1C325	2,54	0,23	49,80	28,20
Fujiyama(1997)	Arg. plena	-	-	27,80	-
	Arg. e fibra de 25	-	-	25,10	-
	Arg. e fibra de 45	-	-	21,96	-

No trabalho de Rodrigues (1999) foram utilizados compósitos com matriz de argamassa (traço em massa 1:1:0,45 de cimento: areia: relação água/cimento) reforçada com fibras de sisal, com fração volumétrica de 2,21% e comprimento de 25 mm (CPF25) e 45 mm (CPF45). A mistura de referência foi argamassa plena (CPN). Fujiyama (1997) utilizou misturas semelhantes às do trabalho anterior, com relação água/cimento de 0,40 e fração volumétrica de 3%.

No trabalho de Toledo Filho (1997), foram utilizados compósitos com matriz de argamassa (traço em massa 1:1:0,40 de cimento: areia: relação água/cimento) reforçada com fibras de sisal e coco, com frações volumétricas de 2 e 3% e comprimento de 15 mm

(M1S315) e 25 mm (M1S325, M1S225, M1C325, M1C225). A mistura de referência foi argamassa plena (M1).

2.1.4.2 Comportamento sob flexão

A maioria das aplicações de materiais compósitos com matrizes à base de cimento está sujeita a cargas de flexão. Portanto, é de grande importância o conhecimento do comportamento do material, quando submetido a este tipo de carregamento (Tolêdo Filho 1997). A atuação das mesmas é marcante depois de atingida a carga de pico, que corresponde ao início da fissuração da argamassa. Assim, ao invés da ruptura brusca apresentada pela matriz plena, o compósito continua a suportar carga, embora em níveis inferiores à carga de pico, apresentando grande deformação. A Tabela 3 apresenta resultados de ensaios à flexão feitos por (Rodrigues 1999).

Tabela 3 - Valores de ensaios de flexão.

Autor	Material	P _{máx.} (N)	δ máx.(mm)	E (GPa)
Rodrigues 1999	CPN	2647,85	0,45	4,20
	CPF25	2920,16	0,93	3,34
	CPF45	2477,79	0,80	3,41

Mesmo se o compósito for considerado como um material idealmente elástico, antes da fissuração da matriz, Bentur e Mindess (1990) advertem que a teoria da flexão não pode ser considerada para o comportamento em flexão além deste ponto. Quando o limite elástico na flexão, em um material elástico perfeito, é alcançado, haverá ruptura. No entanto, o elasto-plástico pode continuar suportando cargas adicionais.

A presença da fibra muda o modo de ruptura do material (a ruptura não é instantânea como observada para a matriz) e aumenta a sua capacidade de absorver energia. Para compósitos reforçados com fibras longas (ou curtas numa combinação ótima de fração volumétrica e comprimento), a carga máxima pode quase que triplicar a carga de primeira fissura.

As curvas carga-deslocamento dos compósitos reforçados com fibras naturais podem, ser divididas em duas partes: a) zona elástica até a primeira fissura e b) zona inelástica até a fratura. Na zona elástica, considera-se que apenas a matriz suporta a carga. Como o módulo de elasticidade das fibras naturais é baixo, comparado com o da

matriz, elas não são eficientes para prevenir a fissuração. Na zona inelástica, apenas as fibras suportam as tensões trativas (como no caso do concreto armado). No caso dos compósitos reforçados com fibras longas, essa região pode ser subdividida em três partes: (a) região onde a carga é transmitida da matriz para as fibras (caracterizada pela redução da carga após a primeira fissura), (b) região onde as fibras suportam as forças de tração e aumentam a capacidade de carga do material (trecho ascendente da curva carga-deslocamento) e (c) a região onde a capacidade de suportar carga do compósito decresce, devido a ruptura ou deslizamento das fibras até a fratura do material (trecho descendente da curva carga-deslocamento). Compósitos com fibras curtas ou pequeno volume de fibras não apresentam a região (b).

As matrizes a base de cimento Portland apresentam vantagens quanto à resistência a compressão e rigidez, porém, possuem baixa capacidade de deformação, ruptura abrupta e baixa resistência a tração (VENTURA et al, 2006). O uso de barras de aço, assim como a inserção de fibras artificiais e naturais serve como incremento para resistência a flexão.

Ventura et al. (2006) produziram compósitos reforçados com fibras curtas de sisal. Neste estudo foi verificado que os espécimes referência (sem adição de fibra) tiveram ruptura frágil e brusca que coincide com a carga de pico do material (Figura 5). O compósito (1% de fibra) obteve melhor desempenho na fase posterior ao carregamento máximo, pois a fibra distribuiu as tensões, proporcionando maior capacidade de deformação (Figura 6).

Figura 5 - Diagrama típico carga x deslocamento do corpo de prova sem reforço (VENTURA et al.,2006)

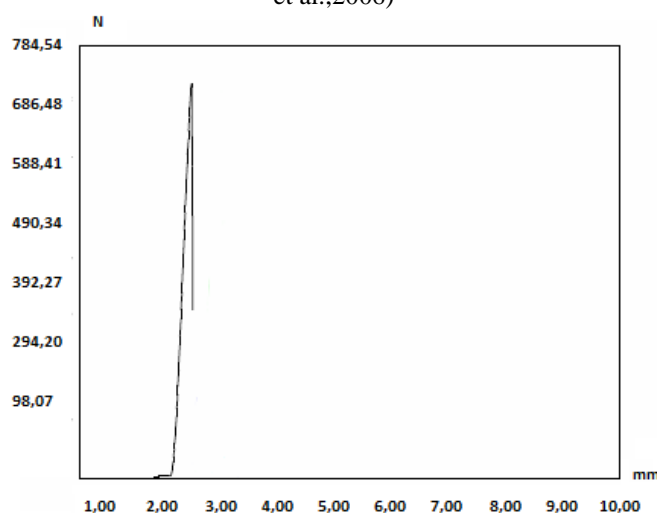
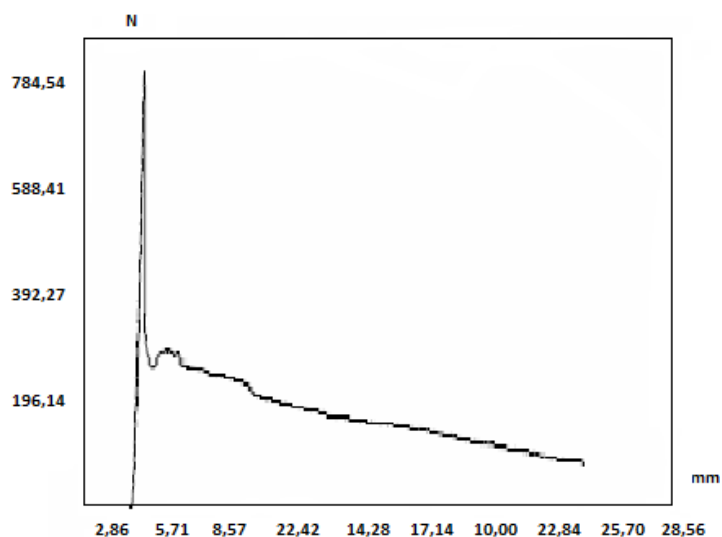


Figura 6 - Diagrama típico carga x deslocamento do corpo de prova com reforço (VENTURA et al., 2006)



Carneiro (2010) verificou que a adição de 1% de fibras curtas de coco em pastas produzidas com cimento, metacaulinita, resíduo cerâmico e filler de RCD, incrementou em 9,5% a carga de ruptura na flexão da matriz. Houve queda da resistência da matriz, 30 e 19,3% para 2 e 3% de fibra, respectivamente. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Carga de ruptura à flexão das pastas (CARNEIRO, 2010)

MISTURA	CARGA DE RUPTURA (N)- CV (%)
SEM REFORÇO	901,57 (21,37)
1% DE FIBRA	987,20 (42,04)
2% DE FIBRA	631,08 (43,49)
3% DE FIBRA	727,26 (13,79)

2.1.4.3 Comportamento sob tração

Mansur e Aziz (1982) apud Toledo Filho (1997) observaram, para pastas e argamassas reforçadas com fibras de juta, que a resistência à tração primeiro aumenta com o tamanho da fibra e que, após atingir um valor máximo, a mesma começa a decrescer devido ao efeito

adverso de se aumentar o volume de vazios no compósito. A Tabela 5 apresenta o comportamento de compósitos reforçados com fibras de bagaço de cana e juta, quando submetidos à tração direta pelos autores anteriormente citados.

Tabela 5– Comportamento de Compósitos reforçados com fibras vegetais à tração direta, Fonte Tolêdo Filho(1997).

Traço da matriz	Tipo de fibra	Vol. de fibras	Comp. de fibra (mm)	f _t (MPa)	E _t (GPa)
1:0:0,25	Bagaço-de-cana	10	25	3,87	12,40
		20	25	2,95	8,54
		30	25	2,43	6,40
1:0:0,33	Juta	0	-	1,20	9,50
		1	25	1,36	9,92
		2	25	1,96	11,60
		3	25	2,08	11,20
		4	25	1,68	11,40
1:1:0,33	Juta	0	-	2,04	15,40
		2	12	2,51	18,00
		2	18	2,18	13,43
		2	25	2,16	14,47
		2	38	2,12	17,70
1:2:0,33	Juta	0	-	2,09	17,77
		2	12	2,33	22,86
		2	18	2,48	22,56
		2	25	2,03	16,00
		2	38	1,63	16,66

Sabe-se que as matrizes cimentícias apresentam um comportamento frágil, quando submetidas à tração, sendo essa uma das razões que motivou o surgimento dos materiais compósitos, onde as fibras são adicionadas para resistir aos esforços de tração, aos quais a maioria dos elementos estruturais estão submetidos direta ou indiretamente.

A influência da fibra sobre o comportamento à tração depende de vários parâmetros como o tipo de fibra, comprimento, diâmetro, teor de fibra incorporado e forma de distribuição na matriz. A finalidade de se empregar as fibras é garantir a manutenção da resistência, mesmo após a fissuração da matriz, permitindo uma maior deformação do compósito antes da ruptura e propiciando resistência ao impacto e tenacidade maiores que o da matriz. (LIMA 2004).

2.1.5 Durabilidade de compósitos com fibras vegetais

A durabilidade pode ser definida como a capacidade que um produto possui de manter suas condições de serviço, durante o tempo para o qual foi projetado e construído.

Agentes ou fatores de degradação são ações físicas, químicas, ambientais ou biológicas que causam degradação do material.

A durabilidade das fibras vegetais é considerada, por diversos autores, como sendo o problema mais crítico dentre aqueles apresentados pelos materiais compósitos que podem perder resistência mecânica e tenacidade com o tempo.

Os ensaios de durabilidade devem incluir a exposição dos corpos- de-prova às condições de laboratório ou de campo, para acompanhamento das mudanças que possam ocorrer durante sua vida útil, e os métodos de ensaio de durabilidade devem contemplar os seguintes quesitos:

- Definição dos requerimentos de desempenho do elemento;
- Caracterização dos materiais e componentes, para entendimento dos mecanismos de degradação;
- Identificação dos possíveis mecanismos de degradação;
- Definição das condições às quais estarão expostos os materiais ou componentes;
- No caso de serem utilizados ensaios acelerados, a confirmação de que os mecanismos de degradação induzida estão corretos;
- Desenvolvimento de modelo matemático descrevendo o processo de degradação na predição da vida útil.

As fibras naturais podem sofrer vários graus de degradação quando expostas a ambientes alcalinos. A intensidade do ataque, determinada pela perda de resistência da fibra, depende do tipo de fibra e do tipo de solução alcalina. GRAM (1983) apud TOLEDO FILHO (1997) estudou várias formas para melhorar a durabilidade dos compósitos reforçados com fibras naturais, sendo elas:

- Proteção superficial das fibras, com silicato de sódio, sulfito de sódio, sulfato de magnésio, agentes repelentes de água, ácido esteárico e forminel. Somente os dois últimos tratamentos impediram a fibra de ser mineralizada;
- Redução da alcalinidade da matriz, empregando-se cimento de alumina ou substituindo o cimento Portland por microsílca, escória de alto-forno e pozolanas naturais;

- Selar os poros da matriz, adicionando-se cera ou estearato de zinco em pó à mistura fresca ou impregnar o produto endurecido com enxofre;
- Combinação das alternativas acima.

Algumas dessas soluções apresentam custo elevado, reduzindo assim uma das vantagens das fibras vegetais. Mas, como a velocidade de degradação é relativamente baixa, compósitos de fibras vegetais e cimento convencional podem ser empregados nas peças em que a resistência a impacto e a ductilidade são necessárias apenas por curto período de tempo, por exemplo, em fôrmas para concretagem ou em peças que necessitem de reforços apenas durante a sua fase de transporte e montagem.

2.2 Fibras vegetais

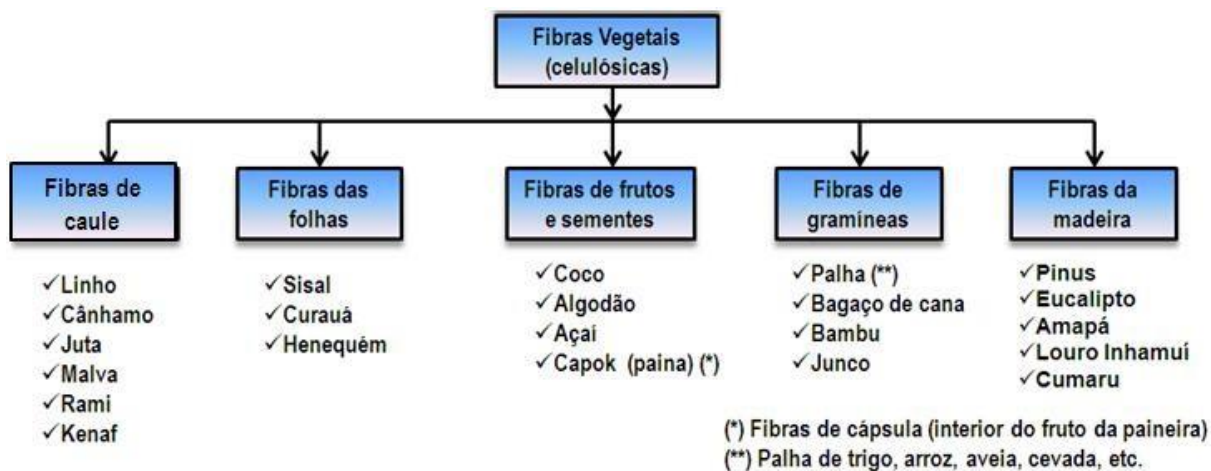
As fibras vegetais vêm sendo estudadas há bastante tempo no que se refere à sua composição, às suas propriedades mecânicas e aos seus possíveis usos (BLEDZKI; GASSAN, 1999; SPARNIAŠ, 2006). Foram utilizadas durante muito tempo, porém substituídas por novas tecnologias. Atualmente, o interesse por fibras naturais vem crescendo novamente, devido à possibilidade de aproveitamento, ao fato de serem fontes renováveis, biodegradáveis, recicláveis e por apresentarem economia de energia em sua produção, havendo, portanto, uma grande retomada nas pesquisas de desenvolvimento de novos produtos que fazem uso sustentável dessas fibras, além de pesquisas para explicar o comportamento destes materiais.

