

# UFPA

PPGEC

# Universidade Federal do Pará

---



Robson da Silva Fernandes

**Concreto reforçado com fibras de bambu**  
*(Dendrocalamus Giganteus)*

**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

2019

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



**Robson da Silva Fernandes**

**Concreto reforçado com fibras de bambu  
(Dendrocalamus Giganteus)**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Marcelo de Souza Picanço.

Belém-PA,  
Novembro de 2019

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Robson da Silva Fernandes

TÍTULO: Concreto reforçado com fibras de bambu (*Dendrocalamus Giganteus*).

GRAU: Mestre ANO: 2019

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.

---

**Robson da Silva Fernandes.**

Av. Augusto Correa n. 1

Campus Universitário do Guamá

Laboratório de Engenharia Civil Belém, Pará

CEP 66075-970

### **Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) de acordo com ISBD**

---

**Biblioteca do ITEC/ UFPA, Belém – PA**

---

F363c Fernandes, Robson da Silva, 1981.  
Concreto reforçado com fibras de bambu (*Dendrocalamus Giganteus*)\ Robson da Silva Fernandes. – 2019.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2019.

1. Concreto - Fibras naturais 2. Bambu – Propriedades mecânicas 3. Concreto 4. Placas cimentícias - Testes

I. Título.

**CDD 624**

---

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



## CONCRETO REFORÇADO COM FIBRA DE BAMBU (*DENDROCALAMUS GIGANTUS*)

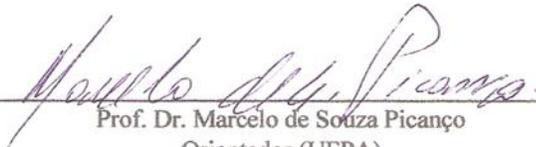
AUTOR:

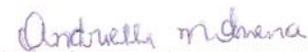
**ROBSON DA SILVA FERNANDES**

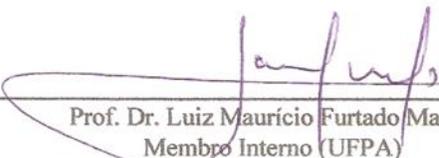
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 14 / 11 / 2019.

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Orientador (UFPA)

  
Profa. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira  
Membro Externo (UFG)

  
Prof. Dr. Luiz Maurício Furtado Maués  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*Dedico este trabalho a primeiramente a Deus,  
(louvado seja o nome do Senhor),  
A minha família, amigos, professores que  
Muito contribuíram com este trabalho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois me permitiu chegar até aqui, pois Ele quer o melhor para seus filhos, mesmo muitas vezes sermos extremamente desobedientes.

Agradeço a minha esposa, senhora Katiane Rodrigues que suportou em conjunto todos os momentos de muitas dificuldades, durante estes três últimos anos, se alegrando e chorando junto comigo enfrentando as turbulências e agora na conclusão da realização de um sonho.

Aos amigos de mestrado Marcelly e Francisco, por fornecer o bambu que coletaram na EMBRAPA e repasse para que pudesse utilizar nesta pesquisa. Também ao amigo Marcos Antônio e Marcelo Farias, da IFPa, por me ajudarem nos ensaios de MEV e tração da fibra de bambu

Agradeço, também, aos amigos Pedro Gil e os diretores da TABALMIX, Neto e Clemerson, por disponibilizar os materiais, ferramentas e as dependências da empresa para que pudesse fazer a dosagem e moldagem do concreto desta pesquisa e a todos os amigos do mestrado e do Laboratório de Engenharia Civil que colaboraram neste trabalho, em especial, Denisson, Joel, Maurilio, Sabino, Kassio, Leonardo e a professora Luciana Cordeiro, que me incentivou a iniciar o desafio de fazer o mestrado, dentre outros.

Agradeço a todo o Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPA (PPGEC), em especial o Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço que em primeiro lugar entendeu e me ajudou, em meio as minhas dificuldades financeiras e necessidade de interromper os estudos para dedicar-me ao trabalho profissional, e principalmente nas orientações, bem como todos os professores que acrescentaram conhecimentos imprescindíveis para esta pesquisa.

Agradeço aos integrantes da Empresa Zopone Engenharia, onde trabalhei por sete anos, Renan Sena, Luppy e Rubens, coordenadores da Zopone Engenharia, pois contribuíram com fidalguia, com fornecimento de ferramentas para ajudar em minha pesquisa.

Também agradeço ao Exército Brasileiro. Através de Comando Militar do Norte, a Base de Administração e Comando e 8ª Região militar, através da pessoa do Cel. Antônio Prado, Cel Wandick, os quais compreenderam as minhas justificativas, quanto a solicitação de licenciamento para poder concluir esta dissertação.

Agradeço a Força Aérea Brasileira, através do TC Marçal, pelo incentivo e liberação do serviço para que pudesse fazer a defesa de minha dissertação.

*“Pode cair mil do meu lado e dez mil à minha direita,  
mas não serei atingido, pois Ele dará ordem aos seus  
anjos para me guardarem.”*

*Salmos 91: 3*

## RESUMO

FERNANDES, Robson. **Concreto reforçado com fibras de bambu (*Dendrocalamus Giganteus*)**. 128f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2019.

As fibras vegetais surgem como uma alternativa para fabricação de elementos estruturais em relação as fibras metálicas e sintéticas que apresentam custos elevados, causando também ao meio ambiente poluição devido ao seu processo de fabricação. Este estudo analisa os resultados de ensaios mecânicos de um concreto reforçado com fibras da casca do bambu (*Dendrocalamus Giganteus*), para utilização em placas cimentícias, obtidos experimentalmente em corpos de provas cilíndricos e prismáticos conforme as normas da ABNT e recomendações internacionais. Os traços do compósito foram determinados por meio de um estudo piloto, 1:2,12:2,88:0,58 sendo empregado o cimento pozolânico CP-IV. O programa experimental consistiu em um concreto de referência com Fck de 25 MPa e três dosagens correspondente a 0,5%, 1,0% e 1,5% em volume de fibra de bambu à massa do concreto, formando quatro dosagens no total. Após a cura, conforme a NBR 5738 (2003), foram ensaiados corpos de prova prismáticos para avaliar a resistência à tração na Flexão, conforme NBR 12142 (2010)/ norma JSCE-SF4 (1984) e corpos de prova cilíndricos para avaliar a resistência do CRB à compressão axial, conforme NBR 5739 (2018), à tração por compressão diametral, conforme NBR 7222 (2011) e módulo de elasticidade estático, conforme NBR 8522 (2008). No ensaio à compressão axial a presença do bambu não proporcionou um acréscimo de resistência em relação ao concreto de referência. No entanto para a resistência à tração e flexão, a mistura com adição de fibra de bambu, gerou um ganho de resistência de 7% e 9%, respectivamente em comparação ao concreto sem adição. Pode-se concluir que a inserção de fibra oriunda da casca do bambu aumenta a resistência à tração do compósito.

### Palavras-chave

Concreto, resistência, fibra, bambu, *dendrocalamus giganteus*.

## ABSTRACT

FERNANDES, Robson. **Bamboo Fibers Reinforced Concrete (Dendrocalamus Giganteus)**. 128f. Dissertation (Master) - Postgraduate Program in Civil Engineering, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil.

Vegetable fibers appear as an alternative to manufacture structural elements in relation to metal and synthetic fibers that have high costs, also causing pollution to the environment due to their manufacturing process. This study analyzes the results of mechanical tests of a fiber reinforced concrete of bamboo bark (*Dendrocalamus Giganteus*), for use in cementitious plates, obtained experimentally in cylindrical and prismatic specimens according to ABNT standards and international recommendations. Composite traces were determined by means of a pilot study, 1: 2.12: 2.88: 0.58 using the CP-IV pozzolanic cement. The experimental program consisted of a 25 MPa  $F_{ck}$  reference concrete and three dosages corresponding to 0.5%, 1.0% and 1.5% by volume of bamboo fiber to the concrete mass, forming four dosages in total. After curing, according to NBR 5738 (2003), prismatic specimens were tested for flexural tensile strength according to NBR 12142 (2010) / JSCE-SF4 (1984) and cylindrical specimens to evaluate the strength. from CRB to axial compression, according to NBR 5739 (2018), to diametric compression tensile, according to NBR 7222 (2011) and static modulus of elasticity, according to NBR 8522 (2008). In the axial compression test the presence of bamboo did not provide an increase of resistance in relation to the reference concrete. However for the tensile and flexural strength, the mixing with the addition of bamboo fiber generated a strength gain of 7% and 9%, respectively, compared to the concrete without addition. It can be concluded that insertion of fiber from bamboo bark increases the tensile strength of the composite.

### Keywords

Concrete, strength, fiber, bamboo, *dendrocalamus giganteus*.

## SUMÁRIO

<b>Capítulo</b>	<b>Página</b>
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	3
1.3 OBJETIVO .....	4
1.3.1 Objetivo Geral .....	4
1.3.2 Objetivos Específicos .....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 FIBRAS VEGETAIS .....	5
2.2 BAMBU .....	6
2.2.1 Bambu como material de construção .....	6
2.2.2 Estudo da microestrutura do bambu .....	15
2.2.3 Degradação do bambu .....	22
2.2.4 Variação dimensional do bambu e absorção de água .....	24
2.3 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS .....	26
2.3.1 Matriz de concreto .....	28
2.3.2 Fibras para reforço de concreto .....	30
2.3.3 Volume crítico das fibras .....	33
2.3.4 A interface fibra-matriz .....	35
2.3.5 Comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras .....	39
2.3.5.1 Classificação de comportamento .....	39
2.3.5.2 Tipos de Comportamento mecânico .....	41
2.3.6 Trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras .....	46
2.3.7 Concreto reforçado com fibras naturais .....	46
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA .....	50
3.1 MATERIAIS .....	51
3.1.1 Fibra de Bambu ( <i>Dendrocalamus Giganteus</i> ) .....	51
3.1.1.1 Geometria do bambu .....	53
3.1.1.2 Massa Específica .....	54

3.1.1.3 Teor de umidade e Absorção de água .....	55
3.1.1.4 Fração volumétrica das fibras.....	58
3.1.1.5 Resistência à tração da fibra .....	59
3.1.1.6 Módulo de Elasticidade da fibra.....	61
3.1.1.7 Análise morfológica da fibra .....	62
3.1.2 Cimento portland CP IV 32.....	62
3.1.3 Agregado miúdo .....	64
3.1.4 Agregado graúdo .....	65
3.1.5 Aditivo superplastificante.....	66
3.1.6 Água de amassamento .....	67
3.2. CONCRETO.....	67
3.2.1 Dosagem do concreto .....	67
3.3.3 Resistência à flexão .....	68
3.2.2 Produção do concreto .....	69
3.2.3 Produção do concreto em cada traço.....	69
3.2.4 Preparação dos corpos de prova prismáticos no estado endurecido.....	72
3.2.5 DISPOSITIVO “YOKE” .....	73
3.3 MÉTODOS DE ENSAIO.....	74
3.3.1 Resistência à compressão ( $f_c$ ) e módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ) .....	74
3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral .....	78
3.3.3 Resistência à flexão .....	79
3.3.4 Microscopia eletrônica de varredura .....	81
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	83
4.1 Propriedades das fibras.....	83
4.1.1 Características Geométricas das Fibras de bambu .....	83
4.1.2 Caracterização Mecânica das fibras .....	85
4.1.2.1 Resistência à Tração .....	85
4.1.2.2 Módulo de Elasticidade .....	86
4.1.3 Análise Morfológica.....	89
4.2 Apresentação e análise dos resultados da resistência à compressão axial do concreto com adição de fibra de bambu .....	89
4.3 Apresentação e análise dos resultados da resistência à tração por compressão	

diametral.....	91
4.4 Apresentação e análise dos resultados do módulo de elasticidade .....	92
4.5 Apresentação e análise dos resultados da Tração na flexão segundo NBR12142/2010.....	94
4.6 Comparações dos resultados de resistência mecânica do concreto reforçado bambu com concreto reforçado com bagaço de cana de açúcar. ....	95
4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	96
5. CONCLUSÃO.....	100
5.1 Conclusões Gerais .....	101
5.1 Sugestões de Pesquisas.....	101
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	103
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	1
1.2 JUSTIFICATIVA .....	2
1.3 OBJETIVO .....	2
1.3.1 Objetivo Geral .....	2
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 FIBRAS VEGETAIS.....	4
2.2 BAMBU .....	5
2.2.1 Bambu como material de construção .....	5
2.2.2 Estudo da microestrutura do bambu .....	14
2.2.3 Degradação do bambu .....	21
2.2.4 Variação dimensional do bambu e absorção de água .....	23
2.3 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS.....	25
2.3.1 Matriz de concreto.....	27
2.3.2 Fibras para reforço de concreto .....	29
2.3.3 Volume crítico das fibras.....	32
2.3.4 A interface fibra-matriz .....	34
2.3.5 Comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras .....	37
2.3.5.1 Classificação de comportamento .....	37
2.3.5.2 Tipos de Comportamento mecânico.....	40

2.3.6	Trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras .....	45
2.3.7	Concreto reforçado com fibras naturais .....	46
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA.....	49
3.1	MATERIAIS .....	50
3.1.1	Fibra de Bambu ( <i>Dendrocalamus Giganteus</i> ).....	52
3.1.1.1	Geometria do bambu .....	52
3.1.1.2	Massa Específica .....	53
3.1.1.3	Teor de umidade e Absorção de água .....	54
3.1.1.4	Fração volumétrica das fibras.....	57
3.1.1.5	Resistência à tração da fibra .....	59
3.1.1.6	Módulo de Elasticidade da fibra.....	60
3.1.1.7	Análise morfológica da fibra .....	61
3.1.2	Cimento portland CP IV 32.....	61
3.1.3	Agregado miúdo .....	63
3.1.4	Agregado graúdo .....	64
3.1.5	Aditivo superplastificante.....	65
3.1.6	Água de amassamento .....	66
3.2.	CONCRETO.....	66
3.2.1	Dosagem do concreto .....	66
3.2.2	Produção do concreto .....	67
3.2.3	Produção do concreto em cada traço .....	68
3.2.4	Preparação dos corpos de prova prismáticos no estado endurecido.....	71
3.2.5	DISPOSITIVO “YOKE” .....	72
3.3	MÉTODOS DE ENSAIO.....	73
3.3.1	Resistência à compressão ( $f_c$ ) e módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ) .....	73
3.3.2	Resistência à tração por compressão diametral .....	77
3.3.3	Resistência à flexão .....	78
3.3.4	Microscopia eletrônica de varredura .....	81
4.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	82
4.1	Propriedades das fibras.....	83
4.1.1	Características Geométricas das Fibras de bambu .....	82
4.1.2	Caracterização Mecânica das fibras .....	83