A aplicação de fibras vegetais na construção data dos primórdios de nossa civilização. Milhares de anos atrás, os Persas já usavam as fibras associadas ao solo para construções de habitações, resultando em paredes com bom isolamento térmico e boa aparência estética (GHAVAMI e TOLÊDO FILHO 1991).

Segundo GEORGE et al. (2001), as fibras vegetais ou lignocelulósicas são retiradas de suas diversas partes, como: caule (juta, banana, linho, cânhamo, kenaf, rami, malva); folha (abacaxi, sisal, henequém, curauá); fruto ou semente (algodão, mamona, coco e açaí).

A Figura 7 mostra as principais categorias das fibras lignocelulósicas. Na Europa o linho é a fibra vegetal mais importante, isso comercialmente falando, e no Brasil é o sisal (YOUNG, 1995).

Figura 7 – Classificação das fibras vegetais Fonte: Adaptado de YOUNG (1995)



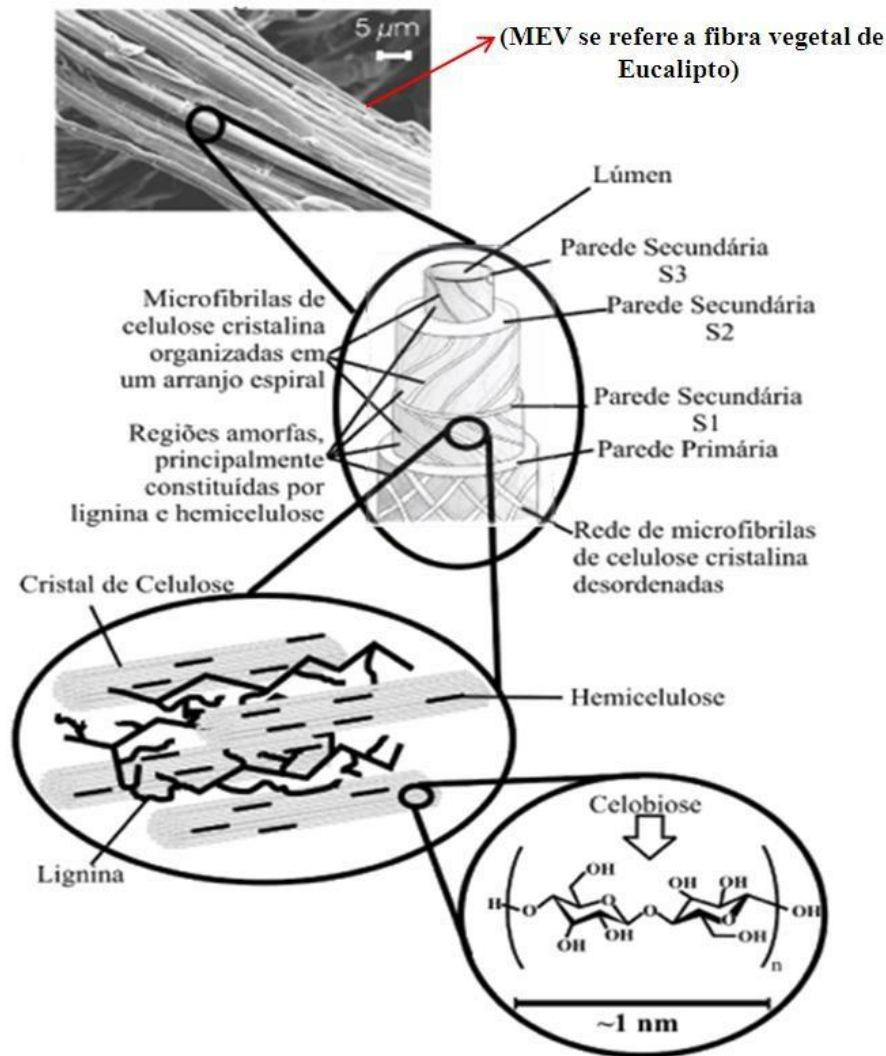
As fibras oriundas das folhas são as de maior interesse para serem utilizadas como reforço, embora fibras de talo, do caule e do fruto também possam ser usadas. De uma maneira geral, as fibras das folhas são mais grossas que as fibras dos talos e são referenciadas como fibras “duras” enquanto as fibras do talo são chamadas de fibras “macias” e, portanto, mais próprias para fins têxteis. Nesse trabalho foi utilizado a fibra da folha de curauá (TOLÊDO FILHO 1997).

2.2.1 Microestrutura das fibras vegetais

De acordo com ARSÈNE et al. (2003), de forma simplificada, a celulose é um polímero natural que reforça o material e é de grande importância nas fibras vegetais. Sua função é estrutural aumentando a resistência à tração. A cadeia de celulose forma microfibrilas que, juntamente com a hemicelulose, formam as fibrilas. As fibrilas são dispostas em várias camadas para construir a estrutura da fibra. As fibras são cimentadas dentro da planta por lignina.

Pode-se observar a estrutura de um filamento individual na Figura 8. Vê-se, a parede primária (P), com cerca de 0,05 μm de espessura. A parede secundária que é formada por três camadas distintas, caracterizadas por diferentes alinhamentos das fibrilas. A camada S1 tem entre 0,1 μm e 0,2 μm de espessura. A camada S2 tem de 2 μm a 10 μm de espessura. A camada S3 é a mais interna, tendo cerca de 0,1 μm de espessura (SILVA et al 2009).

Figura 8 – Estrutura de um filamento individual (fibra vegetal)
 Fonte: adaptado de SILVA *et al.* (2009).



Para uma melhor compreensão das propriedades mecânicas e durabilidade das fibras, seus principais componentes estruturais (celulose, hemicelulose e lignina) são comentados a seguir:

Celulose – é um polímero derivado da glicose, que é apenas um de um número de monossacarídeos tendo a mesma composição química, $C_6H_{12}O_6$.

Hemicelulose – é também um polímero de açúcares (tais como galactose e manose) raramente, ou nunca, cristalino, que apresenta baixo grau de polimerização e é solúvel em álcalis. De acordo com (Gram 1983) a hemicelulose está presente principalmente na parede primária.

Lignina – a lignina é um adesivo natural cuja estrutura ainda não foi completamente demonstrada. Consiste de cerca de 65% de carbono, 6% de hidrogênio e 29% de oxigênio,

compondo um polímero de cadeia muito complexa que, para ser dissolvido, necessita ser primeiramente subdividido em substâncias mais simples (Coutts 1988). A lignina pode ser dissolvida e lixiviada em meio alcalino e está presente, em grande concentração na lamela intermediária (cerca de 70 %) (Tolêdo Filho 1997).

2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas das fibras vegetais

As propriedades das fibras naturais dependem, principalmente, da sua composição química. No entanto, devido a diversos fatores – localização geográfica, clima, tipo de fibra, parte da planta, condições do solo, etc. – a sua composição química, cristalinidade, propriedades de superfície, diâmetro transversal, forma, tamanho, força e rigidez podem variar de fibra para fibra (BLEDZKI; GASSAN, 1999).

Nas Tabelas 6 e 7, apresentam-se as propriedades físicas e mecânicas, respectivamente, de algumas fibras vegetais comumente utilizadas. Pode ser observada uma grande variabilidade entre os valores apresentados, que pode ser creditada às condições ainda não padronizadas dos testes aplicados. Além disso, essas propriedades dependem da idade da planta, do local do cultivo, das condições climáticas e da microestrutura das fibras.

Tabela 6 – Propriedades físicas das fibras naturais vegetais.

Fibras Vegetais	Autores	∅ (mm)	Comp. (cm)	H (%)	μ(KN/m ³)
Curauá	Picanço e Ghavami (2004)	0,12	99,75 - 127,00	11,47	13,47
Bagaço-de-cana	Racines (1978)	0,20 - 0,40	5,00 - 30,00	-	-
	Aziz et al. (1984)	-	-	-	12,00 - 13,00
Bambu	Jindal (1986)	0,35	22,00 - 27,00	-	-
	Savastano Jr. e Agopyan (1998)	-	-	-	11,80
Coco	Tolêdo Filho (1997)	0,18 - 0,32	-	13,70	6,70 - 10,00
	Aziz et al. (1987)	0,10 - 0,40	5,00 - 35,00	-	-
Juta	Azis et al. (1987)	0,10 - 0,20	18,00 - 80,00	-	10,20 - 10,40
	Picanço e Ghavami (2004)	0,09	0,56 - 0,85	11,37	10,79
Piaçava	Tolêdo Filho (1990)	0,10 - 0,90	6,00 - 23,00	-	8,00 - 11,00
	CEPED (1982)				10,50
Sisal	Ghavami et al.(1999)	0,15	38,20 - 94,00		
	Tolêdo Filho (1990)	0,08 - 0,30	38,00 - 94,00	13,30	7,50 - 11,00

Tabela 7 – Propriedades mecânicas das fibras naturais vegetais.

Fibras Vegetais	Autores	Resistência à Tração (MPa)	Módulo de elasticidade (GPa)	Def. na Ruptura (%)
Curauá	Picanço (2005)	195,00 - 832,50	12,45	3,02
Juta	Picanço e Ghavami (2004)	137,78 - 533,24	-	-
Bagaço-de-cana	Racines (1978)	170,00 - 290,00	15,00 - 19,00	-
	Guimarães (1982)	177,00	4,90	5,11
Bambu	Guimarães (1982)	564,00	28,20	3,22
	Beaudoin (1990)	440,00	37,00	-
Coco	Ghavami (1985)	105,00 - 198,00	2,00 - 6,00	16,00
	Savastano Jr. e Agopyan (1998)	95,00 - 118,00	2,80	23,90 - 51,40
Juta	Chand (1988)	240,00	17,40	1,20
	Beaudoin (1990)	250,00 - 350,00	26,00 - 32,00	1,50 - 2,00
Linho	Coutts (1983)	1000,00	100,00	1,80 - 2,20
Piaçava	Toledo Filho (1990)	50,00 - 90,00	-	4,00 - 6,00
	CEPED (1982)	143,00	5,60	6,00
Sisal	Toledo Filho (1997)	577,50	11,00 - 27,00	2,10 - 4,20
	Ghavami et al. (1999)	580,00	18,00	6,00

As fibras naturais existem em abundância, estão facilmente disponíveis a baixo custo e possuem baixo consumo de energia; estas fibras são, normalmente, incorporadas a matriz de cimento de forma descontínua e aleatoriamente distribuídos. Sua função principal é reforçar, atrasar e controlar fissuras de tração.

Segundo Neto e Pardini (2006) pode-se enumerar as principais vantagens das fibras vegetais em:

- baixa massa específica;
- maciez e abrasividade reduzida;
- baixo custo;
- reciclabilidade, atoxicidade e biodegradabilidade;
- estímulo a empregos na zona rural; e,
- baixo consumo de energia em sua produção.

Já entre as desvantagens e limitações pode-se citar:

- baixas temperaturas de processamento;

- acentuada variabilidade em suas propriedades mecânicas e baixa estabilidade dimensional;
- sensibilidade a efeitos ambientais (variações de temperatura e umidade);
- presença de seções transversais de geometria complexa e não uniforme; e,
- propriedades mecânicas modestas quando comparadas às fibras sintéticas (fibra de carbono, de vidro, etc.).

2.2.3 Fibras vegetais no Brasil

Ecologicamente falando, sabe-se que o Brasil possui uma riqueza extraordinária, pois os seus recursos naturais são abundantes e tem ao seu favor condições climáticas favoráveis e solo fértil, elementos que possibilitam uma grande produção de plantas fornecedoras de fibras vegetais, tais como: banana, algodão, coco, sisal, juta, malva, piaçava, buriti, abacaxi e curauá, as quais são plantadas, cultivadas e trabalhadas principalmente nos estados do Norte e Nordeste.

A utilização de compósitos reforçados com fibras lignocelulósicas, atualmente, vem crescendo no ramo da Engenharia e vários são os produtos feitos com elas, em especial no setor de construção civil e automobilístico, onde a procura tem sido expressiva. A seguir, são citados alguns exemplos encontrados na literatura sobre fibras naturais que já foram empregadas em produtos da Engenharia.

2.2.3.1 Fibras de Piaçava

A fibra de piaçava ou piaçaba palmeira (*Attalea funifera* Martius) ilustrada na Figura 9, é obtida principalmente na Região Nordeste do país, mais precisamente no sul da Bahia, sendo também cultivadas no Estado do Amazonas. O nome vulgar, piaçava, é de origem tupi, traduzido como “planta fibrosa”, com a qual se faz utensílios caseiros.

Segundo a Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - CEPLAC, os produtos que são gerados da piaçava são: vassouras, pentes, artesanatos, enchimento nos assentos de carros, cordoaria e escovões. O resíduo obtido de sua limpeza, o qual é conhecido como bagaço, fita ou borra, serve para cobertura de casas nos meios rural e urbano (CEPLAC, 2012).

Atualmente este produto é muito utilizado na cobertura de quiosques em áreas de lazer como sítios, clubes e praças, além de unidades para produção de beijus e bolos para a aquisição do PAA – Produção e Aquisição de Alimentos (CEPLAC, 2012).

Figura 9 – (a) Planta piaçava; (b) Fibra piaçava.

Fonte: Adaptado CONAB (2012)



Os compósitos feitos com a Piaçava possuem um grande potencial de competitividade, com relação a outros produtos industriais à base de madeira, os quais valem a pena serem desenvolvidos (AQUINO, 2005).

2.2.3.2 Fibras de Sisal

A planta de sisal (*Agave sisalana*) é originária do México, porém sua comercialização e explosão econômica teve lugar em outros países (SILVA, 2004). Sua adaptação se deu muito bem nas regiões do Nordeste Brasileiro. Sua propagação se dá por meio de filhotes e bulbilhos. Os filhotes ou rebentões são mudas que nascem ao lado das plantas mãe e são ligadas a elas por rizomas. Os bulbilhos são pequenas plantas que se desenvolvem nos pendões florais, após a queda das flores. O emprego de bulbilhos como material de plantio representa grandes vantagens para o processo de comercialização, pois eles se desenvolvem rapidamente, atingindo a idade de corte mais cedo que as plantas que são originadas dos rebentões (OASHI, 1999). A Figura 10 mostra a planta de sisal e a fibra já extraída.

Segundo Araújo (2009), atualmente o Brasil é o maior produtor de fibra de sisal (*Agave sisilana*) do mundo, sendo a Bahia responsável por 80% da produção da fibra no país. Isto demonstra o grande potencial que o Brasil tem para produção de fibras naturais.

Além disso, existem diversos estudos das fibras de sisal conjugadas com polímeros, melhorando propriedades mecânicas e reológicas (QUIRINO, 2010).

Figura 10 – (a) Planta do sisal; (b) fibra de Sisal.

Fonte: adaptado de MILANESE (2008)



Segundo a COSIBRA (2011), aproximadamente um milhão de pessoas na Região Nordeste vive do cultivo do sisal sendo uma fibra de alto valor econômico para o país.

2.2.3.3 Fibras de Juta

É uma planta herbácea que chega a uma altura de 3 a 4 metros, como mostra a Figura 11. A juta (*Corchorus capsularis*) é de clima quente e úmido. As temperaturas elevadas contribuem para a fermentação, facilitando a separação da fibra da parte lenhosa do caule. Introduzida no Brasil por imigrantes japoneses, é hoje uma das principais atividades econômicas das populações ribeirinhas da Região Amazônica, sendo um fator fundamental da permanência de mais de 50 mil famílias no campo. (QUIRINO 2010).

A fibra de Juta é uma das fibras vegetais mais utilizadas como reforço de matrizes poliméricas, juntamente com outras fibras, como as fibras do algodão, rami e coco. São bastante utilizadas na indústria automotiva brasileira. (QUIRINO 2010).

Figura 11– (a) Planta de juta; (b) fibra de juta.

Fonte: adaptado de QUIRINO (2010)



2.2.3.4 Fibras de Malva

A malva é uma planta nativa da Região Amazônica, seu nome científico é *Urena lobata* L, de onde também se extrai fibras como mostra a Figura 12. É cultivada na região Norte desde os anos 1930, mais precisamente no estado do Pará, sendo somente explorada no Amazonas a partir de 1971. O cultivo da malva origina uma fibra com uma boa resistência mecânica, SABBÁ (1993).

Figura 12 – (a) Planta de malva; (b) Fibra de malva.

Fonte: adaptado de FRAXE *et al.* (2007).



No Estado do Amazonas, o sistema de juta/malva teve um desenvolvimento significativo, devido ao fato de ter se tornado uma opção lucrativa no meio rural, onde é

desenvolvido. Apesar de serem produzidos também nos Estados do Pará e Maranhão, é no Estado do Amazonas que ocorre sua maior produção. (PAIVA 2009).

Segundo a CONAB (2012), a produção de juta com a malva no Brasil, se concentra nos estados do Amazonas e do Pará, os quais são responsáveis por mais de 70% da matéria prima da indústria de fios e de embalagens de fibras naturais. Os outros 30% demandados pelo país são atendidos por embalagens de fibras naturais importadas da Índia e de Bangladesh, cujos preços de venda no Brasil apresentam-se mais baratos do que os preços de venda dos mesmos produtos fabricados no Brasil.

2.2.3.5 Fibras de Açaí

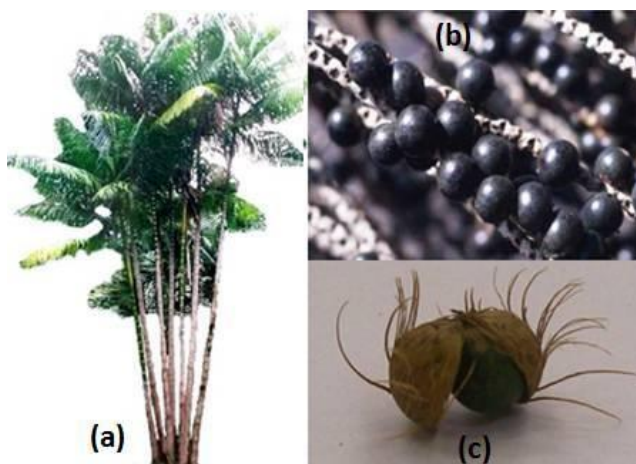
É uma palmeira típica da Amazônia de clima tropical, existem duas espécies de açaizeiro (Figura 13): *Euterpe oleracea* e *Euterpe precatória*. Abundante nos estados do Pará, Mato Grosso, Tocantins, Amazonas, Maranhão e Amapá e em países da América do Sul (Venezuela, Colômbia, Equador, Suriname e Guiana) e da América Central (Panamá), QUIRINO (2010).

Sua fibra é extraída da semente, a qual é beneficiada e tingida para a confecção de artesanato e biojóias (Figura 13c). Existe uma incipiente pesquisa a respeito da matéria-prima e sua viabilidade técnica, comparando com outras como a fibra do sisal, bananeira e bambu, por exemplo, que tem emprego definido. (QUIRINO 2010).

Quirino (2010), em sua pesquisa verificou a viabilidade técnica da produção de painéis com a fibra. Os painéis apresentaram superfície uniforme e características mecânicas que permitiriam a sua aplicação na indústria da construção civil e na indústria moveleira.

Figura 13 – (a) Açaizeiro; (b) Fibra de açaí; (c) Carocó de açaí.

Fonte: adaptado de QUIRINO (2010)



2.2.3.6 Fibra de Curauá

2.2.3.6.1 A planta, características físicas e locais de ocorrências

Curauá é uma planta nativa originária da Amazônia, cuja folha produz uma fibra têxtil de natureza ligno-celulósica. Trata-se de uma bromeliácea, do tipo ananás, especificamente ananás erectipholius. Existem duas espécies de Curauá, uma de folha roxa-avermelhada, que se desenvolve mais, e outra de folha verde-clara, chamada de Curauá branco (Figura 14). As folhas medem cerca de 5 cm de largura por 5 mm de espessura e o comprimento é de aproximadamente 1,5 m. O fruto é semelhante, em aspecto e sabor, ao do abacaxi, sendo porém mais fibroso, o que o torna impróprio para o consumo humano, além de apresentar menor tamanho que o anterior (Lobato 2003).

Figura 14. Fibra de curauá branco e roxo, respectivamente. Fonte: COSTA, LAMEIRA e YOSHINO, 2002.



O Lago Grande do Curuaí, em Santarém, estado do Pará, é a zona de maior concentração de curauá da região do Baixo Amazonas. Mais de 50 comunidades cultivam a planta em consórcio com diferentes culturas como mandioca, urucu, cumaru e seringueira.

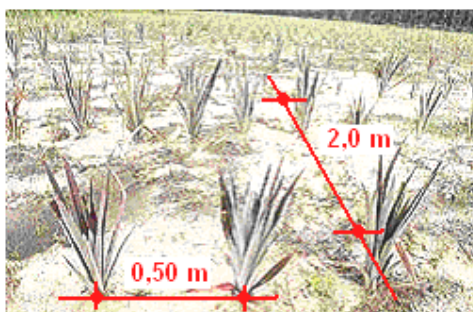
Segundo o CEAPAC (2013) o curauá é uma cultura pouco exigente em relação à fertilidade do solo. Desenvolve-se bem em solos de textura arenosa e apresenta baixa perda durante o período seco no verão. Contribui para a recuperação e valorização de áreas desmatadas e facilita o surgimento de novas áreas de floresta ou capoeirão para o seu cultivo e, conseqüentemente, reduz a pressão sobre as áreas de Reserva Legal. Assim, seu plantio é economicamente recomendável para as empresas que visam reduzir o custo florestal. A Figura 15 mostra a plantação do curauá (BANNA et al., 2011).

Figura 15. Plantação de curauá Fonte: CEAPAC, 2013.



O plantio adensado é feito no espaçamento de 50 cm por 2 m de largura (Figura 16). A planta curauá produz entre 20 e 24 folhas por ano, podendo proporcionar 2 kg de fibra cada uma, e aproximadamente 98 folhas, em cinco anos, a média do seu ciclo de vida. A princípio, o maquinário usado para beneficiamento do curauá era o mesmo utilizado no processamento do sisal, planta cultivada do Nordeste brasileiro. Atualmente são utilizadas máquinas mais modernas que a tradicional “periquita”, que ainda é utilizada pelos pequenos produtores da região do Lago Grande. Esse equipamento rudimentar proporciona um baixo rendimento e muito desperdício. Introduziram-se máquinas mais modernas, com quatro entradas de alimentação, sendo previsto o desenvolvimento de novos equipamentos, como resultado de pesquisas que estão em curso em São Paulo e na Alemanha. As novas máquinas deverão ter capacidade de processar 800 kg por hora de manta de curauá (PICANÇO 2005).

Figura 16 – Planta Curauá com seu plantio adensado (a) e Comprimento aproximado (b). (Picanço, 2005).



(a)



(b)

O composto viscoso que sobra do processo de desfibramento, a mucilagem, permite a fabricação de papel e o soro do curauá contém uma toxina utilizada para a produção de um anestésico (GOMES 2002).

As folhas são transportadas até as centrais de beneficiamento, onde, após o desfibramento, procede-se à lavagem em tanques com água corrente e a secagem em varais. Após isso, é feita a secagem em estufas, que acelera o processo de perda de água, assegurando melhor qualidade ao produto final. A folha seca é embalada em fardos de até 30 kg, que são levadas às fábricas, onde são produzidas as mantas usadas na composição de artefatos da indústria automobilística, tais como, tampa de porta-malas, revestimento de teto, etc (PICANÇO, 2005).

Segundo Barros (2006), a colheita da planta curauá é feita manualmente e no primeiro ano posterior ao replantio, o curauá rende 24 folhas por planta, sendo equivalente a dois quilos de fibra em média, tendo um rendimento de fibra seca de aproximadamente 6% independente da variedade do curauá. O processo de produção da fibra de curauá é mostrado na Figura 17.

Figura 17. Processo de extração da fibra de curauá Fonte: Bicalti, 2015.



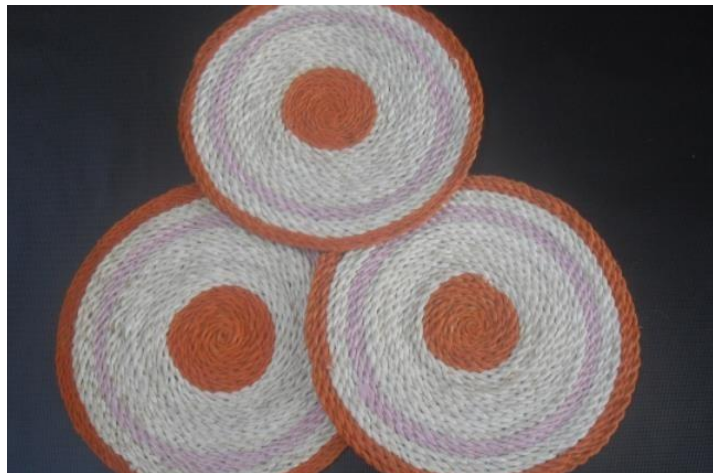
2.2.3.6.2 O uso da fibra de curauá

As fibras de curauá são de uso popular, utilizadas pelos índios para trançar redes de dormir, na manufatura de cordas, linhas de pesca, cestas e tapetes (Figura 18), pois são

produtos que atestam as qualidades de resistência e leveza (PICANÇO e GHAVAMI, 2008; MONTEIRO *et.al*, 2006; ERENO, 2004).

Quando misturadas a outros materiais, como sobras de cobertores e tapetes rejeitados pela indústria têxtil, as fibras picadas de curauá reforçam matrizes de polipropileno, empregadas nas indústrias automobilísticas. Esse compósito é utilizado na parte interna e no teto dos automóveis modelos Fox e Pólo da Wolkswagen do Brasil (PEMATEC, 2013; CASTRO, 2010; FERREIRA *et al.*, 2010; CORRÊA *et al.*, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2006; ERENO, 2004).

Figura 18. Tapete feito com fibra de curauá Fonte: CEAPAC, 2013.

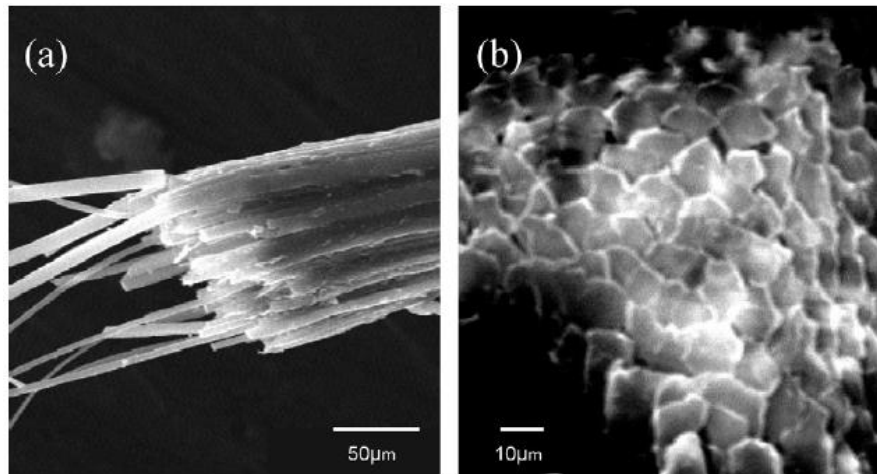


2.2.3.6.3 Características químicas e mecânicas da fibra de curauá

Na caracterização química das folhas (fibras) de curauá, dá-se atenção especial à composição dos componentes lipofílicos e à caracterização estrutural da lignina, pois essas duas frações orgânicas são muito importantes durante a formação da polpa e para a fabricação de papel. As fibras de curauá são caracterizadas pelo alto teor de holocelulose e R-celulose (92,5 e 66,4%, respectivamente) e pelo baixo teor de lignina (6,5% do peso total da fibra), que é similar ao de outras fibras não-madeiráveis (MARQUES et al, 2007).

A Figura 19 mostra micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície fraturada (Figura 19a) e da secção em corte (Figura 19b) das fibras de curauá. Estas imagens mostram que as fibras de curauá consistem de um feixe de filamentos com diâmetro equivalente a 9-10 μm , empacotados pela ação da lignina.

Figura.19 - Superfície fraturada e área da seção transversal da fibra de curauá (Gomes et al., 2007).



Dentre as fibras vegetais com potencial para o aproveitamento como reforço destaca-se o curauá, pois a mesma produz uma fibra com propriedades mecânicas específicas parecidas com fibras inorgânicas, podendo dar origem a produtos com menor densidade com grandes aplicações (SPINACÉ et al., 2011; MOTHÉ e ARAÚJO, 2004).

A fibra de curauá está entre as fibras lignocelulósicas de maior resistência, com resistência a tração média em torno de 400 MPa. No entanto, devido a sua característica heterogênea, comum a todas as fibras vegetais, há uma larga dispersão nessa propriedade, e resistência à tração superior a 700 MPa ou inferior a 200 MPa pode ser encontrada para fibras individuais (MONTEIRO et al., 2008). A grande dispersão nos resultados de resistência à tração é comum quando se trata de fibras vegetais. Fatores como a variação dimensional ao longo do comprimento das fibras e a diversidade de formatos da seção transversal influenciam a dispersão dos resultados (SILVA e AQUINO, 2008).