4.1.2.1 Resistência à Tração .....	83
4.1.2.2 Módulo de Elasticidade .....	85
4.1.3 Análise Morfológica.....	87
4.2 Apresentação e análise dos resultados da resistência à compressão axial do concreto com adição de fibra de bambu .....	88
4.3 Apresentação e análise dos resultados da resistência à tração por compressão diametral. ....	90
4.4 Apresentação e análise dos resultados do módulo de elasticidade .....	91
4.5 Apresentação e análise dos resultados da Tração na flexão segundo NBR12142/2010.....	92
4.6 Comparações dos resultados de resistência mecânica do concreto reforçado bambu com concreto reforçado com bagaço de cana de açúcar. ....	94
4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	94
5. CONCLUSÃO.....	97
5.1 Conclusões Gerais .....	97
5.1 Sugestões de Pesquisas.....	97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	99

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas do bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i> por camada Fonte: Adaptado KRAUSE <i>et al.</i> (2016).....	20
Tabela 2.2 – Valores médios dos parâmetros de inchamento e de contração do bambu ( <i>Dendrocalamus giganteus</i> ) em função do tempo de saturação e de secagem das amostras. Fonte: Adaptado BRITO <i>et al.</i> (2015) .....	24
Tabela 2.3- Propriedades típicas da matriz cimentícia. Fonte: HANNANT (1978) .....	28
Tabela 2.4 – Alguns métodos de ensaio para determinação da tenacidade especificada para o concreto projetado reforçado com fibras de aço.....	44
Tabela 2.5- Resumo dos ensaios das normas ASTM C1609 (2010), JSCE-SF4 (1984) E EN 14651 (2007).....	45
Tabela 3.1- Caracterização do bambu .....	55
Tabela 3.2- Absorção de água das fibras no tempo .....	56
Tabela 3.3- Fração volumétrica de bambu inserido no concreto.....	58
Tabela 3.4- Caracterização física do cimento CP IV 32 .....	62
Tabela 3.5- Caracterização do agregado miúdo .....	63
Tabela 3.6- Caracterização do agregado graúdo .....	65
Tabela 3.7- Traço experimental da pesquisa .....	67
Tabela 3.8 - Composições e consumo de materiais dos traços utilizados .....	67
Tabela 3.9- Número dos corpos de prova utilizados para cada betonada .....	68
Tabela 3.10- Abatimento de tronco de cone de cada betonada sem e com aditivo.....	70
Tabela 3.11 - Velocidade de carregamento segundo JSCE-SF4 .....	81
Tabela 4.1 – Diâmetro, área da seção transversal e comprimento das fibras de Bambu.....	83
Tabela 4.2 - Resultado da Resistência à Tração das fibras de Bagaço de Bambu .....	84
Tabela 4.3 – Comparativo das resistências à Tração de fibras vegetais.....	85
Tabela 4.4 - Módulo de elasticidade da fibras de Bambu. ....	86
Tabela 4.5- Comparativo do Módulo de Elasticidade de fibras vegetais. ....	87
Tabela 4.6 - Variação de aumento da resistência à compressão axial após de adição	

do bambu .....	89
Tabela 4.7 - Variação de aumento da resistência à tração por compressão diametral após de adição do bambu.....	90
Tabela 4.8 - Resistência à tração por Flexão após de adição de bambu.....	93
Tabela 4.9 - Resistência à tração por Flexão após de adição de bambu.....	94

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1- Esquema da estrutura de uma fibra de madeira leve. SMOOK (1989). ....	6
Figura 2.2 - Distribuição geográfica do bambu. LOPEZ (2003). ....	6
Figura 2.3- Seção de bambu cortado ao meio. Fonte: LOPEZ (1974). ....	8
Figura 2.4- Distorção dos feixes fibrovasculares na região do nó. Fonte: LIESSE (1998). ....	8
Figura 2.5- Distribuição não uniforme das fibras em função da espessura. GHAVAMI (2005) .....	9
Figura 2.6- Estrutura externa comum a todas as espécies de bambu. Fonte: adaptado NMBA (2004). ....	10
Figura 2.7- Esquema do colmo de bambu. Fonte: SUBRAHMANYAM (1984). ....	10
Figura 2.8- Resistência e dureza de alguns materiais e o bambu. Fonte: JANSSEN (2000) .....	13
Figura 2.9 - Micrografias eletrônicas de varredura da seção transversal do bambu) FONTE: PALOMBINI (2016). ....	17
Figura 2.10 - Micrografias eletrônicas de varredura da anatomia do bambu. Fonte: CIDADE et al. (2015). ....	18
Figura 2.11 - Conjuntos vasculares do bambu obtidas por microscopia eletrônica de varredura. Fonte: LIESE (1980) apud GHAVAMI & MARINHO (2005). ....	19
Figura 2.12 - Micrografia de células parenquimáticas preenchidas com amido. Fonte: FERREIRA (2007) .....	20
Figura 2.13 - Comparação entre as frações volumétricas e os resultados médios dos ensaios. Adaptado KRAUSE et al. (2016). ....	21
Figura 2.14 - Absorção de água de espécies de bambu. Adaptado GHAVAMI (2005). ....	24
Figura 2.15- fibras adequadas em relação às propriedades de matriz de concreto. Fonte: NAAMAN (2003). ....	26

Figura 2.16- Compósitos de cimento vistos como sistemas bi componentes e suas combinações híbridas. Fonte: NAAMAN (2000). .....	27
Figura 2.17- Representação esquemática da propagação da fissura pela camada porosa na zona de transição. Fonte: BENTUR; MINDESS (1990).....	29
Figura 2.18– Características principais das fibras de interesse para matrizes cimentícias. Fonte: NAAMAN (2000).....	30
Figura 2.19– Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto. Fonte: FIGUEIREDO (2011). .....	31
Figura 2.20 - Curvas força x deflexão de teores de fibra abaixo (a), acima (b) e igual (c) ao volume crítico através de ensaio de tração na flexão. Fonte: FIGUEIREDO (2000). .....	32
Figura 2.21– A interface fibra-matriz. Fonte: adaptada de BENTUR; MINDESS (2007). .....	34
Figura 2.22 – Distribuição de tensões ao longo da fibra interceptando uma fissura: matriz fissurada. Fonte: BANTHIA (1998); BENTUR; MINDESS (2007) .....	36
Figura 2.23– Mecanismos de absorção de energia entre a fibra e a matriz. Fonte: ZOLLO (1996). .....	37
Figura 2.24– Conceitos de softening e hardening para classificação do comportamento De concreto reforçado com fibras. Fonte: DI PRISCO; PLIZZARI, VANDEWALLE, 2009; NAAMAN (2003) .....	39
Figura 2.25– Comportamentos da fibra durante seu arrancamento, mostrando o atrito Ideal, slip-hardening e slip-softening. Fonte: BENTUR; MINDESS (2007); LIN; LI (1996).. .....	40
Figura 2.26 - Aumento da resistência à compressão com aumento de volume de fibra. Fonte: BENTUR; MINDESS (1990).....	41
Figura 2.27 - Diagramas de tensão-deformação de concreto reforçado com fibras (CRF) submetido à tração mostra dois pontos de interesse. Fonte: NAAMAN (2003, 2008). .....	42
Figura 2.28 - Ganho de resistência à tração por compressão diametral com adição das fibras. Fonte: PASA (2007).....	42

Figura 2.29 - Comportamento de concreto endurecido submetido à flexão com várias adições. Fonte: ACI 554.1R, 2002; ISLAM (2012). .....	43
Figura 3.1- Estrutura do programa experimental .....	50
Figura 3.2- Partes do colmo a serem utilizadas. Fonte: PEREIRA (2012) .....	50
Figura 3.3 - Processo de obtenção da fibra de bambu .....	51
Figura 3.4 – Seção transversal da fibra de bambu por imagem de microscópio eletrônico de Varredura de Bancada (MEV) .....	53
Figura 3.5– Ensaio de caracterização realizado com paquímetro. (a) Comprimento da fibra do bambu; b) Diâmetro da fibra de do bambu .....	53
Figura 3.6 – Ensaio de massa específica. (a) tamanho da fibra de bambu. (b) Frasco de Chapman com bambu .....	54
Figura 3.7- Absorção de água das fibras vegetais. Fonte: Adaptado PICANÇO (2005). .....	56
Figura 3.8 – Ensaio de tração na fibra. (a) Molde (em milímetros), (b) Detalhe do corte do molde para realização do ensaio .....	59
Figura 3.9 – Amostra posicionada com corte nas laterais para início do ensaio em máquina de tração .....	60
Figura 3.10- Equipamento para análise microestrutural .....	61
Figura 3.11- Tempo de pega do cimento portland tipo IV. ....	62
Figura 3.12- Curva granulométrica do agregado miúdo. ....	64
Figura 3.13 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	65
Figura 3.14 - Ensaio de abatimento de tronco de cone.....	69
Figura 3.15- Corpos de prova cilíndricos e prismáticos moldados em formas metálicas. ....	70
Figura 3.16- Cura dos corpos de prova cilidrinco e prismáticos.....	71
Figura 3.17 - Corpos de prova prismáticos .....	71
Figura 3.18 - Suportes do dispositivo “yoke”. (autor).....	72
Figura 3.19 - Representação esquemática dos detalhes dos suportes do dispositivo “yoke”. Fonte: (ARIF, 2014).....	72
Figura 3.20- Ensaio de resistência à compressão axial (fc).....	75
Figura 3.21 - Ensaio para determinação do módulo de elasticidade tangente inicial (Eci) .....	76
Figura 3.22- Representação esquemática do Ensaio de Tração por	

Compressão Diametral. ....	77
Figura 3.23- Ensaio de resistência à tração por compressão diametral (fct). ....	78
Figura 3.24- Representação esquemática do Ensaio de Tração na Flexão ....	79
Figura 3.25- Ensaio de resistência à tração na Flexão segundo JSCE SF4 .....	80
Figura 3.26- Equipamento para análise microestrutural. (a) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo VEGA 3 LMU- TESCAN, (b) Amostras do interior do microscópio .....	81
Figura 4.1- Gráfico tensão-deformação da fibra de bambu.....	87
Figura 4.2- Micrografia da fibra de bambu .....	88
Figura 4.3- Comparação entre os valores médios obtidos no ensaio de Compressão axial .....	90
Figura 4.4 - Comparação entre os valores médios obtidos no ensaio de tração por compressão diametral... ..	91
Figura 4.5 - Comparação entre os valores médios obtidos no ensaio de módulo De elasticidade.....	92
Figura 4.6- Resultado obtido no ensaio de resistência à flexão. ....	93
Figura 4.7- Amostras de corpos de prova rompidos dos ensaios à flexão.....	95

## LISTA DE SÍMBOLOS

Neste item são apresentados alguns dos símbolos utilizados nesta dissertação. Aqueles que não estão aqui apresentados têm seu significado explicado assim que mencionados no texto.

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
%	: Percentagem
°C	: Graus Celsius
‰	: Permilagem
a/c	: Relação água/cimento
cm	: Centímetros
cm <sup>3</sup>	: Centímetros cúbicos
CO <sub>2</sub>	: Gás carbônico
CP – IV	: Cimento Portland Tipo IV
C-S-H	: Silicatos de Cálcio Hidratado
ELS	: Estado Limite de Serviço
ELU	: Estado Limite Ultimo
$\epsilon_c$	: Deformação de compressão no concreto
$\epsilon_s$	: Deformação de tração da armadura do aço
$\epsilon_{yd}$	: Deformação de tração de cálculo da armadura de aço
fbd	: Resistência de aderência de cálculo
f <sub>cd</sub>	: Resistência de cálculo do concreto à compressão
f <sub>ck</sub>	: Resistência característica do concreto à compressão
f <sub>ctd</sub>	: Resistência de cálculo do concreto à tração
g	: Grama
GPa	: Giga Pascal
MPa	: Mega Pascal
kN	: Quilo Newton
lb	: Comprimento de ancoragem
LVDT	: Transformadores Diferenciais Variáveis Linearmente
m	: Metro
mm	: Milímetros
mm <sup>2</sup>	: Milímetros quadrados
μA	: Mili amper

kv	: Kilo volts
U.V	: Ultra violeta
E	: Módulo de elasticidade
ABNT	: Associação Brasileira de Normas técnicas
NBR	: Norma Brasileira
CRB	: Concreto reforçado com fibra de bambu
CPN25-00%	: Corpo de prova com sem adição de bambu
CPB25-0,5%	: Corpo de prova com com adição de 0,5% de bambu
CPB25-1,0%	: Corpo de prova com com adição de 1,0% de bambu
CPB25-1,5%	: Corpo de prova com com adição de 1,5% de bambu
CRF	: Concreto Reforçado com Fibras
FBT	: Fibras do bambu
De	: Diâmetro equivalente
MEV	: Microscópio Eletrônico de Varredura
H	: Teor de umidade
ASTM	: American Society for Testing and Materials
PCE	: policarboxílico modificado
CP's	: Corpos de Provas
$\gamma_c$	: Coeficiente de minoração da resistência do concreto
$\rho_a$	: Massa específica da areia
$\rho_b$	: Massa específica da brita
$\rho_c$	: Massa específica do cimento
$\tau_b$	: Tensão média de aderência
$V_f$	: volume de fibras
Pa	: Mega Pascal
N	: Newton
pH	: Potencial hidrogeniônico
SiO	: Monóxido de silício
CH	: Hidróxido de cálcio
$\mu\text{m}$	: Micrômetro

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O alto consumo de energia, a escassez de alguns materiais na natureza, o consequente aumento da poluição e a procura por materiais mais econômicos e renováveis vêm fomentando pesquisas por materiais alternativos de origem natural que possam substituir produtos industrializados utilizados na construção civil.

O concreto reforçado com fibras é um material compósito cuja matriz é pasta de cimento, à qual são incorporados agregados e fibras. As fibras são elementos descontínuos e aleatoriamente distribuídos na matriz. Atualmente têm sido usadas fibras de várias formas e tamanhos, produzidas em aço, plástico vidro e materiais naturais; dentre esses, as fibras de aço têm sido as mais utilizadas.

Segundo MELO FILHO (2012), os componentes reforçados com fibras apresentam aplicações diversas, como elementos de cobertura, revestimentos, painéis divisórios, reforço e reabilitação de paredes de alvenaria e diversos componentes habitacionais. Para esse reforço podem ser utilizadas fibras sintéticas (como as metálicas e poliméricas), fibras minerais (como o amianto), fibras vegetais (como o bambu), entre outras. A existência de um material dúctil de elevada resistência permite construir estruturas mais rígidas, com menor custo de material e de mão de obra, além de diminuir os efeitos em consequência de ações proporcionais à massa das estruturas, peso próprio e ação sísmica.

Compósitos cimentícios com fibras vegetais apresentam grandes limitações em relação à durabilidade, por sofrer diversos tipos de degradações devido à alta alcalinidade presente na matriz gerando deterioração dos componentes químicos presentes nas fibras vegetais. LOPES et al. (2011) ressalta a necessidade da investigação destes processos de degradação como também identificar mecanismos para contê-lo.

O bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*), escolhido para esta pesquisa, é relativamente comum no país e pode oferecer diversas vantagens devido às suas características, como fácil e rápida adaptabilidade, alta taxa de reposição, servindo como elo para impulsionar o desenvolvimento socioeconômico.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Várias alternativas apareceram no mundo para definir o desempenho pós- fissuração, as quais foram normatizadas ou, pelo menos, amplamente aceitas na maioria dos países. Essas alternativas foram fundamentadas por meio dos ensaios de flexão para corpos de prova prismáticos. Esse parâmetro de desempenho é expresso em termos da tenacidade ou tensão residual que surge através dos resultados da relação força x deflexão JOHNSTON (2001).

As fibras vegetais inseridas em peças estruturais de argamassa ou concreto com proteção adequada para a durabilidade se consolidam como uma alternativa muito interessante, quando se analisa o baixo custo para produção, baixo impacto ambiental, sustentabilidade em relação a sua cadeia produtiva.

Quando bem projetados, os materiais compósitos apresentam, normalmente, as melhores qualidades dos seus constituintes, o que não é observado quando o componente se apresenta sozinho. Sendo assim, busca-se observar, a partir da aplicação de um material compósito em elementos estruturais, se algumas propriedades podem ser melhoradas, como resistência à compressão, resistência à tração e, principalmente, a absorção de energia no concreto reforçado com fibras BARROS (1995).

No sentido de prover valores referenciais de comportamento para esse tipo de compósito nestas condições de avaliação, foi desenvolvido estudo experimental descrito no Capítulo 4. Como se verá propriedades como a resistência à tração e a energia específica de fratura dependem da natureza da matriz, tipo, características e quantidade de fibra empregada como reforço e da forma e eficiência da interação fibra matriz. Dados sobre essas propriedades ainda são escassos, de modo que este trabalho busca colaborar nesta direção, caracterizando compósitos gerados com três diferentes teores de fibra de bambu, avaliando preliminarmente seu desempenho quanto às resistências mecânicas para posterior aplicação em placas cimentícias.

## 1.3 OBJETIVO

### 1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar o reforço de uma matriz cimentícia com adição de fibra de bambu (*Dendrocalamus Giganteus*) com intuito de aplicação em elementos estruturais como telhas e placas cimentícias.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterização das propriedades físicas do bambu (*Dendrocalamus Giganteus*);
- b) Caracterização dos materiais constituintes do concreto;
- c) Estudo do comportamento do compósito à resistência à compressão axial;
- d) Estudo do comportamento do compósito ao módulo de elasticidade;
- e) Estudo do comportamento do compósito à resistência à tração por compressão diametral para a melhor fração volumétrica de fibra de bambu;
- f) Estudo do aumento da ductibilidade do compósito à resistência à tração na flexão;
- g) Análise da interface microestrutural da fibra de bambu- matriz do concreto fraturado por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Dessa forma, por meio da metodologia empregada nesta pesquisa, deseja-se alcançar resultados que possam contribuir para a comunidade científica acerca da utilização da fibra da casca de bambu como material de engenharia.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FIBRAS VEGETAIS

Ao longo de décadas, as fibras vegetais foram utilizadas nas pastas de cimento para a fabricação de componentes estruturais de seções finas e de formas variáveis. As fibras naturais têm sido tradicionalmente usadas na substituição das fibras de amianto, para a produção dos elementos finos aplicados em coberturas, revestimentos e produção de telhas à base de cimento de baixa alcalinidade.

O aumento da demanda do consumo de energia levou as indústrias a buscar outras fontes alternativas e sistemas estruturais. O uso de fibras naturais para se obter melhor desempenho mecânico na matriz cimentícia tem-se mostrado uma oportunidade promissora SILVA; MOBASHER; TOLIDO FILHO (2008). As principais vantagens das fibras vegetais, segundo a classificação de LEVY NETO; PARDINI (2006), são:

- Baixa massa específica;
- Maciez e abrasividade reduzida;
- Recicláveis não tóxicas e biodegradáveis;
- Baixo custo de produção;
- Estímulo para seu emprego na zona rural;
- Baixo consumo de energia de produção.
- Entre outras.

O aumento da utilização destes materiais em diversas aplicações, tais como revestimentos, paredes internas e externas, é possível e eles podem ser considerados como materiais sustentáveis de baixo custo. As desvantagens e limitações das fibras naturais são:

- Baixas temperaturas de procedimento, isto é, não toleram mais de 200 °C durante a consolidação da matriz de um compósito;
- Alta sensibilidade a efeitos ambientais, tais como variação de temperatura e de umidade;
- Apresentação de seções transversais de geometria complexa e não uniforme;
- Propriedades mecânicas modestas em relação aos materiais estruturais tradicionais.

As fibras vegetais macroscópicas são, cada uma, um material compósito complexo SAVASTANO JR. et al. (2002). Cada macro-fibra é constituída de várias fibras individuais, que são células longas e pontiagudas, aderidas por uma lamela intermediária, composta principalmente por um composto orgânico complexo, a lignina, que é uma espécie de matriz natural. Cada microfibra é formada por quatro camadas, com diferentes teores de celulose, hemicelulose, lignina e substâncias extrativas, sendo as moléculas de celulose são as responsáveis pela resistência das fibras, PERSSON E SKARENDAHL (1984). A celulose é relativamente imune ao ataque por álcalis ou ácidos diluídos. Pode haver, ainda, a presença de extrativos, que influenciam na coloração, densidade, durabilidade, combustibilidade e absorção de umidade das fibras (Coutts 1988).

A estrutura de uma fibra de madeira leve é mostrada na (Figura 2.1), onde é vista a lamela intermediária (ML), a parede primária (P) e a parede secundária, compondo a maior parte da parede da célula e formada por três camadas com diferentes alinhamentos de fibrilas (S1, S2 e S3). A camada S2 forma o corpo principal da fibra e tem de 2  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$  de espessura. Vê-se, ainda, o canal central da fibra, SMOOK (1989).

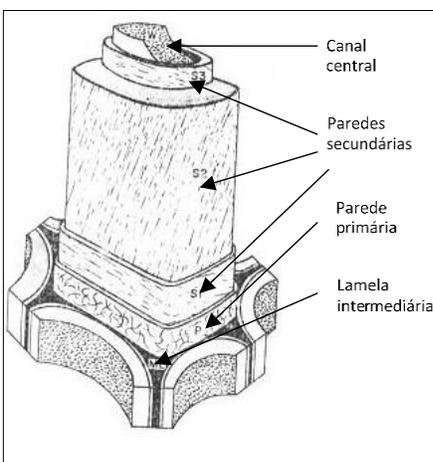


Figura 2.1- Esquema da estrutura de uma fibra de madeira leve.

Fonte: SMOOK (1989).

## 2.2 BAMBU

### 2.2.1 Bambu como material de construção

Os bambus pertencentes à família Poaceae e subfamília Bambusoideae são classificados em duas grandes tribos, caracterizadas pelo porte herbáceo e lenhoso FILGUEIRAS; GONÇALVES (2004). De forma mais específica, PEREIRA E BERALDO (2008) definem o bambu como representante da família Gramineae ou Poaceae, subfamília Bambusoideae que é dividida em duas tribos; a primeira é a Bambuseae com espécimes de maior porte, xilemáticos, ou seja, com colmos lenhosos e a segunda é a Olyreae com espécimes de menor porte, herbáceos. E, além disso, o bambu também é classificado cientificamente na Ordem Poales, subclasse Commelinidae, classe Liliopsida, divisão Magnoliophyta, superdivisão spermatophyta, reino Plantae e domínio Eukaryota.

De acordo com LIESE (1998), o bambu é pertencente à família Gramínea e a subfamília Bambusoideae, sendo tratado em alguns casos como pertencente à família Bambusaceae, com cerca de 50 gêneros e 1300 espécies. Segundo PEREIRA E BERALDO (2008), os bambus nativos se desenvolvem naturalmente em todos os continentes com exceção da Europa, sendo 34% das espécies nativas das Américas, 62% da Ásia e 4% da Oceania, como podemos observar na Figura 2.1. O mesmo autor ainda explica que o Brasil possui 34 gêneros e 232 espécies de bambus nativos, sendo que destas espécies 172 são consideradas endêmicas, e entre os gêneros 16 são considerados do tipo herbáceo (ornamental) e 18 do tipo lenhoso. Dentre as espécies observadas no Brasil, destacam-se os gêneros: Bambusa Dendrocalamus, Gigantochloa, Gradua, Phyllostachys, Pseudosasa, Sasa e Sinoarundinaria. Já para JUDZIEWICZ et al. (1999); LONDOÑO (2004), são descritos 75 gêneros e cerca de 1250 espécies de bambu, 41 gêneros e 473 espécies na América e 234 espécies no Brasil, compreendendo 155 lignificadas e 75 herbáceas, concentradas, em maior grau de endemismo, nas florestas litorâneas do sul do estado da Bahia.



Figura 2.2 - Distribuição geográfica do bambu. LOPEZ (2003).

O que diferencia o bambu, de imediato, de outros materiais vegetais estruturais é a sua alta produtividade. Dois anos e meio após ter brotado do solo, o bambu possui resistência mecânica estrutural elevada, não havendo, portanto, nesse aspecto, nenhum concorrente no reino vegetal. Somam-se as características favoráveis uma forma tubular acabada, estruturalmente estável, uma baixa massa específica, uma geometria circular oca, otimizada em termos da razão resistência/massa do material. Os resultados dessas características implicam baixo custo de produção, facilidade de transporte e trabalhabilidade, as quais se revertem em diminuição nos custos das construções GHAVAMI (1989,1992); MOREIRA; GHAVAMI (1995). No Brasil algumas espécies de bambus são mais usadas na construção civil, entre elas podem ser citadas:

- Entoucerantes: Possuem crescimento radial e crescem formando uma touceira, próximos um do outro. Ex. *Dendrocalamus giganteus* (bambu gigante);
- Alastrantes – Possuem crescimento descentralizado e crescem de forma desordenada propagando-se continuamente para os lados. Ex. *Phyllostachys áurea*; *Phyllostachys heterocycla pubescens* (Mossô);

O crescimento do bambu é diferente das madeiras convencionais, seu crescimento é feito no sentido do solo para o topo e as partes mais próximas do terreno são as mais antigas possuindo propriedades mais vantajosas quanto à resistência e durabilidade. O sistema de fibras de sustentação do bambu composto por feixes dispostos na mesma direção longitudinal, quase que paralelos, porém o posicionamento das fibras sofre uma mudança junto ao nó. As fibras que vinham paralelas se misturam e faz do nó um local de maior concentração de fibras em diversos sentidos, tendo o mesmo uma maior resistência à compressão e impedindo que haja separação das fibras longitudinais nos entrenós. Os nós exercem uma amarração transversal e proporcionam maior rigidez ao colmo de bambu LOPEZ (1974). O bambu possui uma flexibilidade muito boa podendo quando “verde” torcer até certo limite e não fissurar ou romper.

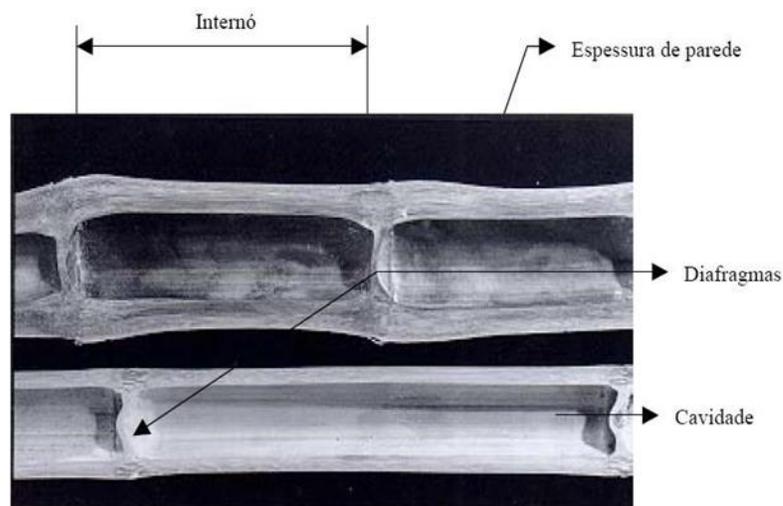


Figura 2.3- Seção de bambu cortado ao meio. Fonte: LOPEZ (1974).