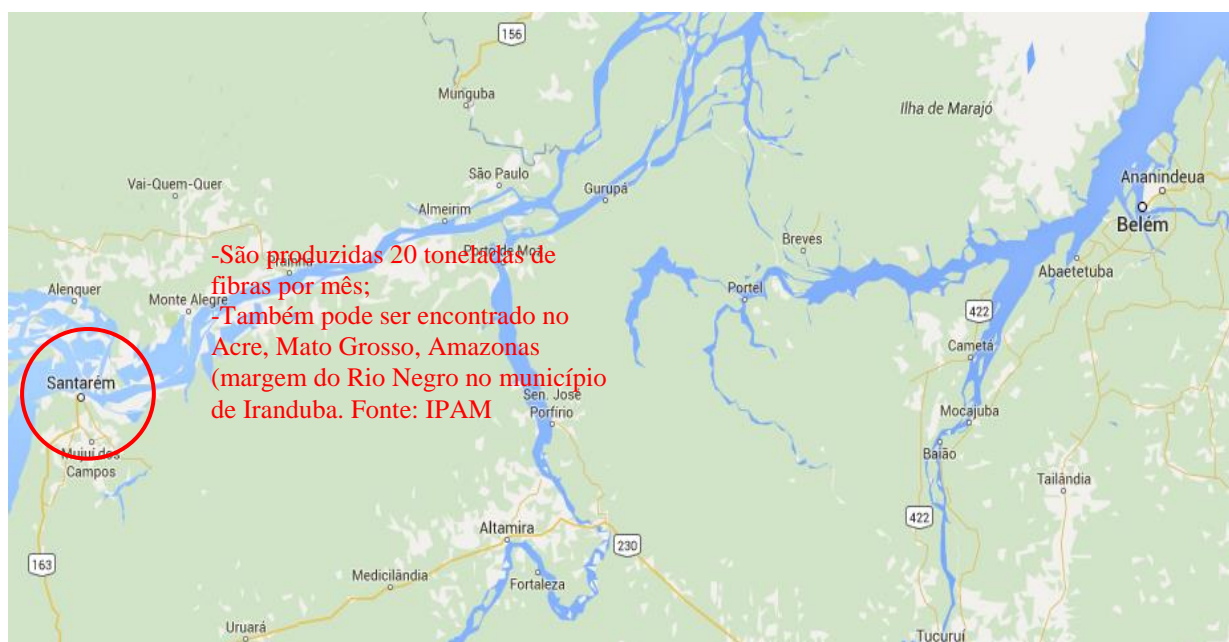
As características das fibras de curauá têm chamado atenção devido a sua elevada resistência mesmo com espessura reduzida, sua capacidade de suportar tensões elevadas podendo substituir a fibra de vidro, que se faz importante para o uso como reforço em compósitos (SPINACÉ et al., 2011; ERENO, 2004).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coleta da fibra vegetal Curauá

A Fibra de curauá foi fornecida pela EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e foi coletada na cidade de Santarém, região do Baixo Amazonas no estado do Pará, onde está concentrada a maior plantação da fibra. A Figura 20 mostra o mapa da localização da cidade de Santarém.

Figura 20 – Ponto de coleta da fibra de Curauá. Fonte: Google Maps.



3.2 Caracterização dos componentes do compósito cimentício

3.2.1 Cimento

Para a confecção do compósito foi utilizado o Cimento Portland CP IV-32, cuja caracterização das propriedades químicas está apresentada na Tabela 8. O cimento utilizado está disponível comercialmente no mercado brasileiro, sendo constituído por 45% a 85% de clínquer e gesso, 15% a 50% de material pozolânico e de 0 a 5% de material carbonático.

Tabela 8 – Composição química em termos de óxidos do CP IV. Fonte: Fabricante

Composição química do cimento	Resultados (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	36,84
Óxido de cálcio total (CaO)	62,27
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	12,91
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,37
Óxido de magnésio (MgO)	4,39
Trióxido de enxofre (SO ₃)	2,18
Óxido de cálcio livre (CaO)	2,71

O CP IV foi escolhido por conter uma grande proporção de material pozolânico em sua composição e os materiais pozolânicos não reagem com a água da forma como são obtidos. Entretanto, quando finamente divididos, reagem com o hidróxido de cálcio em presença de água e na temperatura ambiente, dando origem a uma nova composição com propriedades aglomerantes. Por essa razão, os materiais pozolânicos são utilizados conjuntamente com o clínquer, pois o hidróxido de cálcio é um produto normalmente resultante da hidratação deste. A adição desse tipo de material modifica a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a difusibilidade iônica e a porosidade capilar, aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto (ABCP, 2002). Como neste trabalho o reforço do compósito são as fibras vegetais, facilmente atacadas pela alcalinidade do cimento, usando um cimento pozolânico buscou-se diminuir a alcalinidade da matriz.

Para a determinação das propriedades físicas e mecânicas do cimento, foram realizados os ensaios de tempo de pega do cimento de acordo com a norma NBR NM 65:2003 (ABNT,2003), determinação da massa específica conforme a NBR NM 23:1998 (ABNT,1998) , finura do cimento Portland por meio da peneira 75 µm (#200) de acordo com a norma NBR 11579:2012 (ABNT,2012) e resistência à compressão de acordo com a norma NBR 7215:1996 (ABNT,1996).

3.2.2 Areia

O agregado miúdo utilizado foi a areia natural, oriunda da região metropolitana de Belém. Para esse agregado foram realizados os ensaios de determinação da massa unitária no estado solto de acordo com a NBR NM 45:2006 (ABNT,2006), determinação da composição

granulométrica conforme a NBR NM 248:2003 (ABNT,2003) e determinação da massa específica de acordo com a NBR 9776:1988 (ABNT,1988).

3.2.3 Água

A água utilizada foi obtida da rede de abastecimento da cidade de Belém.

3.2.4 Fibra de Curauá

3.2.4.1 Determinação das propriedades físicas da fibra de curauá

Geometria das fibras

Para a fibra de curauá serão realizados ensaios para a determinação de seu diâmetro médio através de um paquímetro com precisão de 0,01 mm, medindo o mesmo duas vezes para cada extremidade e uma vez para cada centro, pois a fibra não tem a sua seção transversal perfeitamente circular. Também é preciso ter o cuidado de não esmagar a fibra com o paquímetro.

Massa específica

A massa específica da fibra de curauá foi medida através de uma proveta, com as fibras cortadas com comprimentos de 1 cm e 2cm, preparadas para realização do ensaio. A massa específica das fibras foi determinada através da pesagem de 50 g de fibra de curauá cortada a um comprimento de 10 mm, sendo secas em estufa até constância de massa, ou seja, entre duas pesagens consecutivas, espaçadas de 2 horas, não apresentaram variação maior que 0,1%. Dentro do frasco colocou-se 400 ml de água e 50 g de fibra como mostra a Figura 21.

Em imersão de 400 ml de água as fibras foram afundadas para saturar e deixadas por 24 horas antes de ser efetuada a leitura do volume de água deslocada como mostra a figura 22. Esse processo e tempo são necessários para que a água ocupe o lugar dos vazios da fibra.

Figura 21 – Fibra cortada e proveta com água.
Fonte: Própria Autora



Figura 22 – Fibras em imersão na água.
Fonte: Própria Autora



A partir da equação (1) obtém-se a massa específica, sendo (m) a massa em g, (Vf) o volume das fibras e (Vi) o volume inicial.

$$\mu = \frac{m}{V_f - V_i} \quad (1)$$

Teor de umidade

Para calcular o teor de umidade natural, secam-se ao ar, as fibras por cinco dias e depois em estufa por 24 horas, a temperatura de 105°C, pesando-as em balança eletrônica de precisão de 0,01g, sendo (m) a massa seca ao ar em g, e (m_s) a massa seca em estufa em g. Utiliza-se a equação (2) para se calcular o teor de umidade (H).

$$H = \frac{m - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad (2)$$

Absorção de água

Para o ensaio de absorção de água da fibra de curauá, pesa-se a fibra ao ar e em seguida coloca-se em imersão na água. Pesam-se as mesmas em intervalos de 5 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas e então se mede, num intervalo de 24 horas, até o sexto dia e a partir daí em intervalos de 48 horas até atingir saturação, ou seja, o peso não apresentar mais alteração. Utiliza-se a equação (3) para se calcular a absorção de água pelas fibras naturais, onde (m_h) é a massa úmida da fibra em g e (m) é a massa seca ao ar da fibra em g.

$$A = \frac{m_h - m_{100\%}}{m}$$

3.2.4.2 Determinação da resistência à tração da fibra de curauá

É essencial compreender as propriedades mecânicas dos materiais, para que não ocorram níveis inaceitáveis de deformação. O mesmo ocorre com a fibra de curauá, que ao ser utilizada como reforço de matrizes cimentícias, estará sujeita a forças ou cargas.

Para a determinação da tensão de tração na fibra foi utilizada a Norma ASTM D 3379-1989 como referência, porém o ensaio à tração em fibras vegetais ainda não é normatizado. Foi utilizada a máquina universal de ensaios com célula de carga com capacidade máxima de 2kgf ou 0,02 kN.

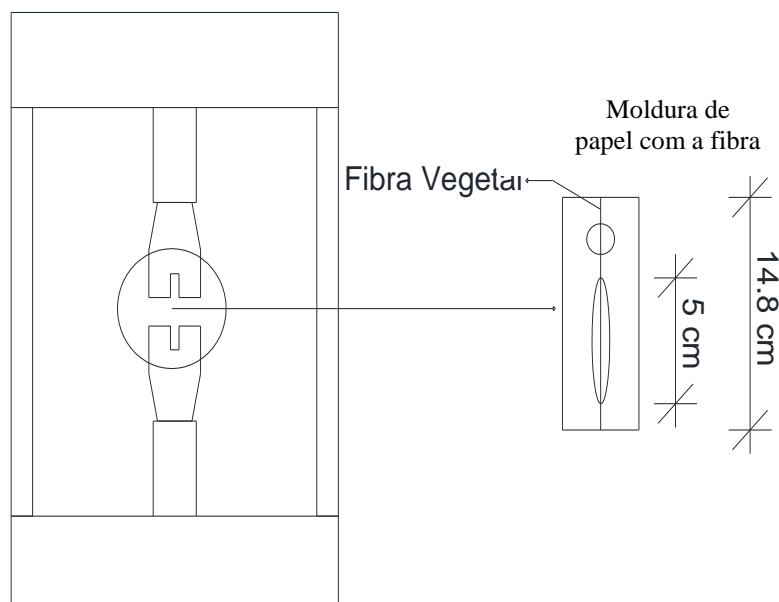
O método consiste em uma única fibra ser colocada em uma moldura confeccionada com uma folha de papel (Figura 23), onde existem dois orifícios, um circular e um alongado que respectivamente, um servirá para conter um trecho da fibra para determinação do diâmetro e o outro conterá o comprimento da fibra a ser tracionado.

A fibra será colocada na moldura, a qual fornece à fibra um comprimento de ancoragem suficiente para transmitir apenas o esforço de tração e também serão tomados os devidos cuidados para evitar o dilaceramento da fibra pelas garras da máquina.

Após fixar a fibra na moldura, ela será colocada nas garras da máquina e em seguida corta-se lateralmente a moldura, para que a carga de tração seja aplicada apenas à fibra.

Figura 23 – Esquema do ensaio de tração na fibra

Máquina Universal de ensaios



3.3 Produção das placas e telhas

3.3.1 Estudo de dosagem e produção dos corpos de prova

Para a confecção das placas e telhas de fibrocimento foi necessário ensaiar alguns traços para verificar o melhor desempenho. A partir dos dados obtidos com o ensaio de caracterização, foi utilizada a equação da fração volumétrica (Equação 4), para a determinação dos traços da argamassa, com os teores de fibras de 1 e 2,5% e comprimentos de 1 e 2 cm. Esses teores foram ensaiados com o propósito de utilizar frações volumétricas ainda pouco ensaiadas e comparar com a literatura atual.

$$V_f = \frac{m_{\text{fibras}}/\rho_{\text{fibras}}}{m_{\text{areia}}/\rho_{\text{areia}} + m_{\text{cimento}}/\rho_{\text{cimento}} + m_{\text{água}}/\rho_{\text{água}} + m_{\text{fibras}}/\rho_{\text{fibras}}} \quad \text{(E.4)}$$

Onde:

V_f = Fração volumétrica de fibras

m_x = massa de material em g

ρ_x = massa específica de material em g/cm^3

Antes da pesagem, os materiais constituintes da mistura passaram por alguns processos. A areia foi seca em estufa até constância de massa. A fibra vegetal de curauá também foi seca em estufa até constância de massa, e cortada em comprimentos iguais a 1 e 2 cm para cada tipo de ensaio e mistura.

Os materiais constituintes assim preparados foram levados a uma betoneira para proceder à mistura. Primeiramente, foram misturados o cimento e a areia seca, seguindo-se da adição da água, aos poucos, até a obtenção de uma certa plasticidade para a argamassa. Logo após, foram adicionadas as fibras, também aos poucos, até que a mistura atingisse a homogeneização total.

A designação dos corpos-de-prova do programa experimental é apresentada na Tabela 9. As seguintes abreviações serão usadas para representar o tipo, comprimento e a fração volumétrica das fibras na mistura:

- As duas letras iniciais: CP – corpo-de-prova
- A terceira letra – tipo de fibra:

R – Referência

C – Curauá

- Os dois algarismos seguintes – comprimento da fibra em mm
- A porcentagem após o hífen – fração volumétrica da fibra

Tabela 9 – Programa experimental das misturas.

Abreviação	Traço(em peso) Cimento:areia:água/cimento	Tipo de Fibra	Volume de Fibra (%)	Comprimento (mm)
CPR00-0%	1:1:0,50	-	-	-
CPC10-1%	1:1:0,50	Curuá	1	10
CPC10-2,5%	1:1:0,50	Curuá	2,5	10
CPC20-1%	1:1:0,50	Curuá	1	20
CPC20-2,5%	1:1:0,50	Curuá	2,5	20

3.3.2 Propriedades mecânicas das misturas

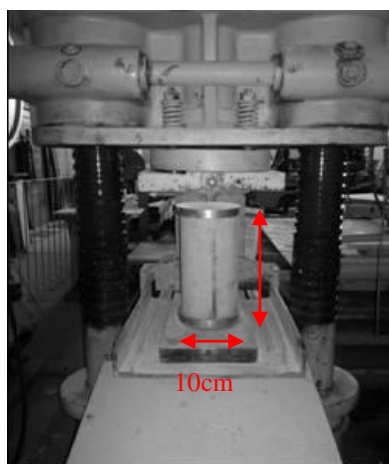
3.3.2.1 Ensaio à compressão simples e módulo de elasticidade

Foram realizados ensaios de compressão e módulo de elasticidade nas misturas conforme o programa experimental apresentado na Tabela 10. Os ensaios de compressão foram realizados na máquina universal de ensaios, Figura 24a, e o ensaio do módulo de elasticidade, na prensa hidráulica, Figura 24b, ambas as máquinas presentes no LEC-Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

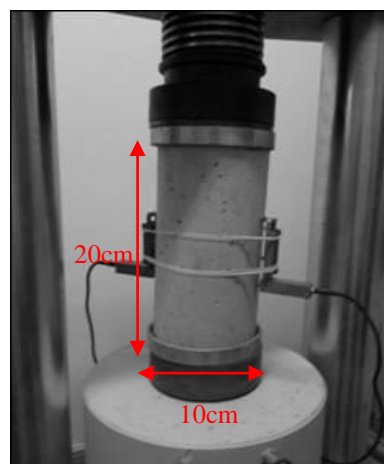
Tabela 10 – Ensaio de Resistência à compressão e Módulo de elasticidade - Programa experimental das misturas.

CONCRETOS	Resistência à compressão axial – 28 dias	Módulo de Elasticidade – 28 dias
CPR00-0%	3	3
CPC10-1%	3	3
CPC10-2,5%	3	3
CPC20-1%	3	3
CPC20-2,5%	3	3
Número de CPs	15	15
Total		30

Figura 24 – (a) Ensaio à compressão simples, (b) Ensaio de módulo de elasticidade.



(a)



(b)

3.3.3 Sistematização de produção

De acordo com os resultados dos ensaios de compressão e módulo de elasticidade, foi verificado que a mistura com fração volumétrica de 1% e comprimento da fibra de 1cm, apresentou a melhor trabalhabilidade, para serem produzidas as placas e telhas de fibrocimento.

O preparo da argamassa para a confecção das placas e telhas foi feito conforme já descrito no item 3.2.1.