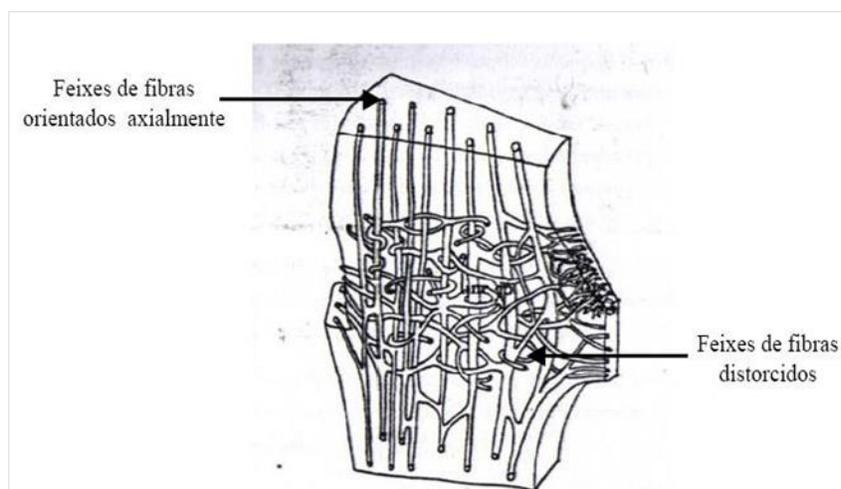


Figura 2.4- Distorção dos feixes fibrovasculares na região do nó.

Fonte: LIESSE (1998).

GHAVAMI (1989), relata que as características mecânicas do bambu são influenciáveis principalmente pelos seguintes fatores: espécie, idade, tipo de solo, condições climáticas, época da colheita, teor de umidade das amostras, localização destas com respeito ao comprimento do colmo, presença ou ausência de nós nas amostras testadas e o tipo de teste realizado. O ótimo desempenho estrutural dos bambus quanto à compressão, torção, flexão e, sobretudo quanto à tração é conferido pela sua volumetria tubular e pelos arranjos longitudinais de suas fibras que formam feixes de microtubos.

GHAVAMI (2005) ainda explica que o bambu é um material compósito formado basicamente por fibras de celulose longas e paralelas incorporadas a uma matriz lenhosa. A densidade das fibras na secção transversal de um colmo de bambu varia ao longo da sua espessura. Trata-se de um material funcionalmente gradiente, evoluído de acordo com o estado de distribuição do estresse em seu ambiente natural. A Figura 2.5 ilustra que as fibras são concentradas nas regiões mais perto da pele exterior (casca).

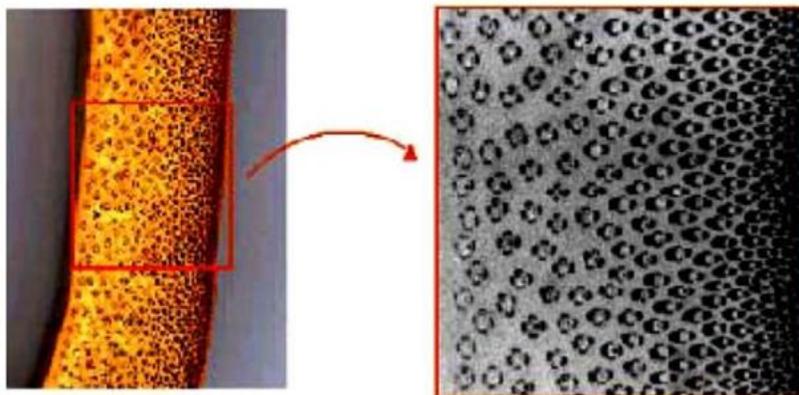


Figura 2.5- Distribuição não uniforme das fibras em função da espessura. GHAVAMI (2005).

A anatomia do bambu é a principal característica que exerce influência sobre as propriedades mecânicas deste material. De acordo com SOARES (2013), a estrutura anatômica determina as propriedades do colmo do bambu, portanto, a sua composição é deliberada pela forma, tamanho, orientação e número de feixes vasculares. O colmo do bambu é tipicamente um cilindro oco, composto por uma série alternada de nós e entrenós que tende a funilar da base para o topo, o qual o diâmetro não possui grande variação até 75% da altura. GHAVAMI; MARINHO (2005) afirmam que além dessa diminuição gradual no diâmetro do colmo no sentido da base para o topo, há o mesmo comportamento na espessura da parede e no comprimento internodal.

FILGUEIRAS; VIANA (2017) argumentam que a riqueza e a variedade morfológica dos bambus são o sustentáculo para conhecimento sobre sua taxonomia, e sua compreensão é fundamental para o reconhecimento correto das espécies. Para eles o bambu pode ser basicamente dividido em raiz, caule, folhas e inflorescências. Os autores ainda explicam que especificamente o caule, como em todas as gramíneas, é dividido em porção subterrânea

(rizoma) e parte aérea (colmo) que são formados pelos nós e entre nós e em sua porção mais elevada ramificam-se os galhos com suas folhas e eventuais florações.

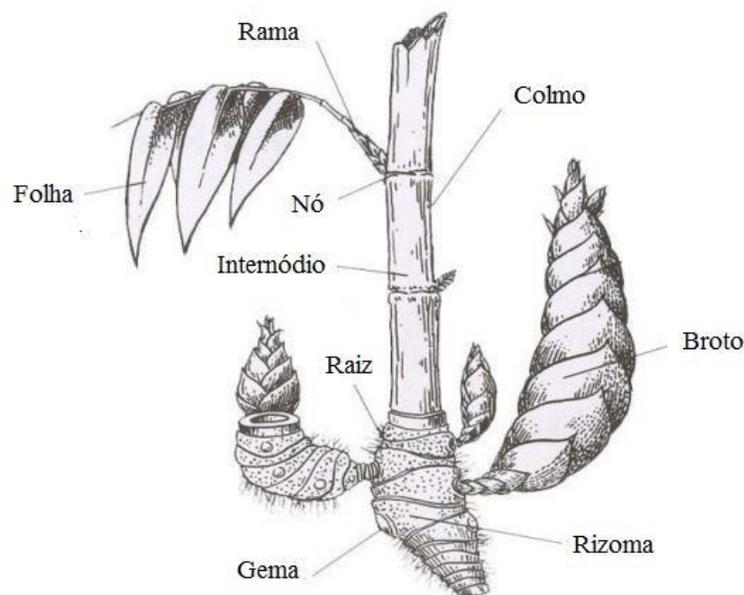


Figura 2.6- Estrutura externa comum a todas as espécies de bambu. Fonte: Adaptado de National Mission on Bamboo Applications. Fonte: NMBA (2004).

O colmo é dividido em intervalos separados por nós contendo diafragmas transversais, Figura 2.7. Como reforço, pode ser usado o colmo, taliscas ou fibras, SUBRAHMANYAM (1984).

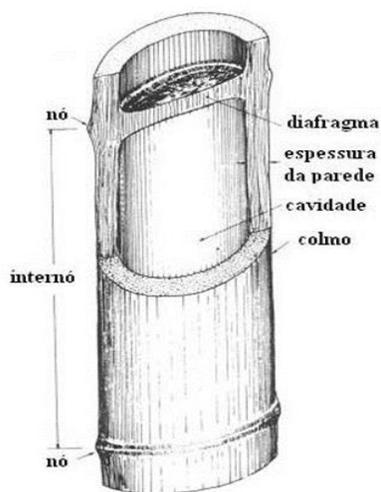


Figura 2.7- Esquema do colmo de bambu. Fonte: SUBRAHMANYAM (1984).

O bambu possui uma geometria circular oca (tubular) bem-acabada com estrutura estável, baixa massa específica o que propicia uma melhor razão resistência/massa do material

contribuindo para um baixo custo de produção, facilidade de transporte e trabalhabilidade, convertendo-se em redução de custos nas construções GHAVAMI (1995).

De acordo com LIESE (1985), a idade de um colmo é um pouco difícil de avaliar. Colmos novos (até 1 ano) não têm ainda folhas e ramos e apresentam uma cor mais esverdeada, possuem folhas caulinares (brácteas) cobrindo os nós dos colmos, sendo que os internós estão cobertos por uma pelagem cerosa que se desprende ao ser tocada. Estes colmos jovens localizam-se na parte mais externa de uma moita. Colmos mais velhos (entre 1 e 2 anos) possuem folhas, ramos e ramificações, apresentam coloração um pouco amarelada e podem ainda reter algumas brácteas que estarão mais secas e escuras. Estes colmos localizam-se mais para dentro de uma moita. Colmos com idade superior a 3 anos, não apresentam mais brácteas aderidas e costumam apresentar manchas provocadas por fungos, musgos ou líquens nos internós, o que é indicativo de estar o bambu maduro.

Estes colmos mais maduros localizam-se mais no interior da moita. O ideal é colocar uma marca a cada ano nos colmos possibilitando a identificação da idade dos mesmos, conforme o número de marcas existentes.

Colmos jovens (1 a 2 anos) são considerados imaturos, com propriedades de resistência diferentes dos maduros (3 ou mais anos), motivo pelo qual devem ser deixados na moita para que completem sua maturação, possibilitando nova brotação. Para uso estrutural ou quando se necessita de maior resistência dos colmos, estes devem ser cortados com no mínimo três anos de idade, devido as suas melhores características de resistência.

A maior resistência dos colmos de bambu ocorre entre os três e os sete anos, que é seu período de vida útil antes que seque na própria moita.

Segundo JANSSEN (1988), somente colmos adultos devem ser colhidos, enquanto que colmos jovens devem ser deixados na moita.

O estabelecimento de uma plantação leva em média de cinco a sete anos, dependendo das condições locais, quando a moita atinge as dimensões características da espécie, como diâmetro, espessura da parede e altura do colmo KUSAK (1999). Uma moita contém sempre certa quantidade de colmos de diversas idades, denominados Brotos (1 ano), jovens (1-3 anos), e maduros (>3 anos), sendo em média formados 10 novos colmos anualmente, não havendo, ainda, concordância geral sobre produtividade LIESE (1985).

De acordo com HIDALGO LOPEZ (2003), as propriedades físicas e mecânicas dos bambus estão correlacionadas com as suas propriedades químicas e anatômicas, destacando-se o teor

de lignina e a espessura das paredes celulares. A lignina é o componente que confere a resistência à tração do bambu. PEREIRA; BERLALDO (2007) explicam que o teor de lignina não sofre influência da idade e que a porcentagem deste componente estabiliza depois da maturidade, em torno de um ano de idade, dependendo da espécie. MARINHO *et al.* (2012) em sua pesquisa analisou quimicamente a região internodal dos colmos do *Dendrocalamus giganteus* visando fornecer informações sobre a sua composição química nas idades de 2 a 6 anos. Os autores constataram que o teor de lignina não sofreu influência da idade mantendo-se um teor com cerca de 23%.

Segundo SALGADO (2000), o bambu exibe melhor desenvolvimento em regiões com temperatura mais elevadas, isento de variações bruscas e por um longo período de frio. Todavia, essas intempéries não prejudicam a sua cultura, somente inibem ou favorecem o seu crescimento. Entretanto, geralmente, a maior parte das espécies se adapta satisfatoriamente ao clima tropical com temperatura variando de 8 a 36°C. O mesmo autor ainda destaca que a velocidade de propagação do bambu é intensa depois que esta é estabelecida. Este tempo de estabelecimento varia entre cinco e sete anos, e a partir daí começa o amadurecimento do bambu que dura em torno de três a quatro anos, fase em que atingem dimensões características de sua respectiva espécie, e assim, torna-se propício a coleta dos colmos.

O bambu se desenvolve bem na maioria dos solos, porém, os solos férteis, soltos e bem drenados, com pH entre 5,0 e 6,5, são os mais adequados para seu desenvolvimento.

Solos muito úmidos ou com lençol freático alto podem inibir seu melhor desenvolvimento, enquanto solos salinos não são adequados para seu cultivo. Quanto à necessidade de chuvas, de uma maneira geral, os bambus se desenvolvem bem com precipitações da ordem de 800mm ou mais mm anuais.

O bambu pode substituir a madeira em diversas aplicações, e com isso diminuir o impacto ambiental por meio do desmatamento, além de não exigir técnicas complexas para o seu estabelecimento como plantação, a irrigação só é necessária em regiões de pluviosidade muito baixa, e não é necessária a aplicação de produtos agrotóxicos. Segundo NOGUEIRA (2009), outra vantagem do cultivo de bambu é que pode ser plantado na maioria dos tipos de solos, pois não exige muito em relação a esse requisito.

A cerca das últimas décadas, o bambu tem sido estudado em várias partes do mundo, inclusive no Brasil. Normas são necessárias para a utilização de forma segura de cada material e a partir desses estudos foi possível criar as primeiras normas de utilização deste vegetal, por meio da

*International Network for Bamboo and Rattan* (INBAR), que estabeleceu normas para determinação de propriedades físicas e mecânicas do bambu as quais foram analisadas pela *International Conference of Building Officials* (ICBO) e publicadas no relatório AC 162: *Acceptance Criteria for Structural Bamboo*, em março de 2000 ICBO (2000), as quais permitem a aplicação do bambu na construção, nos Estados Unidos da América GHAVAMI ;MARINHO (2005).

Os colmos de bambu são constituídos por 50% de parênquima, 40% de fibras e 10% de tecidos, vasos e tubos perfurados LIESE; GROSSER (1972). As fibras contribuem com 60-70% da massa total do colmo, com variações entre gêneros e espécies, relacionadas com os tipos de feixes vasculares.

JANSSEN (2000) comentou que a propriedade física que mais influencia as propriedades mecânicas é a massa específica aparente do material por unidade de volume, a qual varia com a qualidade do seu local de crescimento, a espécie, sua posição no colmo, etc. Foi apresentado um gráfico comparativo de resistência e dureza de alguns materiais tomados em relação à sua massa específica aparente, mostrando que o bambu somente é inferior ao aço, Figura 2.8.

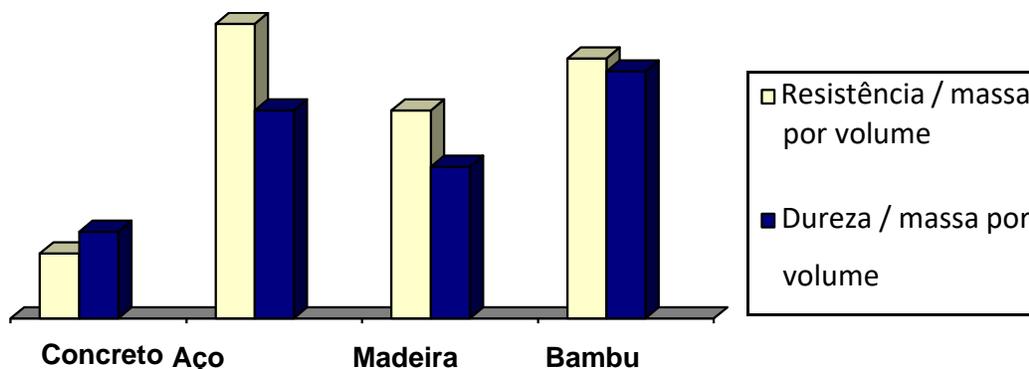


Figura 2.8- Resistência e dureza de alguns materiais e o bambu

Fonte: JANSSEN (2000).