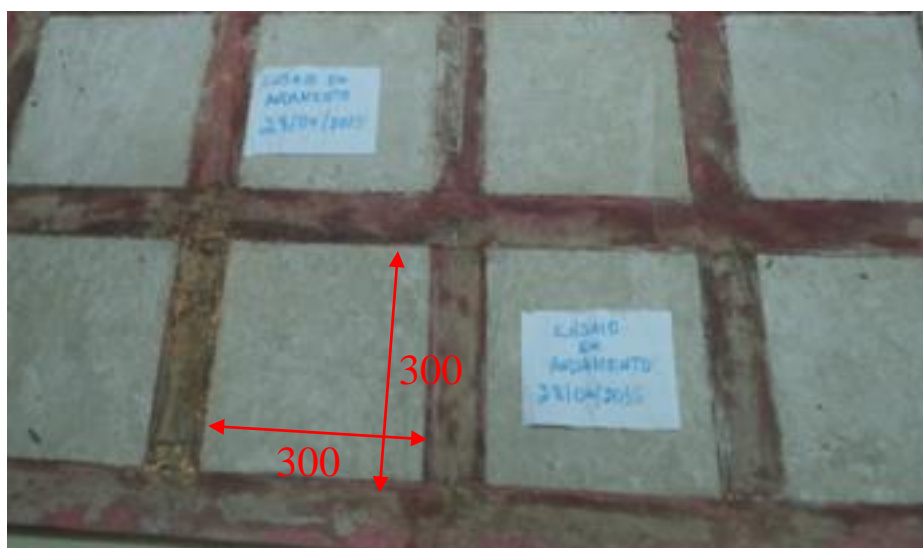
3.3.3.1 Moldagem das placas

Foi confeccionada uma forma em madeira com capacidade para moldar 8 corpos-de-prova simultaneamente, com dimensões das placas conforme a norma NBR 15498 - Placa plana cimentícia sem amianto (ABNT 2014). A Tabela 11 apresenta o programa experimental.

Tabela 11 – Programa experimental dos ensaios.

Placas cimentícias	Dimensões	Ensaio de resistência à tração na flexão – aos 28 dias
Placa de referência (sem fibra)	300mm x 300mm x 10mm	2
Placa de referência (sem fibra)	300mm x 300mm x 10mm	2

Figura 25 – Placas cimentícias moldadas em processo de cura. Fonte: Própria Autora



3.3.3.2 Moldagem das telhas

As telhas foram moldadas conforme o esquema da Figura 26.

Figura 26 – Processo de produção das telhas

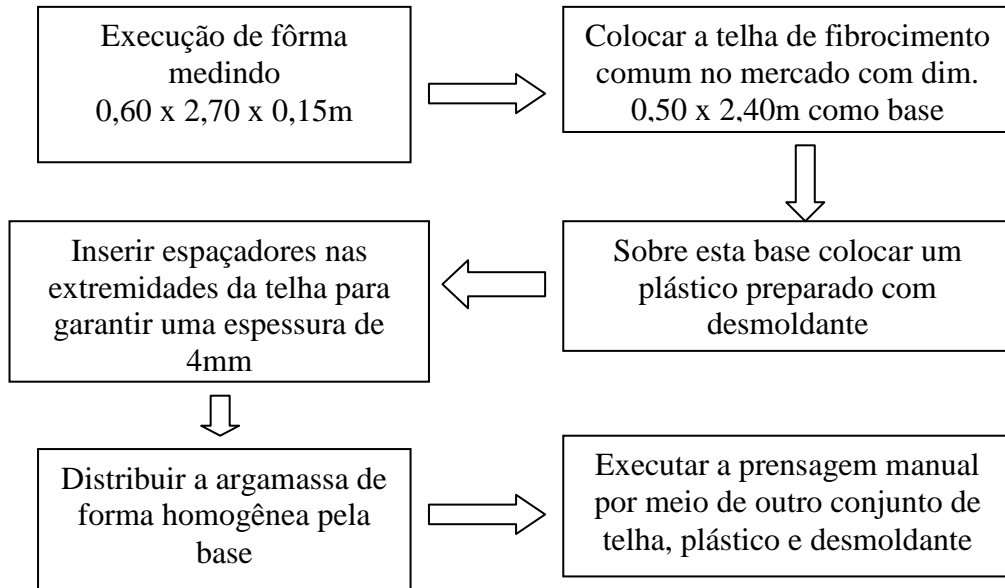


Figura 27 – Forma para moldagem da telha. Fonte: Própria autora

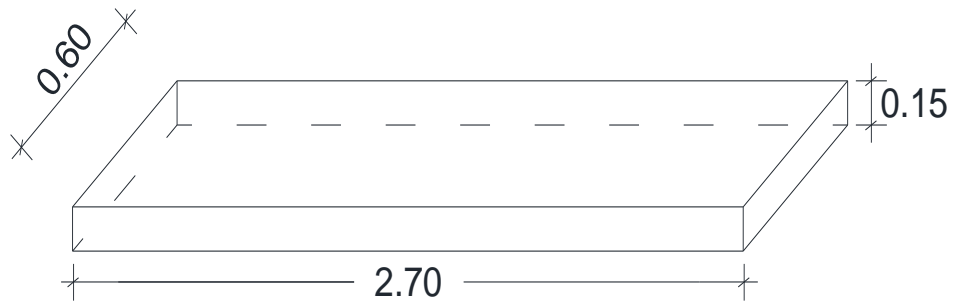


Figura 28 – Telha já moldada em processo de cura. Fonte: Própria autora



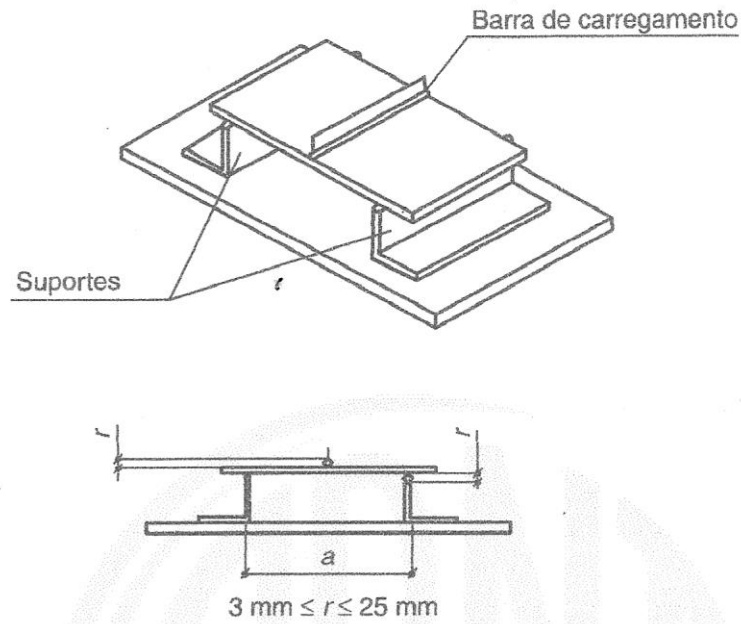
3.3.4 Propriedades mecânicas das placas e telhas

3.3.4.1 Ensaio de resistência à tração na flexão em placas de fibrocimento

Segundo a NBR 15498 (ABNT, 2014), este ensaio tem por objetivo avaliar as tensões de resistência à tração na flexão de placas de cimento reforçado com fibras, fios, filamentos ou telas.

Para a realização deste ensaio, o corpo de prova foi apoiado sobre os suportes conforme mostra a Figura 29, com sua face que deve ficar exposta, na instalação em obra, voltada para cima, de forma que a carga seja aplicada ao longo de sua linha mediana por meio da barra de carregamento. A carga foi aplicada no corpo de prova para que a ruptura ocorresse no intervalo de 10s a 30s, conforme estabelece a norma.

Figura 29 - Disposição da placa para o ensaio. Fonte: ABNT NBR 15498:2014.



A resistência à tração na flexão, R_f , é calculada pela equação a seguir:

$$R_f = \frac{3P_{\text{máx}} \times L}{2b \times e^2}$$

Onde:

R_f = é a resistência à tração na flexão, expressa em megapascals (MPa);

$P_{\text{máx}}$ = é a carga de ruptura por flexão, expressa em newtons (N);

L = é a distância entre eixos dos suportes, expressa em milímetros (mm);

b = é a largura do corpo de prova, expressa em milímetros (mm);

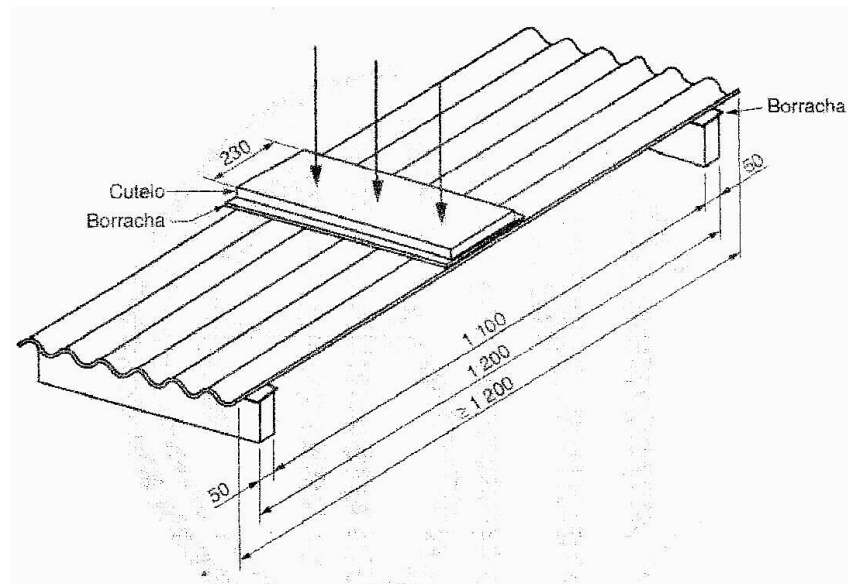
e = é a espessura média do corpo de prova (média aritmética das medidas), expressa em milímetros (mm).

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado na prensa hidráulica, capacidade máxima de 200 toneladas.

3.3.4.2 Ensaio de resistência à tração na flexão em telhas de fibrocimento

Segundo a NBR 7581-2 (ABNT, 2012), o corpo de prova deve ser colocado sobre os apoios (face superior em compressão) perpendicularmente à direção das ondas e deve ser carregado em seu centro pelo cutelo, com uma repartição uniforme da carga aplicada em seu centro, após interposição das mantas de material flexível (borracha), conforme figura 30. A carga de ruptura, que corresponde à carga máxima alcançada no decorrer do ensaio de flexão, deve ser obtida entre 10s e 45s após o início da aplicação da carga.

Figura 30: Disposição da telha para o ensaio. Fonte: ABNT NBR 7581-2:2012.



A carga de ruptura à flexão (P_c), expressa em newtons por metro de largura, é dada pela equação:

$$P_c = \frac{P}{W}$$

Se o vão (l) for diferente de 1,10m, a carga de ruptura à flexão (P_c) relativa à largura, para comparação com os valores estabelecidos na ABNT NBR 7581-1, deve ser calculada pela equação:

$$P_c = \frac{P}{W} * \frac{1,1}{l}$$

Onde:

P_c = é a carga de ruptura à flexão por metro de largura, expressa em newtons por metro (N/m);

P = é a carga de ruptura à flexão, expressa em newtons (N);

W = é a largura da telha, expressa em metros (m);

l = é o vão livre, expresso em metros (m).

Após a telha moldada não foi possível realizar o ensaio conforme as dimensões estabelecidas na norma, pois a telha apresentou fissuras em alguns pontos. Então se optou por utilizar os mesmos parâmetros das placas cimentícias, sendo retirados corpos de prova da telha moldada para a realização do ensaio de tração na flexão. O ensaio foi realizado na prensa hidráulica, capacidade máxima de 200 toneladas.

3.3.5 Microscopia dos compósitos com fibras de curauá

Foi realizada análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos compósitos. Buscou-se observar suas características de forma, dimensões e aspecto superficial. Superfícies de fraturas dos corpos-de-prova ensaiados à flexão, foram também observadas, visando obter informações qualitativas sobre o modo de ruptura desses materiais. Além disso, procurou-se examinar o arranjo e a distribuição das fibras no interior da matriz.

Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Microscopia da Engenharia Química da UFPA, sendo utilizado o MEV modelo TM 3000 da Hitachi que captura imagens por meio de elétrons retroespalhados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do cimento e agregado miúdo

O valor da massa específica do cimento foi de 3,03 g/m³ estando ligeiramente inferior ao valor padrão de 3,15 g/cm³. O índice de finura do cimento CP IV analisado foi de 10%, e está dentro do padrão que é menor que 15%. Os resultados do ensaio do tempo de pega encontrados foi de 1 hora e 15 minutos para o início da pega e de 10 horas e 40 minutos para o final da pega.

Sobre a areia, o resultado final foi 2,66 g/cm³ de massa específica, que está dentro do padrão de por volta de 2,65 g/cm³. A massa unitária foi de 1,56 g/cm³, estando este dentro do valor esperado que é de 1,5 g/cm³.

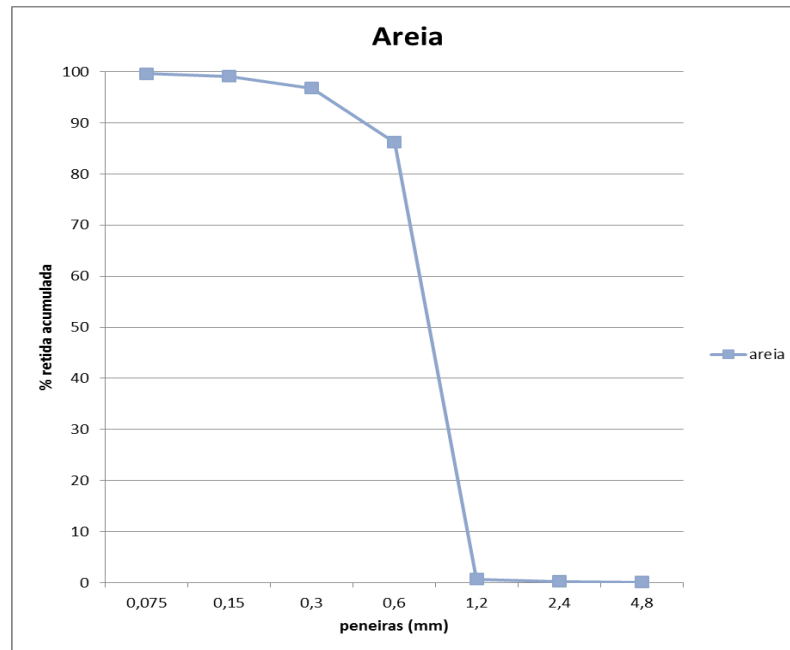
O ensaio granulométrico está de acordo com a tabela 12 que apresenta os resultados.

Tabela 12- Granulometria. Fonte: Própria.

Peneira	Malha #(mm)	Resíduos		Resíduo Acumulado	
		Peso	Porcentagem	Passou	Retido
4	4,8	1	0,1	99,9	0,1
8	2,4	1	0,1	99,8	0,2
16	1,2	5	0,5	99,3	0,7
30	0,6	855	85,5	13,8	86,2
50	0,3	106	10,6	3,2	96,8
100	0,15	23	2,3	0,9	99,1
200	0,075	5	0,5	0,4	99,6
Fundo	-	0	0	0	0
Totais		1000g			
Diâmetro máximo		0,6 mm			
Módulo de finura		2,831			

Dessa maneira, podemos concluir que pelos resultados do quadro, a areia é classificada como média, pois seu módulo de finura está entre 2,40 e 3,30.