O bambu *Dendrocalamus giganteus* é denominado de bambu-gigante, paquimorfo ou do tipo entoucerante, com colmos de diferentes idades constituindo as moitas. Os colmos da espécie podem atingir 20-30 m de altura, 20-30 cm de diâmetro, 30-45 cm de comprimento internodal e 1-3 cm de espessura da parede, recomendado para a manufatura de lâminas para painéis, polpa e papel, utensílio, alimento, etc LIN (1960).

Os colmos apresentam três fases distintas de crescimento, sendo a primeira caracterizada pelo crescimento em comprimento de até 10 cm por períodos de 24 h, quando atingem cerca de 5 m de comprimento; na segunda, o crescimento atinge a taxa de 15 cm em 24 horas, com faixas de 5 a 15 m e a terceira, com crescimento mais lento influenciado pelo clima, caracterizado pela chuva e baixas temperaturas, NASCIMENTO (1990).

O bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) é relativamente comum em nosso meio e, embora tenha sido introduzido em nosso país oriundo de países asiáticos, têm-se adaptado e reproduzido como se fosse nativo, AZZINI & SALGADO (1981).

A espécie *Dendrocalamus giganteus* apresenta colmos com altura entre 24-40 m, internós entre 0,40 a 0,50 m, diâmetros entre 0,10 e 0,20 m e com parede espessa, no entanto varia de acordo com sua altura. É um bambu de uso geral e que se adapta bem às regiões tropicais e subtropicais, MCCLURE (1993).

### 2.2.2 Estudo da microestrutura do bambu

Nos vegetais, os tecidos são classificados em três sistemas: dérmico, vascular e fundamental. O sistema dérmico corresponde à epiderme e periderme e sua função principal é a de proteção e revestimento vegetal.

O sistema vascular é responsável pela nutrição do vegetal, sendo dividido em xilema (conduz seiva bruta das raízes ao ápice) e floema (conduz seiva elaborada das folhas para os caules e raízes). O primeiro condutor é formado por células mortas impregnadas de lignina, sendo encontrado na região mais interna em relação ao floema, atuando também como tecido de sustentação, devido possuir células alongadas denominadas traqueides e elementos de vasos que são interligados por pontuações em sua parede celular. Já o floema é formado por células vivas, como por exemplo, os elementos crivados que apresentam poros que permitem a comunicação dos protoplastos e também podem estar associados a células parenquimáticas.

O sistema fundamental é o principal constituinte de um vegetal, sendo dividido em parênquima, colênquima e esclerênquima. O primeiro grupo é o principal representante deste sistema e é formado por células vivas e celulose, com um grande vacúolo e com parede celular delgada, sendo responsável por diversas funções vitais. O colênquima é formado por células que auxiliam a formação de outros órgãos e por isso possuem estruturas mais grossas de celulose e são encontrados nas regiões mais jovens dos vegetais. Já o esclerênquima são

células mortas que passaram por processo de lignificação, sendo observados na forma de fibras longas.

Segundo (LUIS et al, 2017), o colmo do bambu, morfológicamente, é classificado como caule e dividido, de fora para dentro, nas seguintes regiões: epiderme, córtex, cilindro vascular e medula. Entretanto, para LIESE (1998); LONDOÑO (2002) apud LUIS et al. (2017), este órgão é dividido apenas em córtex, parênquima e feixes vasculares, sendo que o córtex abrange a epiderme e hipoderme.

A camada mais externa do colmo é composta por células epidérmicas comuns com paredes espessadas, altamente lignificadas e alongadas axialmente. Estas células são cobertas externamente por uma camada de cutina e cera epicuticular, que age como um impermeabilizante que dificulta a perda de água. Além destes tipos de células, há também grandes quantidades de células silificadas que contribuem para o fortalecimento e sustentação da epiderme, assim como, para a dureza dos colmos, explicam LUIS et al (2017).

Logo após a epiderme encontra-se o córtex que é composto por tecidos parenquimáticos. Já a hipoderme é a primeira camada do córtex, geralmente formada de 1 a 3 camadas de células esclerenquimáticas com paredes espessadas ou por células parenquimáticas que concomitantemente com a epiderme lignificada impedem qualquer movimentação de líquidos LIESE (1985); LIESE (1998); QISHENG et al. (2001) apud LUIS et al. (2017).

Para GROSSER & LIESE (1971); LIESE (1998) apud LUIS et al. (2017), de forma geral o córtex é homogêneo e formado por várias camadas de células parenquimáticas com formato alongado ou curto. O tamanho dessas células aumenta da região externa para a interna. As células alongadas são observadas em maior quantidade e apresentam paredes celulares espessadas e sofrem um processo de lignificação durante o crescimento. As células curtas, por sua vez, ocorrem em menor quantidade e possuem citoplasma denso e paredes delgadas que não se lignificam com o decorrer do crescimento. Entretanto, para esses dois tipos de células há numerosos canalículos em suas paredes que permitem a comunicação entre as células e são denominados de campos primários de pontuação nas células com parede primária, e de pontuações em células com parede secundária.

Os mesmos autores ainda explicam que o sistema vascular dos colmos de bambu está disposto em feixes colaterais composto por dois ou três extensos vasos de metaxilema, um ou dois elementos de protoxilema, floema e fibras, exibindo variações em sua composição celular, organização dos tecidos formato e tamanho. Os vasos do metaxilema são maiores que o

protoxilema e são delimitados por espaços intercelulares e cercado por células com parede celulósicas ou lignificadas. O floema, por sua vez, é formado por elementos de tubo crivado e células companheiras e está situado externamente ao xilema, isto é, antes da camada epidérmica.

Conforme LIESE (2003), apud LUIS et al. (2017), as fibras, nada mais são, tecidos esclerenquimáticos reconhecidos pela sua forma longa, afilada e bifurcadas em ambas as extremidades. Além disso, suas paredes são espessadas, constituídas de lignina e inúmeras camadas com orientação diversificada de microfibrilas que auxiliam, simultaneamente, na sustentação e flexibilidade dos colmos.

A quantidade de fibras e feixes vasculares difere por percurso longitudinal do comprimento e largura do colmo. A porção apical e a região externa do córtex do colmo apresentam maior densidade de feixes vasculares e fibras comparadas com sua região mediana, e essa diferença se intensifica na base e região interna do córtex. O aumento da taxa de fibras ao longo do colmo contribui para resistência mecânica superior ao topo do colmo em comparação com região basal LIESE, (1980); GRECO et al. (2011), apud LUIS et al. (2017).

Os autores ainda relatam que na região dos nós, as fibras são curtas com paredes espessas, aforquilhadas e distorcidas, o que contribui para uma densidade específica mais elevada aos nós, influenciando nas propriedades físicas e de resistência mecânica do colmo.

Em sua pesquisa, Palombini (2016) realizou microscopia eletrônica de varredura da seção transversal do bambu mostrando seus principais elementos de sua composição, destacando a maior densidade relativa (porosidade aparente) do esclerênquima, conforme a Figura 2.9.

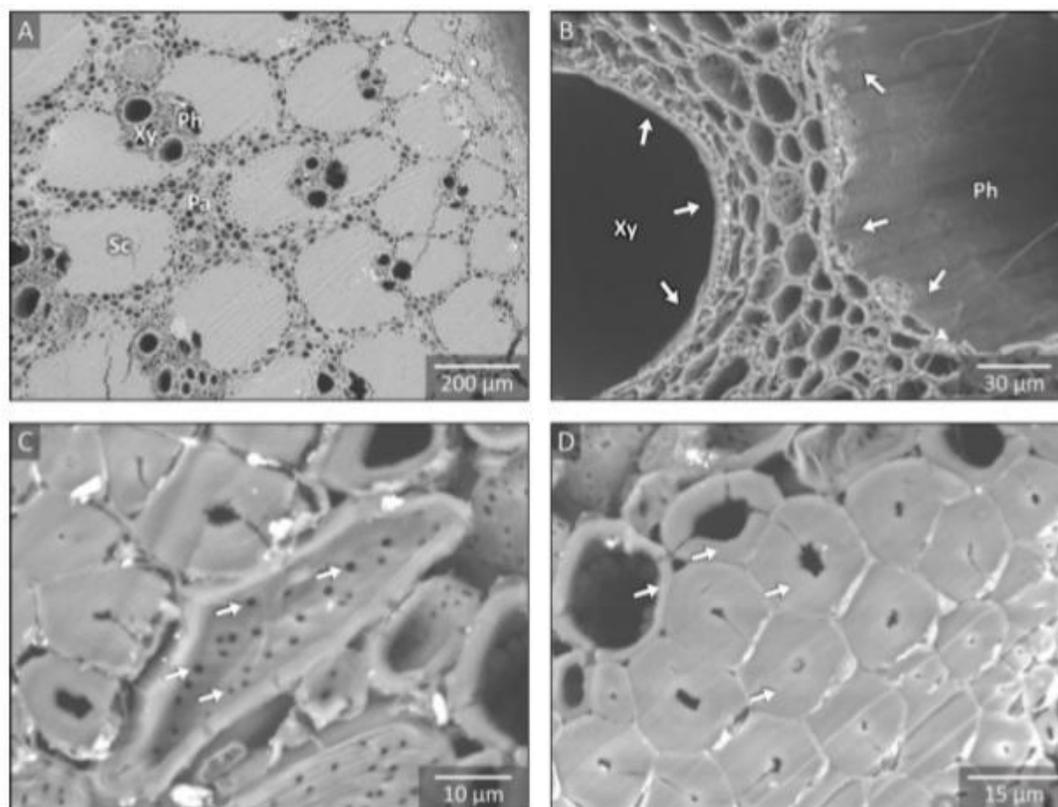


Figura 2.9 - Micrografias eletrônicas de varredura da seção transversal do bambu.

Fonte: PALOMBINI (2016).

Figura 2.10A mostra os elementos dos feixes vasculares: xilema (Xy), floema (Ph), esclerênquima (Sc) e parênquima (Pa), Figura 2.10B mostra o detalhe das paredes celulares do floema, dissolvida, e do xilema, a Figura 2.10C mostra o detalhe das pontoações celulares e a Figura 2.10D mostra o detalhe dos diferentes níveis de lignificação das paredes de células do esclerênquima.

O autor explica que as fibras (células do esclerênquima) são visualizadas em corte transversal na Figura 2.10D e que as setas desta indicam os diferentes níveis de espessamento das paredes secundárias, resultado da incrustação de lignina, que por sua vez, está relacionado com o posicionamento e maturidade da célula, ou seja, a lignificação é inversamente proporcional à idade da célula RAVEN et al. (2013) apud PALOMBINI (2016). Além disso, esse processo leva a morte da célula ocasionando a redução considerável do lume celular e aumento de sua densidade relativa, assim, tornando o esclerênquima mais rígido.

CIDADE *et al.* (2015) verificaram a microestrutura do bambu por meio microscopia eletrônica de varredura afim de visualizar os padrões celulares deste vegetal, conforme ilustra a Figura 2.10.

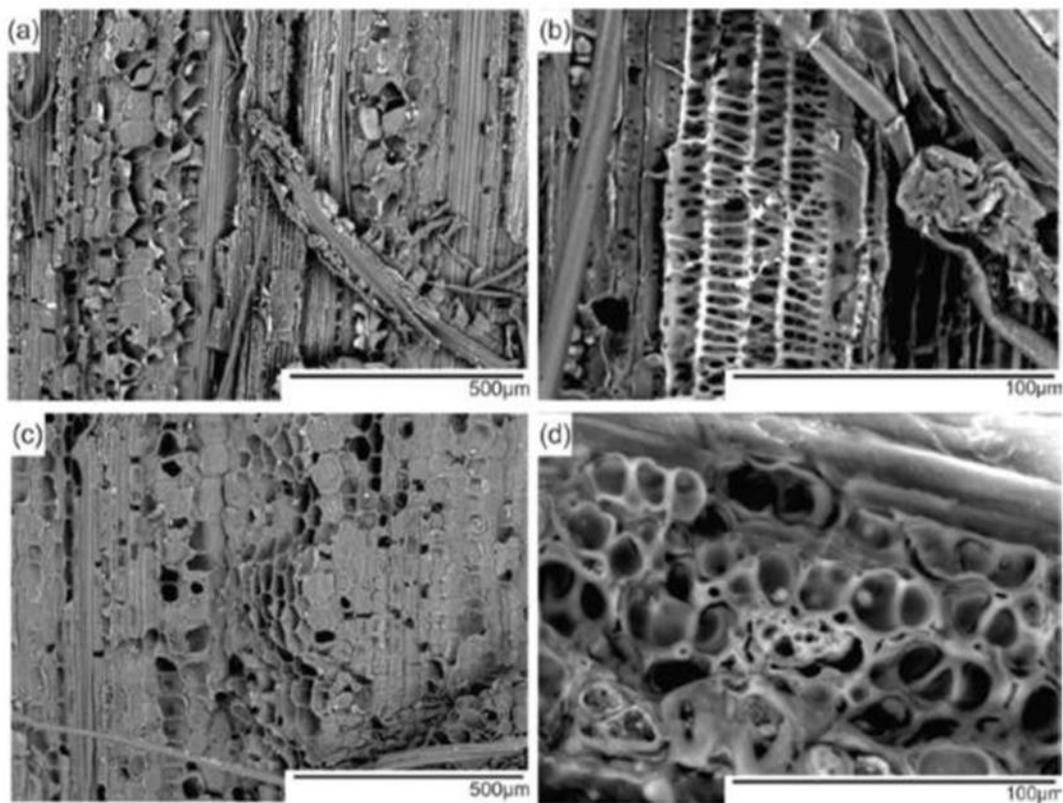


Figura 2.10 - Micrografias eletrônicas de varredura da anatomia do bambu.

Fonte: CIDADE *et al.* (2015).

A Figura 2.10a permite contemplar toda a estrutura em modelo de linhas e formas arredondadas. A primeira estrutura corresponde aos tecidos fibrosos que são responsáveis pela resistência mecânica do vegetal. Já as camadas arredondadas consistem nas células do tecido parenquimático cuja função é armazenar substâncias e pelo preenchimento do bambu FAHN (1990), apud CIDADE *et al.* (2015).