Figura 31- Curva granulométrica da areia. Fonte: Própria.



4.2 Caracterização da fibra de curauá

Sobre a geometria da fibra de Curauá, as 20 amostras usadas apresentaram valores de 0,092 mm. Apesar de o método usado ser questionado por sua imprecisão comparado com o método do microscópio, é o mais utilizado nos trabalhos de caracterização de fibra vegetal das literaturas.

Os resultados encontrados em laboratório para o teor de umidade foi 11,47% e massa específica foi 1,34 g/cm³.

A tabela 13 apresenta os valores de absorção de água das contagens referentes aos intervalos de tempo expostos na metodologia. A tabela também apresenta os índices de absorção da água, calculados um a um segundo os intervalos de tempo da pesagem através da Equação (3).

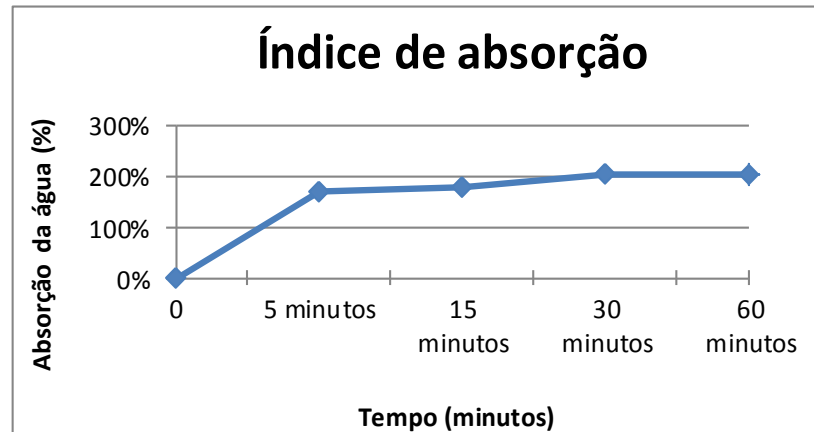
A Figura 32 mostra o gráfico de evolução da absorção de água na fibra até a primeira hora de imersão, tomando por base a porcentagem da primeira hora podemos perceber que com 30 min. a fibra já estava saturada e nos primeiros 15 min. já tinha 83% de absorção.

Segundo Pimentel e Savasto (1997), em geral as fibras atingem mais de 50% de sua capacidade higroscópica logo nos primeiros 15 minutos de contato com a água, o que confirma os resultados presentes desse trabalho.

Tabela 13 – Dados obtidos em laboratório no ensaio de absorção

Tempo	Pseco (g)	Pum. (g)	I abs. (%)
5 minutos	1,36	3,67	169
15 minutos	1,83	5,10	178
30 minutos	1,94	5,90	204
60 minutos	2,05	6,20	202
24 horas	1,04	5,30	409

Figura 32 – Gráfico Tempo x Absorção de água da fibra de curauá. Fonte: Própria Autora



A seguir pode ser analisado o diagrama de tensão-deformação sob tração de um exemplar da fibra de Curauá como mostra a Figura 33. E a tabela 14 apresenta os valores das propriedades mecânicas restritas a fibra de Curauá.

Figura 33 – Gráfico do Diagrama Tensão x Deformação da fibra de curauá. Fonte: Própria autora

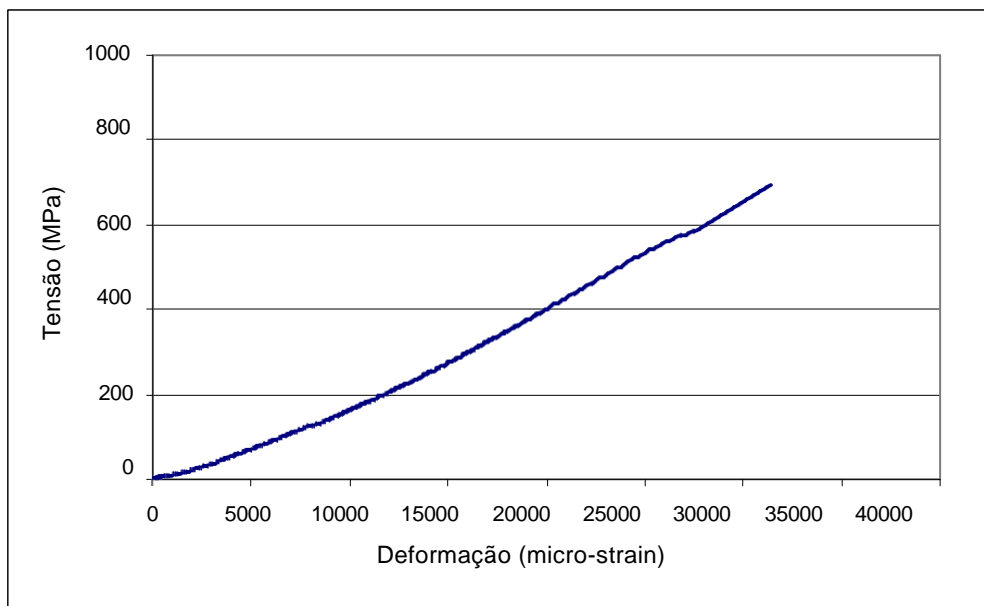


Tabela 14 – Valores restritos a fibra de curauá. Fonte: Própria autora

Propriedade	Valores
Resistência á tração (MPa)	698
Módulo de elasticidade (GPa)	11,54
Deformação na ruptura (%)	3,02

Comparando-se o valor encontrado da resistência à tração da fibra de curauá com o encontrado por Toledo Filho (1997) e Savastano Jr. (2000) para a fibra de sisal, fibra muito utilizada para compósitos, que foi de 577,50 Mpa e 378 Mpa respectivamente, se percebe a superioridade do curauá. E ainda fazendo uma comparação com o polipropileno, fibra artificial, que apresenta resistência à tração de 250 Mpa (Savastano Jr., 2000), comprova-se que é um bom reforço para compósitos cimentícios.

4.3 Ensaios de compressão e módulo de elasticidade das misturas

A Tabela 15 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial e módulo de elasticidade realizados nos corpos de prova de argamassa sem e com adição da fibra de Curauá na idade de 28 dias. Foi observado que apesar do aumento da resistência em relação à referência, o módulo de elasticidade também aumentou e isso se deve à capacidade do compósito de absorver carga. As figuras 34 e 35 mostram os gráficos com os resultados comparados para os diferentes teores utilizados de fibra.

O índice de consistência da argamassa reforçada com fibra de curauá foi de 260 mm, para a fração volumétrica de 1% e comprimento de 1 cm, o que significa que é uma argamassa com boa trabalhabilidade. Sendo assim, esta mistura foi escolhida para moldar as placas e telhas já que é um processo manual.

Tabela 15 – Resistência à compressão axial e modulo de elasticidade.

Amostras	Resistência a compressão (MPa) - CV(%)	Modulo de elasticidade (GPa) - CV (%)
CR	33,13 – 24%	19,53 – 7,9%
CPC10-1%	54,61 – 2,3%	22,55 – 1,1%
CPC20-1%	47,62 – 0,6%	22,38 – 6,9%
CPC10-2,5%	36,80 – 10,9%	20,12 – 4,9%
CPC20-2,5%	37,71 – 12,0%	19,47 – 12,5%

Figura 34 – Gráfico comparativo das resistências à compressão. Fonte: Própria.

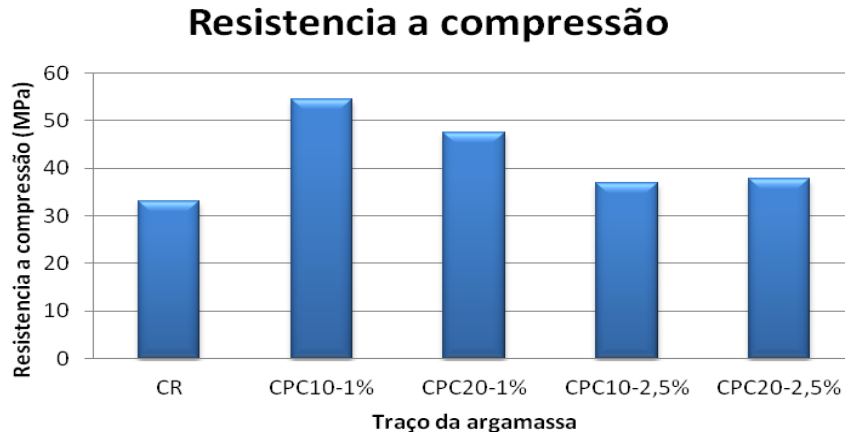
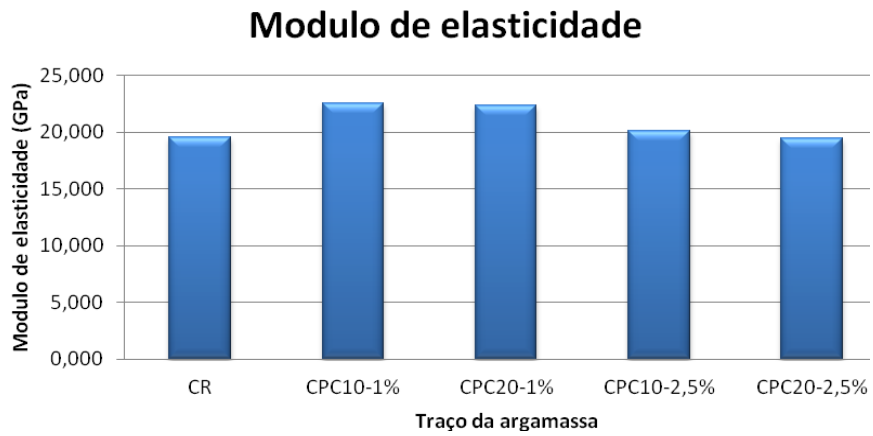


Figura 35 – Gráfico comparativo dos módulos de elasticidade. Fonte: Própria.



4.4 Ensaio de tração à flexão nas placas

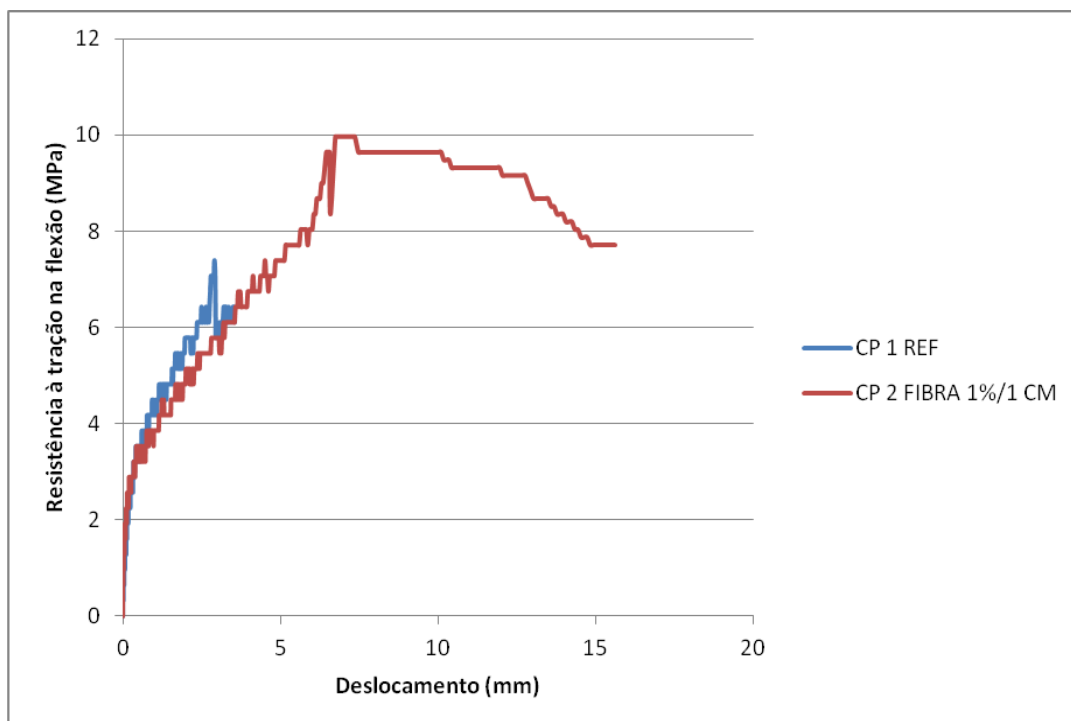
Obtidas as cargas de ruptura sob flexão, foram calculadas as resistências médias à tração na flexão das placas cimentícias com fibras de curauá e nas placas sem a fibra para compararmos. A tabela 16 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 16 – Ensaio de tração à flexão na placa

Placas cimentícias	Deslocamento (mm)	Resistência à tração na flexão (MPa)
Placa de referência (sem fibra) – CP 1 REF	2,90	7,39
Placa com fibra – CP 2 1%/1cm	7,35	9,97

O valor medido da carga máxima teve uma melhoria considerável com a adição das fibras de Curauá na matriz cimentícia, o que vem comprovar a capacidade das fibras de absorver energia. As figuras 44 mostram o gráfico das misturas.

Figura 36 – Ensaio de tração à flexão aos 28 dias. Fonte: Própria autora



A presença da fibra muda o modo de ruptura do material (a ruptura não é instantânea como observada para a matriz) e aumenta a sua capacidade de absorver energia.

4.5 Ensaio de tração à flexão nas telhas

Foram calculadas as cargas de ruptura à flexão dos corpos-de-prova das telhas com fibra e sem fibra. A tabela 17 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 17 – Ensaio de tração à flexão na telha

Telhas	Deslocamento (mm)	Carga de ruptura à flexão (N/mm)
Telha referência (sem fibra)	0,425	9,64
Telha com fibra	1,45	14,28

Os corpos de prova sem reforço apresentaram uma ruptura frágil, com comportamento explosivo, onde a carga máxima coincide com iniciação da trinca. Os compósitos reforçados com fibras apresentaram um desempenho satisfatório, cerca de 49% maior que a telha de referência. Quanto à deformação, as fibras funcionam como ponte de transferência de tensões quando solicitada ao carregamento, proporcionando ao compósito maior capacidade de deformação. A figura 37 mostra o gráfico do ensaio de tração à flexão comparando os resultados das amostras sem fibra e com fibra e a figura 38 mostra a telha logo após o ensaio, sendo possível visualizar a ponte de ruptura da fibra-matriz.

Figura 37 – Gráfico de ensaio de tração à flexão aos 28 dias. Fonte: Própria autora.