Na Figura 2.10b são observadas as microestruturas das células parenquimáticas protegidas por feixes de fibras ao seu redor, sendo identificadas as dimensões e formatos distintos das células. Esta micrografia corresponde à região interna de um feixe vascular, por onde são conduzidas substâncias e água. Por ser circundada por células parenquimáticas, exibem um formato tubular entrelaçado. A Figura 2.11c ilustra as células arredondadas do parênquima dispostas axialmente no sentido do eixo vertical do colmo. Estas apresentam paredes celulares

fechadas, assemelhando-se a uma colmeia, na qual inúmeras cavidades são ordenadas lado a lado, proporcionando volumetria. Por fim, na Figura 2.11d pode se visualizar as células parenquimáticas dispostas de forma contígua em todas as direções CIDADE *et al.* (2015). Segundo LIESE (1980) *apud* GHAVAMI; MARINHO (2005), de maneira geral, a anatomia do bambu é composta por 40% de fibras, 50% de células parenquimáticas e 10% de vasos vasculares, conforme a Figura 2.11.

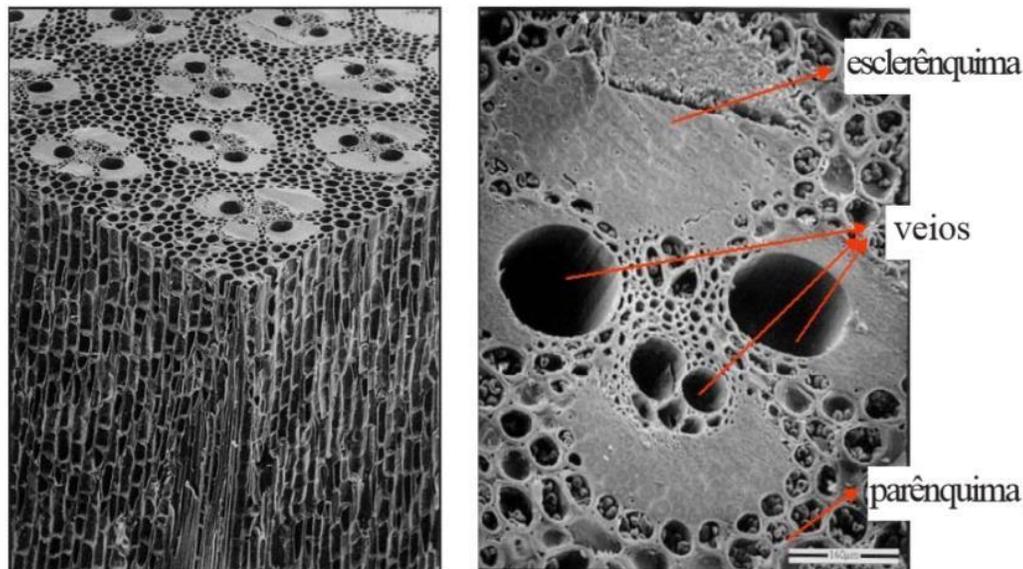


Figura 2.11 - Conjuntos vasculares do bambu obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

Fonte: LIESE (1980) *apud* GHAVAMI; MARINHO (2005).

Sendo assim, o bambu poder se designado como um material compósito formado, sem grande rigor, de fibras longas e alinhadas de celulose mergulhadas em uma matriz de lignina, sendo a densidade de fibras aumenta em direção à casca, GHAVAMI; RODRIGUES (2000) *apud* GHAVAMI; MARINHO (2005).

Os conjuntos vasculares integram os tecidos de transporte da seiva e as fibras, as quais são imersas em uma matriz de lignina (parênquima) e são responsáveis pela resistência mecânica do bambu. Já os vasos conduzem de nutrientes da raiz aos demais órgãos da planta.

O bambu por apresentar colmos esbeltos, estes vasos são cobertos por um tecido esclerenquimático que oferece resistência a esta gramínea. Ao longo do colmo, o sistema vascular é o que exhibe maiores variações, no que se refere à forma, tamanho e distribuição. LIESE (1998) *apud* GHAVAMI & MARINHO (2005).

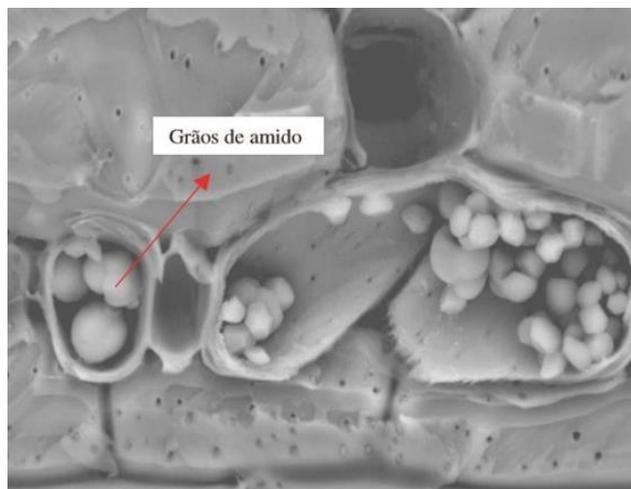


Figura 2.12 - Micrografia de células parenquimáticas preenchidas com amido.

Fonte: (FERREIRA, 2007).

O teor de fibra cresce quase linearmente a partir da parte interna para a parte externa da espessura da parede do colmo. O conteúdo da matriz decai da porção interna para a medial e permanece quase constante, aumentando ligeiramente até a porção externa, onde em contraste, os vazios (vasos + poros do parênquima) mantiveram-se quase constante da camada interna para medial e então decai para a camada externa KRAUSE *et al.* (2016).

Os autores ainda correlacionam às propriedades mecânicas do bambu em função da fração volumétrica de cada componente da microestrutura do bambu, Figura 2.13, afirmando que o comportamento à tração e as propriedades mecânicas são ditados pela fração de volume da fibra. A Tabela 2.1 resume os valores médios dos resultados das propriedades mecânicas do bambu.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus* por camada.

Amostra	$\sigma_t$ - Sd (MPa)	E - Sd (GPa)	$\sigma_c$ - Sd (MPa)
Camada externa	326,3 ± 34,6	30,7 ± 4,7	94,7 ± 8,1
Camada medial	246,9 ± 19,3	27,3 ± 6,2	73,7 ± 4,4
Camada interna	193,7 ± 17,9	17,6 ± 2,2	67,3 ± 3,7

Legenda:  $\sigma_t$ : resistência à tração; E: módulo de elasticidade;  $\sigma_c$ : resistência à compressão; Sd:

desvio padrão. Fonte: Adaptado KRAUSE *et al.* (2016).

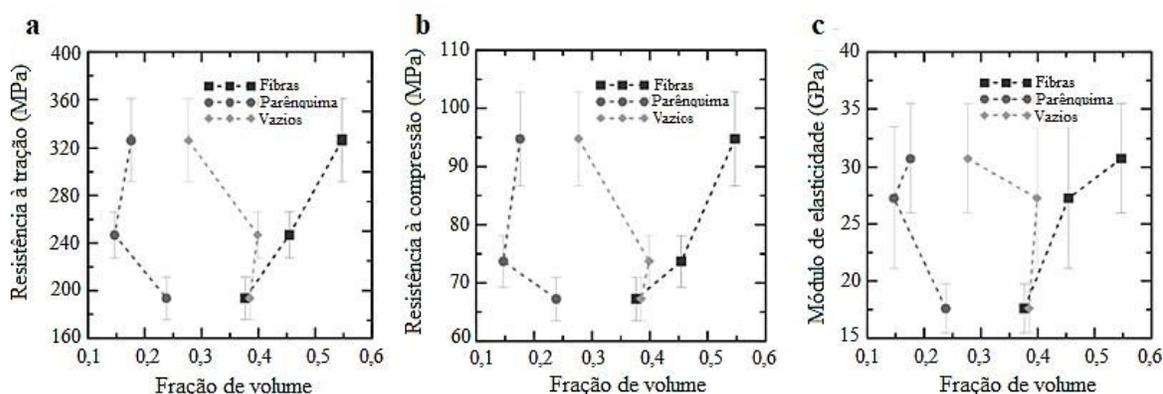


Figura 2.13 - Comparação entre as frações volumétricas e os resultados médios dos ensaios.

Fonte: Adaptado KRAUSE et al. (2016).

A geometria do parênquima é formada por tubos prismáticos de paredes finas unidos com vários reforços transversais em várias alturas, que configuram uma estrutura resistente à compressão, apesar da sua porosidade considerável. As fibras consistem em arranjos de fibrilas torcidas que estão ligados entre si, configurando um feixe de fibras. Os feixes de fibras envolvem os tubos condutores que se ligam com a matriz parenquimatosa. Sozinhos, os feixes de fibras consistem numa geometria exclusivamente resistente à tensão, mas quando associados com a matriz ao longo do seu comprimento completo proporcionam também reforço na compressão devido à composição celulósica cristalina mais dura e mais forte, em comparação com a natureza amorfa lignificada do parênquima. No entanto, quando submetidos a compressão, ocorre um rearranjo antes do reforço ter efeito KRAUSE *et al.* (2016).

### 2.2.3 Degradação do bambu

Existe uma dificuldade pertinente ao se encontrar pesquisas específicas sobre os agentes agressivos ao bambu. No entanto, por se tratar de um vegetal acredita-se que os agentes nocivos ao bambu sejam análogos aos que atacam a madeira. A durabilidade natural da madeira e sua preservação são dois fatores que determinam, em grande parte, a sua utilização, principalmente nos países tropicais.

A principal causa de deterioração da madeira se deve ao desgaste mecânico, principalmente quando esta é aplicada como peça estrutural, a degradação física, o qual o fogo se destaca pelo agente físico principal de destruição, a degradação química, quando se há contato com substâncias químicas, tais como ácidos, bases fortes e óxidos. Também se tem a degradação biológica, que é causada por organismos xilófagos, representados por fungos, insetos, moluscos, crustáceos e bactérias, explicam MENDES; ALVES (1988).

Os mesmos autores ainda explicam que as bactérias tecnicamente não causam graves deteriorações na madeira e apenas se introduzem eminentemente nesta em diversas espécies, tornando-as fartamente absorventes, levando a deduzir que se torna um material mais poroso. Já os fungos são vegetais que não possuem clorofila e seu ataque ocorre em diferentes formas, desde um simples manchamento até a decomposição total da madeira. O ataque de fungos, de modo geral ocorre quando a mesma exhibe umidade superior a 20% em temperatura de 0° a 40°C e, esta, favorece o ataque, pois a maioria das espécies apresentam valores de pH ideais para o desenvolvimento de fungos que que encontra na faixa ácida de 4,5 a 5,5.

Segundo LEVY (1979), os fungos que comumente são constatados deteriorando a madeira são classificados em cinco categorias: podridão parda, podridão branca, podridão mole, mancha e bolor. No entanto, as três primeiras classes são as principais responsáveis pela perda de resistência da madeira. A podridão parda provoca uma rápida perda na resistência mecânica, pois é consequência da ação enzimática sobre a parede celular e, portanto, degradam a celulose e a hemicelulose, pois se tornam mais solúveis facilmente digeridas e assimiladas, deixando intacta a lignina que por sua vez possui coloração escura, conferindo a madeira um aspecto pardo escuro. De forma análoga, a podridão branca também ataca a parede celular provocando a formação de fendas que no decorrer do ataque vão se juntando proporcionando tanto a decomposição da celulose e hemicelulose quanto da lignina, que é o componente que confere a resistência à tração do bambu. Já a podridão mole por fungos é considerada lenta quando comparada as duas primeiras e consiste na penetração de fungos imperfeitos (Ascomycetos) na parede secundária da célula perfurando longas cadeias paralelas a parede celular de forma helicoidal até chegar à parede celular propriamente dita.

Segundo SCHEFFER (1973), os bolores ou mofos, como são popularmente chamados, nada mais são do que a presença de fungos na superfície da madeira que se alimentam de componentes presentes nas células após o corte e por isso exhibe uma formação pulverulenta, de coloração variada que pode ser removido por meio de raspagem. MENDES; ALVES

(1988) explicam que as manchas são fungos que se alimentam de nutrientes presentes nas células e ocupam os tecidos parenquimáticos e perfuram as células horizontalmente, acarretando na formação de pequenos orifícios na parede celular. No entanto, de acordo com FERREIRA (2007) os bolores e as manchas não prejudicam a resistência mecânica da madeira, pois atacam apenas os alimentos presentes na cavidade celular e são inaptos de atacar a madeira se a umidade estiver inferior ao ponto de saturação das fibras, que é em média de 25%.

Resumidamente, LEVY (1979) classifica os organismos responsáveis pela degradação biológica em dois grandes grupos: fungos e bactérias, por meio dos quais o ataque ocorre a nível molecular em que a liberação de enzimas reage com a parede celular destruindo esta estrutura e Cupins, besouros e perfuradores marinhos por meio dos quais a deterioração ocorre pela escavação do organismo, onde estes procuram abrigo ou alimento para sua sobrevivência.

De acordo com OHKE (1989) apud CARDOSO JR (2000), especialista em tratamento de bambu para utilização do material em construção considera que o clima tropical na América do Sul, não é indicado à colheita do bambu no verão, quando há alto índice de chuvas. Aconselha-se que esta seja feita no inverno, a época da seca, quando os colmos apresentam menor teor de umidade e ficam mais leves, inclusive facilitando o transporte. Além disso, a concentração de amido é menor nessa época, já que no período de dezembro a março as plantas liberaram grande quantidade de amido durante a brotação e há menos seiva circulando, o que os deixa menos atrativos aos insetos. Depois da colheita é necessário submeter o bambu a processo de tratamento, que pode ser tradicional e/ou químico.

#### 2.2.4 Variação dimensional do bambu e absorção de água

GHAVAMI (1995) estudou as propriedades físicas de 12 espécies de bambu da cidade do Rio de Janeiro e observou que a média da umidade natural era de 15,9 %, sendo que para a espécie *Dendrocalamus giganteus* foi de 17,6%, espécie com segundo maior valor. No entanto, GHAVAMI (2005) explica que uma das principais deficiências do bambu é a absorção de água quando é usado como reforço em peças com concreto. A capacidade do bambu para absorver água foi estudada em várias espécies conforme é apresentado na, Figura 2.14.