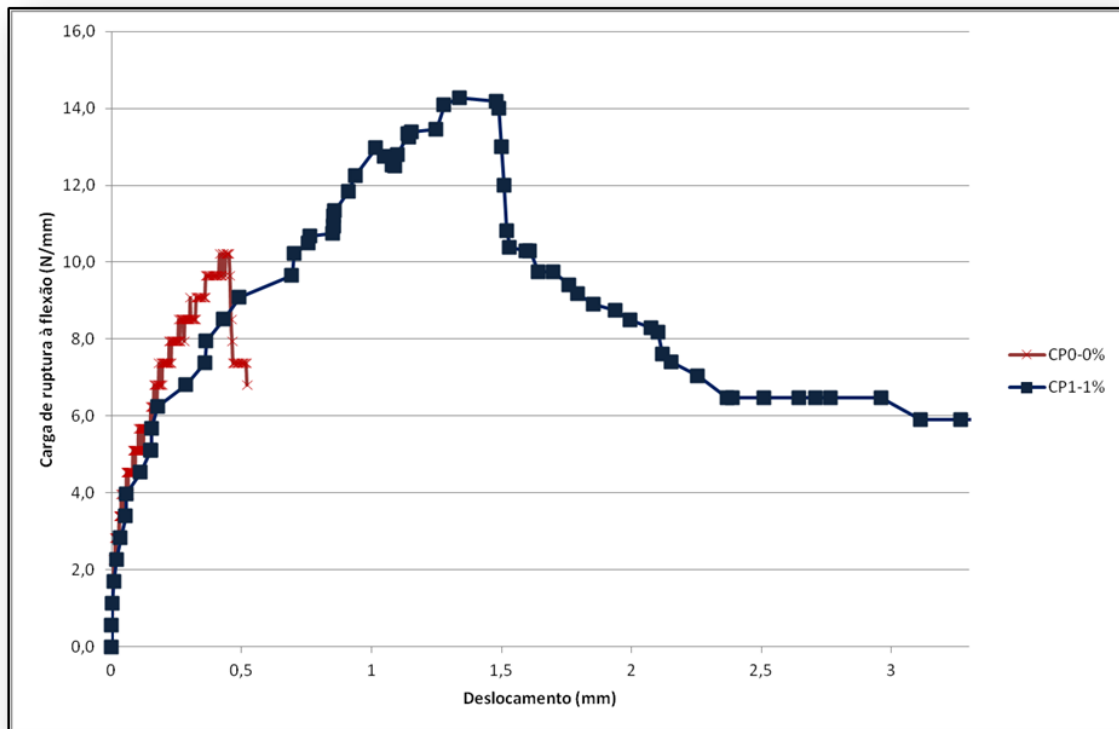


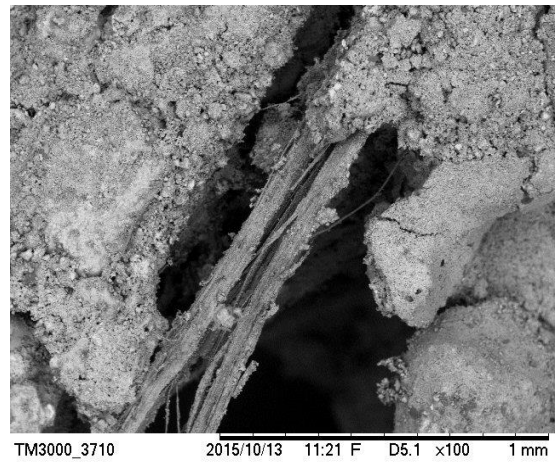
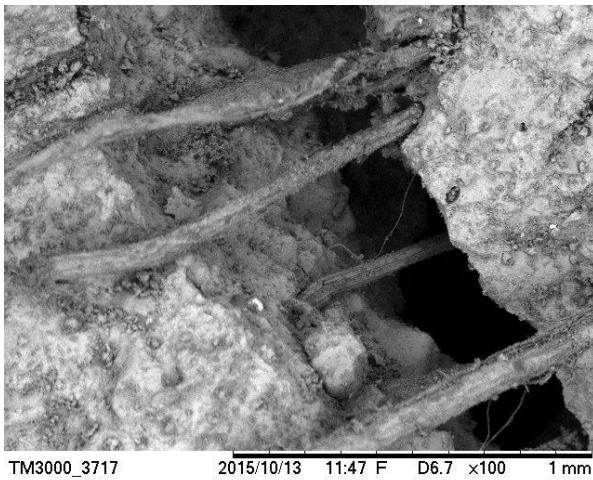
Figura 38 – Ponte fibra-matriz após o ensaio. Fonte: Própria autora.



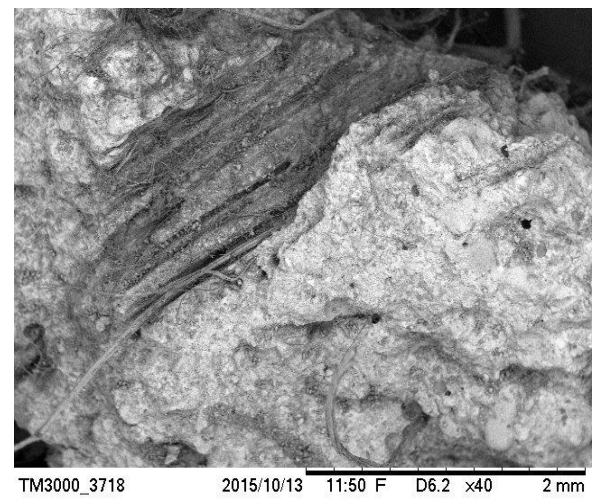
4.6 Análise da microestrutura do compósito com fibras de curauá

Amostras de compósitos (após ensaios à flexão), foram observadas ao microscópio eletrônico de varredura (MEV). Pôde ser observado a ponte de transferência entre a matriz e a fibra de curauá, responsável pela absorção de energia e maior deformação até a ruptura total e também a forma como a fibra se apresenta após o rompimento, sem a macrofibra, somente as fibrilas. A Figura 39 (a-d) mostra a microscopia do compósito cimentício com a fibra de curauá.

Figura 39 a-d– Microscopia do compósito após o ensaio de flexão. Fonte: Própria autora.



a - b Ponte de ligação fibra-matriz



c - d Ponte de ligação fibra-matriz

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos dos ensaios realizados, concentrados na aplicação de fibras de curauá em matrizes cimentícias para a fabricação de telhas e placas cimentícias, depois de compilados e analisados, permitiram o alcance das conclusões a seguir apresentadas.

Em relação ao estudo de dosagem verificou-se que a mistura com fração volumétrica de 1% e comprimento de 1cm, apresentou melhor trabalhabilidade e por isso foi escolhida para moldar as placas e telhas de fibrocimento.

Em relação às propriedades mecânicas dos corpos de provas ensaiados, verificou-se que as fibras de curauá proporcionaram aumento na resistência a compressão em cerca de 64% em relação a argamassa sem fibra.

Com relação à moldagem das telhas para o ensaio de tração à flexão, observou-se que as telhas fissuraram em alguns pontos, não sendo possível fazer o ensaio com as dimensões conforme a NBR 7581 (ABNT,2012), tendo que ser adotado parâmetros de ensaio semelhante às placas cimentícias. Concluindo-se que é necessário fazer um novo estudo sobre o traço adotado e/ou dimensões da telha.

Nos ensaios de resistência à tração na flexão, foi observado que a energia suportada por uma placa com fibras é cerca de 46% maior que a energia suportada por uma placa sem fibras. No caso das telhas foi observada uma carga de ruptura em torno de 49% a mais que a carga de ruptura da telha sem fibra. Comprovando a influência das fibras na capacidade de deformação dos compósitos.

Dessa forma, os ensaios preliminares demonstraram que o propósito tem grandes possibilidades de ser alcançado, baseado na literatura existente e que, no entanto, são necessários outros ensaios para as placas, assim como para as telhas, de modo que a eficiência possa ser comprovada por norma e seja comparado com os materiais convencionais.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos resultados que foram obtidos neste trabalho e de todos os conhecimentos que foram adquiridos ao longo de sua realização, pode-se fazer algumas sugestões para o desenvolvimento de novos estudos:

- Realizar ensaios de tração por compressão diametral além da resistência à compressão nas misturas com frações volumétricas de 1 e 2,5% e comprimento de fibra de 1 e 2cm;

- Verificar novas dimensões de placas bem como realizar ensaios de impacto e de absorção de água;
- Realizar ensaios de variação dimensional e permeabilidade nas placas com fibra de curauá para a aplicação em pisos internos;
- Verificar novas dimensões de telha e traço de argamassa a fim de minimizar e/ou eliminar fissuras;
- Realizar ensaios de durabilidade nas placas e telhas com fibra de curauá;
- Verificar a influência da fibra de curauá em relação ao conforto térmico de ambientes cobertos com telhas compósitas;
- Realizar uma análise de custo das placas e telhas reforçadas com fibra de curauá e comparar com as placas e telhas existentes no mercado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AGOPYAN, V.; SAVASTANO Jr., H.; JOHN, V. M., CINCOTTO, M. A. **Developments on vegetable fibre – cement based materials** in São Paulo: an overview. *Cement and Concrete Composites*, v. 27, p. 527 – 536, 2005.

AMARASEKERA, J.; SANTOS, J. C. G.; MANO, B.; PAOLI, M. A. **The Curauá Challenge: Optimizing fibers.** *Plastics Adtives e Compounding*, 2009.

AQUINO, R.C.M.P., Desenvolvimento de Compósitos de Fibras de Piaçava da Espécie *Attalea funifera* Mart e Matriz de Resina Poliéster, Tese de D.Sc., UENF, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil, 2005.

ARAÚJO, J.R. Compósito de Polietileno de Alta Densidade Reforçado com fibra de curauá obtidos por Extrusão e Injeção. Dissertação de mestrado em Química Inorgânica da UNICAMP, São Paulo, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Perguntas mais frequentes.** Disponível em: <http://www.abcp.org.br/faq.htm#resp6> Acesso em: 02 jan. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). **Perguntas mais frequentes.** Disponível em: http://www.abcp.org.br/duvidas_frequentes.shtml. acesso em 21 de julho de 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** NBR 7217. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária.** NBR 7217. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman - Método de ensaio.** NBR 9776. Rio de Janeiro, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação do tempo de pega.** NBR NM 65. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** NBR 7215. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cimento Portland - Determinação da finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. NBR 7215. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. NBR 7222. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Método de ensaio para determinação da massa específica de Cimentos**. NBR-6474. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placa de fibrocimento sem amianto – Requisitos e métodos de ensaio**. NBR 15498. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Telha ondulada de fibrocimento Parte 2: Ensaio**. NBR 7581-2. Rio de Janeiro, 2012.

BANNA, W.R.; FUJIYAMA, R.T.; SANTOS, I. P.; PEREIRA, L.C.O. **Fibras de Bananeira como material de Engenharia**. Artigo Científico, COBENGE, 2011.

BARROS, Alysson, R. F. **Compósitos híbridos: Desenvolvimento de configuração e feitos de umidificação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UFRN, Natal, 2006.

BERNARDI, S. T. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibras de aramida kevlar**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

BENATTI, Julio César; CAMARINI, Gladis; PEREIRA, Valdir; **Permeabilidade de Concretos com Diferentes Relações de A/C**. Unicamp, 2007.

BENTUR, A. e MINDESS, S., **Fiber Reinforced Cementitious Composites**, Elsevier Applied Science, U. K., 1990.

BLEDZI, A. K.; GASSAN, J. **Composites reinforced with cellulose based fibres**. Progress in polymer science, Oxford, v. 24, n.2, p. 221-274, 1999.

BERALDO, Antônio, L.; CHEN, Felix, K. C. H.; AZZINI, Anísio. Telhas onduladas de bambu – cimento. **Encontro Nacional sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis**, 10 p., São Carlos, 2003.

BERALDO, A.L.; VIEIRA, F.F. Argamassa com Adição de Fibras de Sisal. Artigo Científico, **V Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas**, p 1 – 9, São Paulo, 2003

BETIOLI, A. M. **Degradação de fibras de PET em Materiais à base de Cimento Portland**. Dissertação (Mestrado). UFSC, Florianópolis, 2003.

BILCATI, Géssica Katalyne. **Produção de painéis de cimento Portland reforçados com fibra de curauá (Ananas erectifolius)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CALLISTER, W.D. JR. Livro: **Ciência e Tecnologia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 705p. (2007).

CALLISTER, W. D. JR. Livro: **Materials Science and Engineering - Introduction**. 2. ed. Jonh Wiley and Sons, Canadá p. 445, 2002.

CARNEIRO, V. L. **Perspectivas do Aproveitamento de Resíduo de Casca de Coco em Produtos de Fibrocimento**. Feira de Santana, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ambiental. UEFS.

CARNEIRO, V.L., LIMA, P.R.L, LEITE, M.B. **Perspectivas do aproveitamento de resíduo de casca de coco em produtos de fibrocimento**. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife, 2009.

CASTRO, P. O. **Biocompósitos a partir de Biopolietileno de alta densidade reforçado com fibra de curauá**. Dissertação (Mestrado). USP, São Carlos, 2010.

CENTRO DE APOIO A PROJETOS DE AÇÃO COMUNITÁRIA: CURAUÁ Produção Agroecológica, Beneficiamento, Comercialização, Santarém – Pará, 2010.

CENTRO DE APOIO A PROJETOS DE AÇÃO COMUNITÁRIA. Disponível em: <<http://www.ceapac.org.br/exibir-atividades.php?id=9>>. Acesso em : 08 de novembro de 2013.

CEPLAC (Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira), 2012. Disponível em: <http://www.ceplac.gov.br/radar/piacava.htm> (Acesso: 12/09/2012).

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) Conjuntura mensal Ministério da Agricultura, pecuária e abastecimento, 2012. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/busca.php?filtro=> (Acesso 12/09/2012).

COOK, D.J., **Concrete and Cement Composites Reinforced with Natural Fibres, Concrete, International, Ci80, Fibrous Concrete**. The Concrete Society, the Construction Press, UK, 99-114,1980.

CORRÊA, A. C.; TEIXEIRA, E. M.; MARCONCINI, J. M.; PESSAN, L. A.; MATTOSO, L. H. Nanofibras de celulose a partir de fibras de curauá. Congresso Brasileiro de Polímeros, 2009.

COSIBRA - Companhia Sisal do Brasil, Disponível em:<http://www.cosibra.com.br/materia-prima.php> – (Acesso: 11/12/2011).

COSTA M. R.; LAMEIRA, O. A.; YOSHINO, V.C. **Caracterização genética do Curauá Ananas erectifolius através de marcadores para RAPD**. Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento, n° 26, jun, 2002.

COUTTS, R. S. P. **Wood Fibre Reinforced Cement Composites, Natural Fibre Reinforced Cement and Concret**. Vol. 5, Edited by R. N. Swamy, Blackie and Son Ltd, London, pp. 1-62, 1988.

DE LIMA, B. S. et al. **Influência da fibra de curauá em compósitos cimentícios:**

verificação da resistência à flexão e da resistência à compressão. Revista de iniciação científica da ULBRA, p. 225–236, 2011.

ERENO, D. Fibra para toda obra. **Revista Tecnológica Novos Materiais**, FADESP. Belém, Ed. 104, p 70 – 75, 2004.

FERRAZ, J. M. **Produção e propriedades de painéis de fibra de coco verde (Cocos nucifera L.) Em mistura com cimento portland.** [s.l.] Universidade de Brasília, 2011.

FERREIRA, J.F.; SBRUZZI, D.; BARROS, K.V.G.; MACHADO, I. S.; TAMBOURGI, E.B. **Extração e Caracterização de uma Enzima Proteolítica do Curauá (Ananas erectifolius).** Artigo Científico, Exacta, v 8, n 2, p 179 – 184, São Paulo, 2010.

FILHO, N. T. D. A. et al. **Resistência mecânica de compósitos cimentícios leves utilizando resíduos industriais e fibras de sisal.** Revista Brasileira de engenharia agrícola e ambiental, v. 16, n. 8, p. 894–902, 2012.

FRAXE, T. J. P., PEREIRA, H. S., WITKOSKI, A. C. Comunidades Ribeirinhas Amazônicas: Modos de vida e uso dos recursos naturais, Projeto PIATAM, Ed. EDUA Vol. 2, 2007.

FUJIYAMA, R. T. **Argamassa de Cimento Reforçada por Fibras de Sisal: Caracterização Mecânica e Microestrutural.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia PUC-Rio, 1997.

GHAVAMI, K. e TOLEDO FILHO, R. D.. **Desenvolvimento de Materiais de Construção de Baixo Custo de Energia usando Fibras Naturais, Terra e Bambu,** Revista Engenharia Agrícola 1(1) Editora Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola pp.1-19, 1992.

GOMES, A.; MATSUO, T.; GODA, K.; OHGI, J. **Development and effect of alkali treatment on tensile properties of curaua fiber green composites.** Composites Part A - Applied Science and Manufacturing, 38 (8), pp. 1811-1820, 2007.

GRAM, H. E. **Durability of Natural Fibers in Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute.** Research Fo. 1:83, 225 pp, 1983.

GUIMARÃES, S. S. **Some experiments in vegetable fiber-cement composites.** Informe Técnico do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento-CEPED. [S.l.]: CEPED, ano 2, n.30, set. 1987.

HANNANT, D.J. **Fibre cements and fibre concretes.** Chichester, John Wiley, 1978.

HELENE, P. Terzian, P. **Manual de dosagem e controle de concreto.** São Paulo: PINI, 1993.

HYSOL GRAFIL, Carbon Fibers, Resins and specialty Prepregs, **GRAFIL TEST METHODS**, Section 1.0 – Fibras, Test Reference 101.13, “Filament Tensile Strength and Modulus”, Properties, April 1977.

HULL, D.; CLYNE, T. W. **An Introduction to Composite Materials**, 2 ed. Cambridge, Inglaterra, Cambridge Univ. Press. 1996.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em:<http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1631&id_pagina=1>. Acesso: 17 de dezembro de 2010.

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

JHON, V. M., CINCOTTO, M. A., SJOSTROM, C., AGOPYAN, V., OLIVEIRA, C. T. A. Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre, *Cement & Concrete Composites*, v. 27, p. 565-574, 2005.

KABIR, M. M.; LAU, H. W. K. T.; CARDONA, F. Chemical treatments on plant – based natural fibre reinforced polymer composites. Elsevier. *Composites: Part B*, v. 43, p. 2883 – 2892, 2012.

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria.** São Paulo, 2001. p. 199. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. PCC. USP.

LOPES, F.F.M.; ARAUJO, G.T.; NASCIMENTO, J.W.B.; GADELHA, T. S.; SILVA, V.R. **Estudo dos efeitos da acetilação em fibras de sisal.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n. 7, p. 783-788, 2010.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M.. *Concreto – Estrutura, propriedades e materiais.* Ed. PINI, São Paulo, 1994.

MILANESE, A. **“Caracterização de compósitos de Matrizes Poliméricas Reforçadas com fibras de sisal e de vidro”.** Dissertação de Engenharia Mecânica da UNIP de Guaratingetá, São Paulo, 2008.

MONTEIRO, S.N.; AQUINO, R.C.M.P; LOPES, F.P.D; CARVALHO, E.A.; ALMEIDA, R.M. **Comportamento e Características Estruturais de Compósitos Poliméricos Reforçados com fibras contínuas e alinhadas de Curauá.** *Revista Matéria*, v 11, n 3 p 197 – 203, Rio de Janeiro, 2006.

MOTHÉ, C.G.; ARAUJO, C. R. **Caracterização Térmica e Mecânica de Compósitos de Poliuretano com fibras de Curauá.** *Polímeros Ciência e Tecnologia*, vol 14, nº 4, p 274 – 278, 2004.

NEIS, A. M. **“Estudo da Sustentabilidade Ambiental na Obtenção de Fibras e Mantas de Sisal e curauá”.** Dissertação de Engenharia e Produção da UNIP, São Paulo, 2008.

NETO, F. L.; PARDINI, L. C. **Compósitos Estruturais: Ciência e Tecnologia**, 1ª Edição, Editora Edgard Blucher. São Paulo, 2006.

OASHI, M. C. G. **Estudo da Cadeia Produtiva como Subsídio para Pesquisa e Desenvolvimento do Agronegócio do Sisal na Paraíba**. Florianópolis: UFSC, 1999. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia da Produção), 1999.

PAIVA, A. M. Agricultura Camponesa e Desenvolvimento Rural/Local: Um Estudo da Organização da Produção de Juta e Malva na Várzea do Município de Manacapuru. Dissertação Desenvolvimento Regional da Universidade Federal do Amazonas, 133 f., 2009.

PASSOS, P. R. A. **Destinação sustentável de cascas de coco (*Cocos nucifera*) verde: obtenção de telhas e chapas de partículas**. 2005. 186f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) - Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

PEMATEC TRIANGEL. Disponível em : <<http://www.pematec.com.br/curaua.htm>> Acesso em : 08 de novembro de 2013.

PICANÇO, M. D. S.; GHAVAMI, K. **Comportamento à compressão de argamassas reforçadas com fibras vegetais da Amazônia**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 61, n. 1, p. 13–18, 2008.

PICANÇO, M. DE S. **Compósitos cimentícios reforçados com fibras de curauá**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica, 2005.

PINTO, A. R. A. G. Fibra de curauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo. Dissertação de engenharia Civil da PUC, Rio de Janeiro, 2008.

QUIRINO, M. G. “Estudo de matriz polimérica produzida com resina natural e fibra da semente de açaí (*Euterpe precatória*)”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2010.

RILEM. **Testing methods for fibre reinforced cement-based composites**. *Materiaux et Constructions*, v.17, n.102, p.441-56, 1984. (Rilem Draft Recommendations, Technical Committee 49 TFR).

Rodrigues, S. C. **Mecânica da Fratura de Compósitos de Matrizes Rígidas: Argamassas Reforçadas com Fibras de Sisal**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC/Rio, 1999.

SABBÁ, Jéssica. O Quadro de Crise do Sistema Juta/Malva e suas possíveis Alternativas de Soerguimento. Manaus: UFAM, 1993. 6, 14 p.

SARTORI, H. P. S., **Desenvolvimento de Compósitos Poliméricos com Fibras de Curauá e Híbridos com Fibras de Vidro**. Dissertação para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010.

SAVASTANO JR., H.; DANTAS, F.A.S.; AGOPYAN, V. **Materiais reforçados com fibras: correlação entre a zona de transição fibra-matriz e as propriedades mecânicas**. São Paulo, IPT/Pini, 1994. 56p. (Publicação IPT 2158 - boletim 67)

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

SAVASTANO JR, H.; PIMENTEL, L. L.. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibra vegetal para fins de obtenção de material de construção.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, v. 4, n. 1, p. 103-110, 1997.

SILVA, F. S. M. DA. **Sustentabilidade agroecológica da cultura de sisal.** Salvador: UNEB/UNIBAHIA, 2004. Dissertação (Mestrado em Gestão Integrada das Organizações), Unidade Baiana de Ensino, Pesquisa e Extensão em convênio com a Universidade do Estado da Bahia, 2004.

SILVA, H. S. P. DA. **Desenvolvimento de compósitos poliméricos com fibras de curauá e híbridos com fibra de vidro.** [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

SILVA, R. V.; AQUINO, E. M. F. Curaua fiber: A new alternative to polymeric composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 27 (1), pp. 103-112, 2008.

SILVA, F.A.; GHAVAMI, K.; ALMEIDA, J.R.M. **Comportamento ao impacto de materiais compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu.** NOCMAT, p. 1 – 11, Pirassununga, Nov, 2004.

SILVA, R.; HARAGU HI, S. ; MUNIZ, E. .; RUBIRA, A. F. “**Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos**” Quím. Nova vol.32 no.3 São Paulo 2009.

SILVA, C.,A. **Estudo da Durabilidade de Compósitos Reforçados com Fibras de Celulose.** Dissertação (Mestrado). UPE, São Paulo, 2002.

SIQUEIRA, J. L. de “**Estudo Comparativo entre a utilização da fibra de Polipropileno e a Fibra de Curauá em Concretos e Argamassas Cimentícias**” Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade da Amazônia-UNAMA, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia - CCET, 2003.

SOARES, I.M. **Produção e Caracterização de Compósitos de Matriz de Epóxi Reforçada com fibra de Rami para fins de reforço Estrutural.** Dissertação (Mestrado). UFU, Uberlândia, 2012.

SPINACÉ, M. A. S., JANEIRO, L. G., BERNARDINO, F. C., PAOLI, M. **Caracterização das fibras de sisal e de curauá visando aplicação em compósitos poliméricos.** Instituto de Química/ Unicamp, C.P. 6154,13081-970, Campinas, SP, Brasil. 2009.

SPINACÉ, M. A. S. et al. **Poliolefinas Reforçadas com Fibras Vegetais Curtas : Sisal vs . Curauá.** Polímeros, v. 21, p. 168–174, 2011.

SWAMY, R.N. **Vegetable fibre reinforced cement composites - a false dream or a potential reality?** In: International Symposium on Vegetable Plants and their Fibres as Building Materials, 2., Salvador, 1990. Proceedings. London, Chapman and Hall, 1990. p.3-8. (Rilem Proceedings, 7).

TOLEDO FILHO, R. D.. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: Caracterização experimental.** Rio de Janeiro, 1997, vol. 1 e 2, 483p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. (PUC- Rio).

TOLEDO FILHO, R. D e GHAVAMI, K., **Comportamento em compressão de argamassas reforçadas com fibras naturais, I. Relação tensão- deformação experimental e processo de fratura.** R. Brás. Eng. Agríc. Ambiental, Campina grande, v. i, p.79-88, 1997.

TOLONI, G.H.D. **Aspectos produtivos e análise de desempenho do fibrocimento sem amianto no desenvolvimento de tecnologias para telhas onduladas.** Dissertação (mestrado). USP, Pirassununga, 2006.

TROMBETTA, E. **Utilização de Fibra Natural de Pinus (Serragem) como Reforço em Componentes Automotivos Compostos de Polipropileno.** Dissertação de Engenharia Mecânica UFPR, Curitiba-PR, 2010.

VENTURA, O. S. P; PASSOS, O. S; LOBO J. B. A; FUJIYAMA, R.T. **Caracterização mecânica em flexão de compósito de argamassa de cimento reforçada por fibras naturais.** 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Novembro de 2006, Foz do Iguaçu, PR, Brasil

VLACK, Lawrence H. Van. **Propriedades dos materiais cerâmicos.** Trad. CidSilveira e Shiroyuki Oniki, São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 1973.

WANG, Y.; WU, H. C.; LI, V. C. Concrete reinforcement with recycled fibers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, p. 314 – 319, Nov., 2000.

APÊNDICE

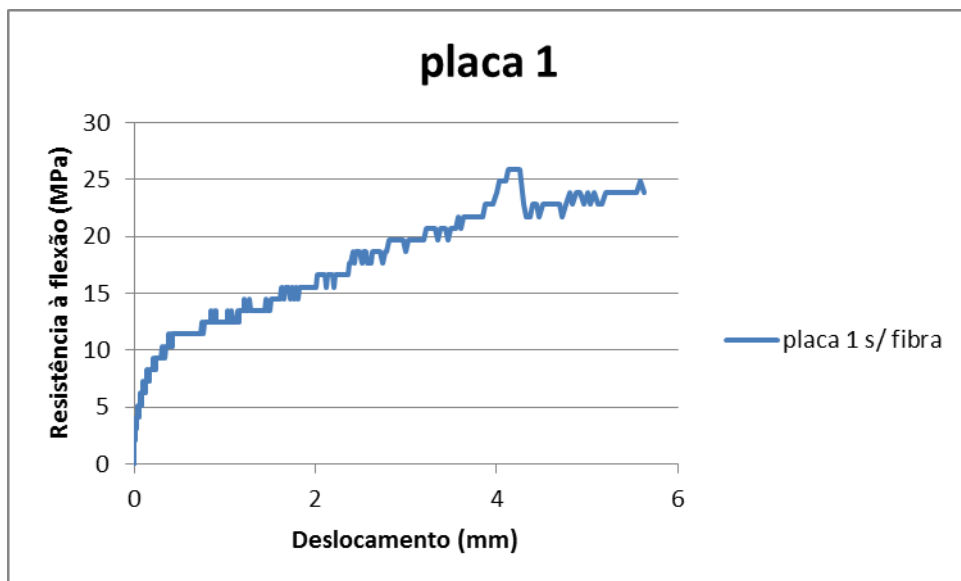
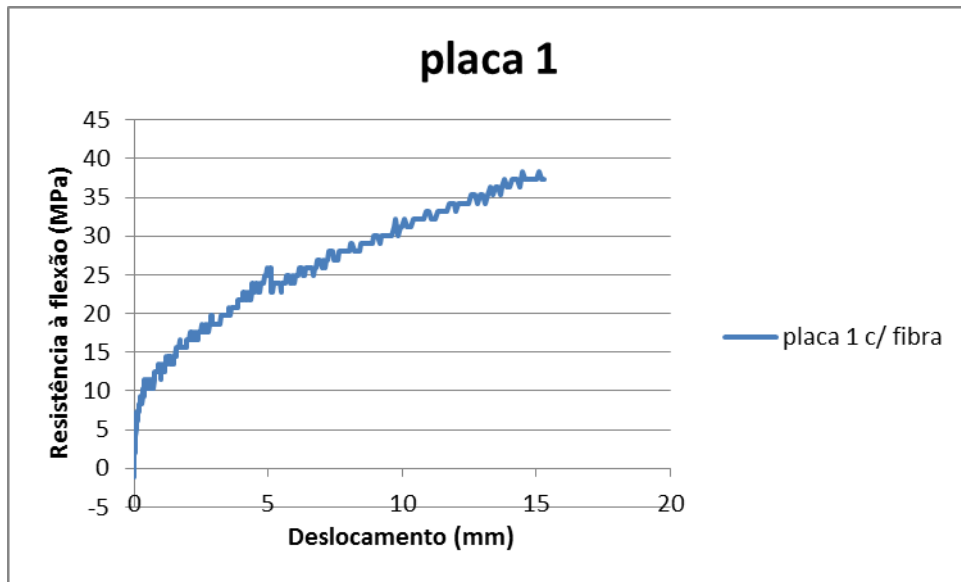
Tabela 01 – Ensaio de Resistência à tração na flexão

Placas cimentícias		P _{máx} (N)		Resistência à tração na flexão (Mpa)	
		28dias	60dias	28dias	60dias
Placa de referência (sem fibra)	Cp1	1929,80	3377,2	20,74	36,30
	Cp2	2219,30	2991,2	23,85	32,15
	Média		22,29		34,22
Placa com fibra	Cp1	3087,70	3763,2	33,19	40,45
	Cp2	2991,20	3570,0	32,15	38,37
	Média		32,67		39,41

Tabela 01 – Ensaio de Resistência à tração na flexão

	CARGA DE RUPTURA (N/m)		DESLOCAMENTO (mm)	
	REF	FIBRA	REF	FIBRA
CP1	21255,19	26567,95	0,4	1,66
CP2	23910,89	30553,56	0,45	1,93
CP3		39851,94		3,08
CP4		33210,64		2,72
CP5		35867,71		2,81
CP6		35867,71		2,51
MEDIA	22583,04	33653,25	0,425	2,451667
DESVIO	1877,863	4247,291	0,035355	0,49958
CV	8%	13%	8%	20%

APÊNDICE



APÊNDICE