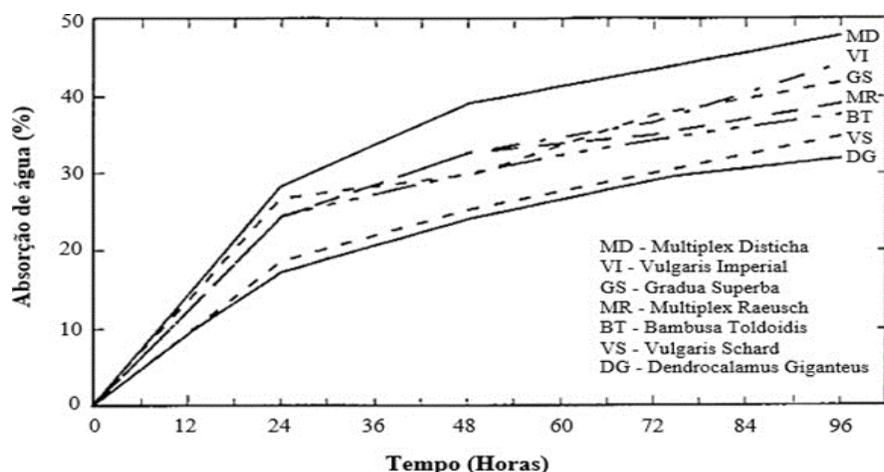


Figura 2.14 - Absorção de água de espécies de bambu.

Fonte: Adaptado GHAVAMI (2005).

BRITO *et al.* (2015) estudaram estabilidade dimensional do bambu por meio das propriedades de retração e de inchamento, com o objetivo de determinar a utilização industrial do bambu *in natura* e as relações existentes entre retratibilidade e expansão volumétrica, ver Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Valores médios dos parâmetros de inchamento e de contração do bambu (*Dendrocalamus giganteus*) em função do tempo de saturação e de secagem das amostras.

Inchamento (%)				
Direção	Tempo (horas)			
	24	48	72	96
Espessura (Radial - R)	6,00 ± 3,70*	7,90 ± 4,20	11,40 ± 5,50	16,40 ± 9,80
Largura (Tangencial - T)	4,10 ± 1,90	5,20 ± 1,70	5,90 ± 4,00	10,90 ± 6,10
Relação T/R	0,68 ± 0,98	0,68 ± 0,50	0,52 ± 0,34	0,67 ± 1,67
Contração (%)				
Direção	Tempo (horas)			
	24	48	72	96
Espessura (Radial - R)	5,80 ± 3,20	7,30 ± 3,50	10,60 ± 4,30	14,00 ± 7,00
Largura (Tangencial - T)	4,10 ± 1,70	5,30 ± 1,60	5,60 ± 3,60	10,00 ± 5,00
Relação T/R	0,72 ± 0,95	0,72 ± 0,46	0,53 ± 0,34	1,01 ± 0,25

Fonte: Adaptado BRITO *et al.* (2015).

Os autores explicam que o bambu apresenta variação mínima no eixo longitudinal, sendo os valores não expostos em sua pesquisa e que ocorrem variações nos valores em relação à largura (tangencial) e, principalmente, no sentido da espessura (radial) do bambu quando este absorve água. De forma análoga aconteceu em relação à contração, com variação gradativa na direção radial chegando ao estado completamente seco, com 14%. Para a direção tangencial, o menor valor obtido foi de 4,1%, sendo observados que as variações dimensionais foram maiores na direção radial.

De acordo com RAJ (1991) *apud* FERREIRA (2007), aos seis meses de idade o bambu pode reduzir o seu diâmetro em cerca de 12% e 16% na sua espessura. No entanto, em fase adulta este bambu diminui esses índices entre 4 e 7% no diâmetro e entre 3 a 7% na espessura da parede do colmo. Em ambiente, o teor de umidade do bambu estabiliza entre 12 e 20%, pois em sua pesquisa o autor observou a absorção de água de colmos de bambu da espécie *Dendrocalamus strictus* com 2,5 anos de idade, os quais depois de quatro dias de imersão em água absorveram entre 51% e 55% de umidade e entre 57% e 64% depois de sete dias de imersão.

### 2.3 CONCRETOS REFORÇADOS COM FIBRAS

Sob um ponto de vista estrutural, no que se refere à fratura, o desempenho do concreto reforçado com fibras é melhorado, como resultado de uma distribuição da fissuração mais favorável, pois há uma diminuição da abertura da fissura e do espaçamento entre elas e um aumento na resistência à flexão. Em termos de estado limite último, obtém-se maior carga máxima e, para rupturas por esforços transversais, existe um melhoramento na ductilidade FERREIRA (2008).

Segundo NAAMAN (2003), para obter o melhor desempenho e mais eficiência da matriz de concreto reforçada com fibras, o coeficiente de Poisson e o coeficiente de expansão térmica devem ser da mesma ordem de grandeza e as fibras devem ter as seguintes propriedades:

- A resistência à tração deve ser maior que a do concreto (duas a quatro ordens de grandeza);
- A força de aderência à matriz de concreto ( $\tau$ ) deve ser de preferência, igual ou maior do que a resistência à tração da matriz;

- O menor auto esforço é usado no compósito através de reforço de fibra, sendo o módulo de elasticidade da fibra maior do que a matriz de concreto, pelo menos três ordens de grandeza.

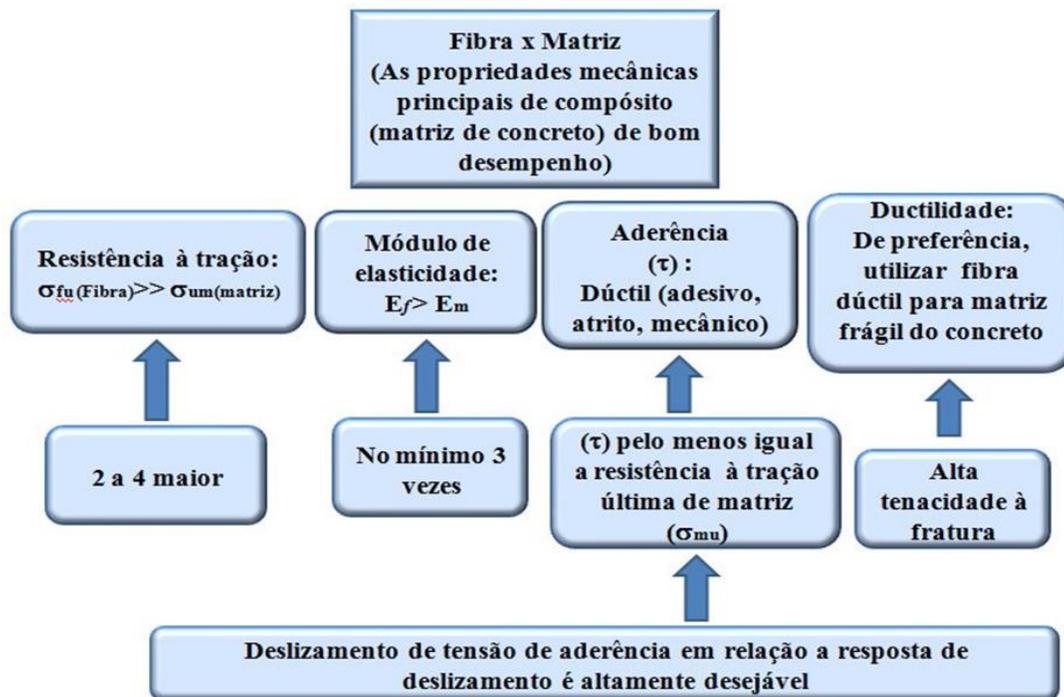


Figura 2.15- Fibras adequadas em relação às propriedades de matriz de concreto. Fonte: NAAMAN (2003).

O concreto simples é caracterizado por possuir baixa resistência à tração e baixa capacidade de deformação BENTUR; MINDESS (2007); FIGUEIREDO (2011). Para determinadas aplicações, seu reforço é necessário, de forma que essas limitações sejam minimizadas. Reforços contínuos (barras de aço) e descontínuos (fibras) são comumente utilizados, sendo o primeiro tipo mais tradicional ACI (2002); BENTUR; MINDESS (2007).

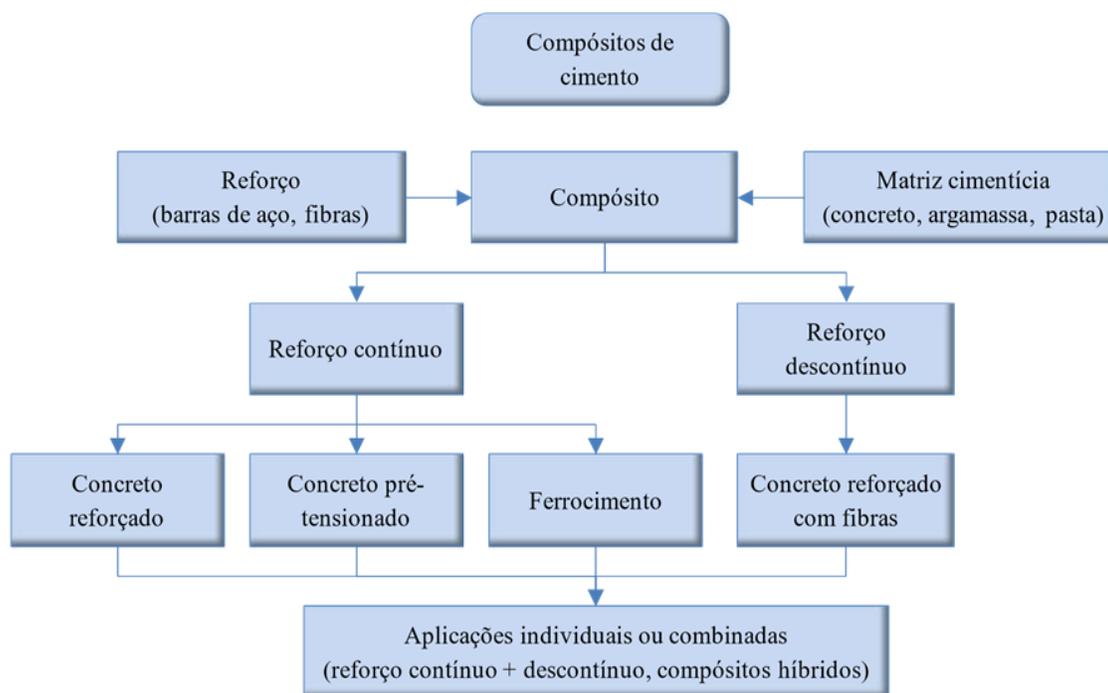


Figura 2.16- Compósitos de cimento vistos como sistemas bi componentes e suas combinações híbridas. Fonte: NAAMAN (2000).

Devido à maior flexibilidade para a fabricação, o concreto reforçado com fibras apresenta-se com um material estrutural relativamente econômico e útil em diversas aplicações. Em pisos, pavimentos e revestimentos de túneis, fibras de aço e sintéticas têm sido amplamente utilizadas em substituição às telas soldadas ACI (2002); FIGUEIREDO (2011). O reforço com fibras é particularmente interessante em elementos de baixa espessura ou elementos sujeitos a grandes cargas ou deformações localizadas BENTUR; MINDESS (2007).

A sinergia entre as fibras e a matriz contribui para que o comportamento do compósito seja aprimorado FIGUEIREDO (2011); NAAMAN (2003). As fibras transferem tensões através das fissuras, diminuindo sua propagação e expansão, conferindo resistência residual pós-fissuração ao concreto DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE (2009); FIGUEIREDO (2011). Distribuídas aleatoriamente por toda a matriz, as fibras proporcionam grande capacidade de absorção de energia, tornando o comportamento do compósito pseudo-dúctil FIGUEIREDO (2011); KIM; NAAMAN; EL-TAWIL (2008); LIM; OH (1999).

### 2.3.1 Matriz de concreto

O tamanho máximo de partícula da matriz é importante porque afeta a distribuição e a quantidade de fibras que podem ser incluídas no compósito. A introdução de fibras no concreto resulta no aumento considerável da sua coesão. É preciso ter atenção especial com a trabalhabilidade da mistura, quando se dosa uma matriz cimentícia reforçada com fibras. A trabalhabilidade pode ser afetada em função de as fibras possuírem uma superfície específica maior e geometria diferente dos agregados presentes na mistura. Esse fator pode acarretar um aumento do atrito interno do concreto e diminuir a fluidez da mistura BENTUR; MINDESS (1990). As funções da matriz do concreto no compósito são:

- Dar a forma ao compósito;
- Proteger o reforço do ambiente;
- Transferir cargas para o reforço;
- Contribuir para melhorias das propriedades que dependem tanto da matriz quanto do reforço, tais como absorção da energia do concreto.

As propriedades físicas da matriz e a relação água/cimento influenciam a resistência de ligação no compósito HANNANT (1978). A eficácia da fibra é muito dependente da resistência da matriz, FIGUEIREDO (2011).

Tabela 2.3- Propriedades típicas da matriz cimentícia.

Matriz	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Módulo de Elasticidade (GPa)	Resistência à tração (MPa)	Deformação na ruptura x 10 <sup>-6</sup>
Pasta de cimento Portland comum	2000 - 2200	10-25	3-6	100 - 500
Pasta de cimento de alta alumina	2100 - 2300	10-25	3-7	100 - 500
Argamassa de cimento Portland comum	2200 - 2300	25-35	2-4	50 - 150
Concreto de cimento Portland comum	2300 - 2450	30-40	1-4	50 - 150

Fonte: HANNANT (1978).

A microestrutura da zona de transição em concreto com fibras de monofilamentos tem sido estudada, principalmente, em pastas de cimento com fibra de aço.

BENTUR; MINDESS (1990) observam que a zona de transição no compósito é rica em CH (hidróxido de cálcio), geralmente em contato direto com a superfície da fibra, e também é muito porosa, tornando-se diferente da microestrutura da matriz de pasta de cimento com agregados. Essas características são resultados da natureza da mistura fresca do compósito. A ligação fraca entre a fibra e a matriz não ocorre necessariamente na interface fibra matriz, mas também pode estar na camada porosa. A interface pasta de cimento - agregado é, geralmente, constituída por duas camadas, como se segue:

- Filme duplex com uma espessura de  $1\ \mu\text{m}$ , sendo subdividida em outras duas zonas (cristais de CH e gel C-S-H);
- Zona de interface com uma espessura estimada entre  $10 - 40\ \mu\text{m}$ , contendo gel C-S-H, etringita (C-A--H) e grandes cristais de CH com várias orientações.

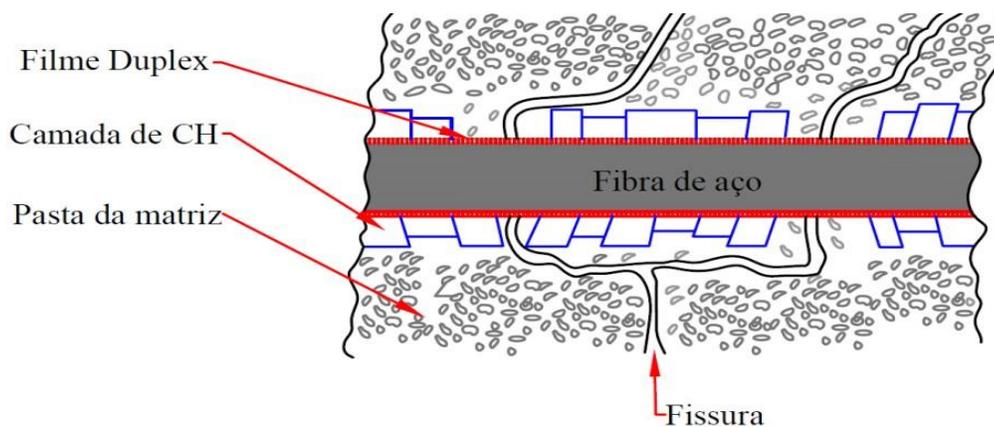


Figura 2.17- Representação esquemática da propagação da fissura pela camada porosa na zona de transição. Fonte: BENTUR e MINDESS (1990).

### 2.3.2 Fibras para reforço de concreto

Fibras são elementos descontínuos, longos e finos, caracterizados por alta resistência à tração em sua direção longitudinal MORRISON; BOYD (2002). Dentre as fibras mais comuns disponíveis no mercado atualmente, estão as de aço, de polipropileno e de vidro, podendo ser classificadas como micro ou macrofibras FIGUEIREDO, (2011).

As microfibras possuem diâmetro da ordem de  $10\ \mu\text{m}$  a  $30\ \mu\text{m}$  e comprimento entre  $3\ \text{mm}$  e  $18\ \text{mm}$ . O principal motivo de sua utilização é o controle de retração e fissuração de matrizes cimentícias na fase plástica. As fibras de vidro, por possuírem alto módulo de elasticidade

(72GPa), também podem ser utilizadas para diminuir os efeitos da retração de concreto na fase endurecida. As dosagens de microfibras giram em torno de 0,10 a 0,30% em volume (ACI, 2002).

Já as macrofibras possuem diâmetro maior que 0,30mm e comprimento que varia entre 30 e 60mm. Disponíveis comercialmente desde a década de 1990 são indicadas para conferir resistência residual pós-fissuração ao concreto (aumento da capacidade de absorção de energia após o rompimento da matriz).

As dosagens mais comuns para obtenção de compósitos com comportamento de softening variam entre 0,20 e 0,60% em volume BENTUR; MINDESS (2007); FIGUEIREDO, (2011).

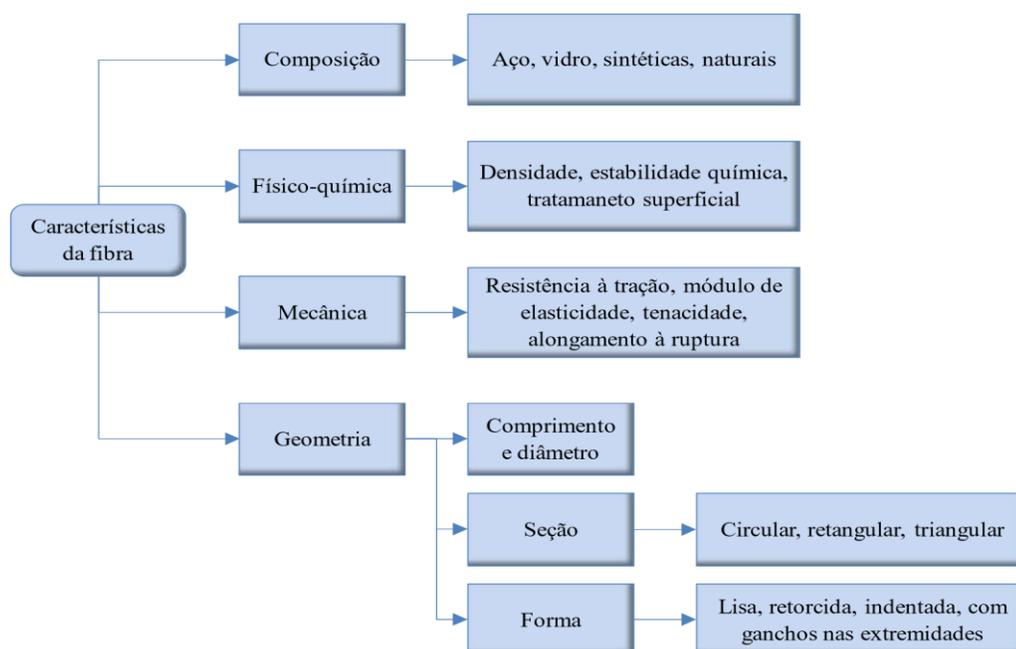


Figura 2.18– Características principais das fibras de interesse para matrizes cimentícias. Fonte: NAAMAN (2000).

A partir da seleção do material constituinte da fibra, inúmeras combinações de propriedades geométricas podem ser utilizadas para aperfeiçoar seu desempenho. Tratamentos químicos e físicos realizados na superfície da fibra aprimoram a interação com a matriz cimentícia. Deformações na estrutura da fibra podem aumentar sua ancoragem mecânica BENTUR; MINDESS (2007); BENTUR; MINDESS; VONDRAN (1989); NAAMAN (2000).

As principais propriedades que influenciam a capacidade de reforço que a fibra pode conferir são sua resistência mecânica (à tração e ao cisalhamento) e seu módulo de elasticidade. As

fibras são caracterizadas como de alto ou baixo módulo, se tiverem módulo de elasticidade superior ou inferior ao do concreto endurecido, respectivamente. De forma geral, as fibras poliméricas têm baixo módulo e as inorgânicas (aço e vidro) possuem alto módulo FIGUEIREDO, (2011a).

A figura abaixo mostra as curvas tensão x deformação de uma matriz de concreto reforçada com três tipos de fibra: uma de baixo módulo, outra de alto módulo e baixa resistência mecânica e a última com alto módulo e alta resistência, considerando o comportamento do compósito como elástico perfeito FIGUEIREDO, (2011a).

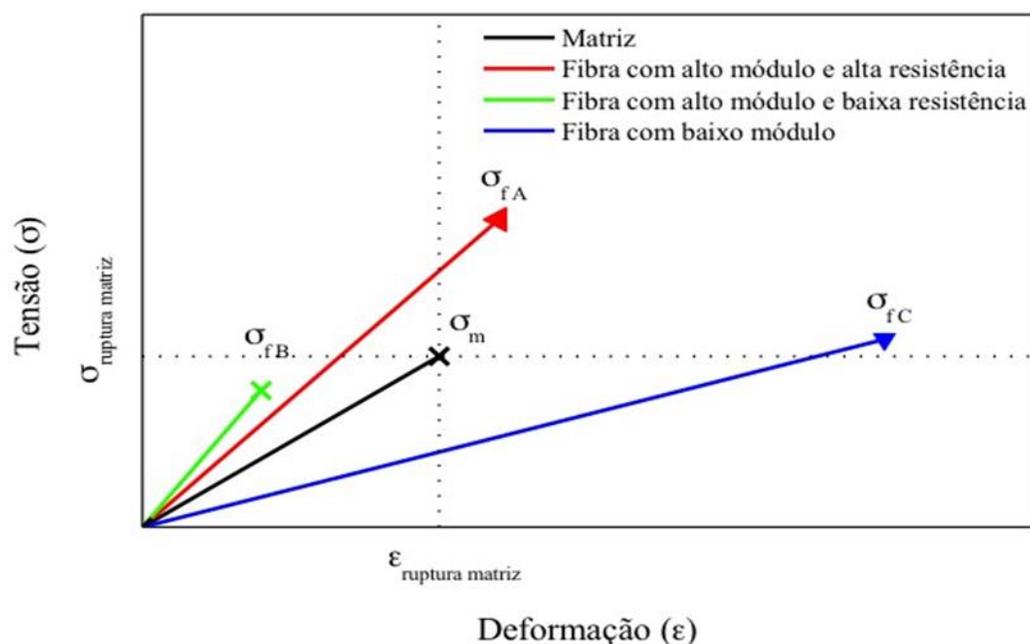


Figura 2.19– Diagrama de tensão por deformação elástica de matriz e fibras de alto e baixo módulo de elasticidade trabalhando em conjunto. Fonte: FIGUEIREDO, 92011a).

Onde:

$\sigma_{fA}$ : tensão de ruptura da fibra de alto módulo e de alta resistência;

$\sigma_{fB}$ : tensão de ruptura da fibra de alto módulo e de baixa resistência;

$\sigma_{fC}$ : tensão de ruptura da fibra de baixo módulo;

$\sigma_m$ : tensão de ruptura da matriz.

Supondo que haja uma aderência perfeita entre as fibras e a matriz, o compósito apresentará diferentes deformações perante esforços de tração, dependendo do tipo de fibra utilizada. O

nível de tensão que uma fibra de baixo módulo pode suportar é inferior à tensão de ruptura da matriz. Então, para que essa fibra apresente capacidade de reforço adequado e consiga controlar a abertura da fissura, seu teor deve ser alto, para que a tensão por fibra não exceda sua tensão de ruptura FIGUEIREDO (2011).

A utilização de fibras de alto módulo e de baixa resistência mecânica pode não conferir capacidade de reforço pós-fissuração ao compósito, pois estas são frágeis e têm baixa capacidade de deformação elástica. No momento em que ocorre a ruptura da matriz, já foi ultrapassado o limite último de deformação da fibra e, mesmo com altos teores, as fibras já terão sido rompidas antes da matriz FIGUEIREDO (2011).

Fibras de alto módulo e alta resistência mecânica apresentam elevado nível de tensão no momento em que a matriz atinge sua deformação crítica. Esse tipo de fibra proporciona um elevado nível de reforço quando a matriz se rompe, mesmo quando utilizada em baixos teores, contanto que sua resistência não seja superada FIGUEIREDO (2011).

### 2.3.3 Volume crítico das fibras

De acordo com HANNANT (1978) e JOHNSTON (2001), o volume crítico das fibras é definido como o volume das fibras que mantém a resistência após a fissuração da matriz e suporta a carga que o compósito sustentou a partir da sua ruptura. Para volumes acima do crítico, o compósito pode aceitar níveis de carregamento crescentes após a ruptura da matriz. Esse conceito é ilustrado na (Figura 2.20).

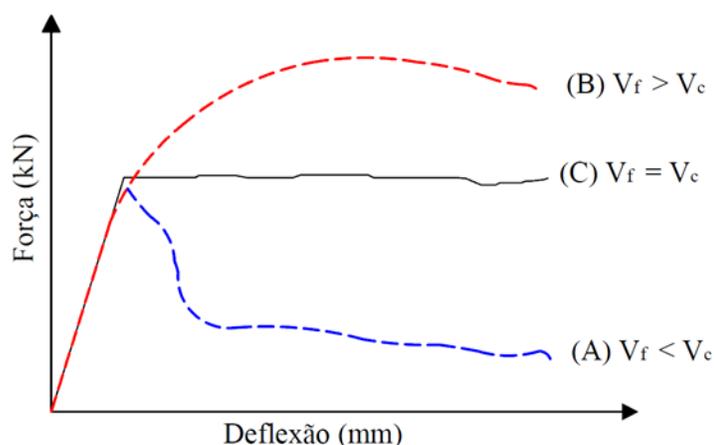


Figura 2.20 - Curvas Força x Deflexão de teores de fibra: (A) abaixo, (B) acima e (C) igual ao volume crítico através de ensaio de tração na flexão. Fonte: FIGUEIREDO (2000).

A carga resistida após a fissuração da matriz aumenta com incremento no consumo de fibras, ou seja, o volume de fibras ( $V_f$ ) é o primeiro elemento a determinar o comportamento do compósito FIGUEREIDO (2011). Para HANNANT (1978), se o volume crítico de fibras para reforço foi alcançado, torna-se possível obter múltiplas fissuras na matriz. Essa é uma situação desejável, porque, basicamente, muda um material frágil de fratura única e de baixo consumo de energia para um material pseudodúctil, cujo comportamento mecânico apresenta melhor desempenho na absorção de sobrecargas e choques com um pequeno dano.

O volume crítico depende da resistência da matriz HANNANT (1978): quanto maior a resistência, maior a quantidade de fibras para transferir a tensão, aumentando a tenacidade do compósito. A determinação do volume crítico de fibras pode ser realizada a partir do modelo ACK (FIGUEIREDO, 2000). O volume crítico pode ser calculado a partir da equação (01):

$$\text{Eq. 01} \quad V_f(\text{crit}) = \frac{\sigma_{um}}{(\sigma_{fu} - \epsilon_{um} \cdot E_f + \sigma_{um})}$$

Onde:

$V_f(\text{crit.})$  = Volume crítico das fibras, dado em porcentagem em relação ao volume do compósito;

$\sigma_{um}$  = Tensão última da matriz;

$\epsilon_{um}$  = Deformação última da matriz;

$E_f$  = Módulo de elasticidade da fibra;

$\sigma_{fu}$  = Tensão última da fibra.

Para HANNANT (1978) e FIGUEIREDO (2001) o cálculo do volume crítico nas condições teóricas envolve vários fatores:

- Comportamento elástico linear da fibra e da matriz;
- A matriz tem comportamento frágil para fissuração;
- O coeficiente de Poisson é zero para fibras e matriz;
- Fibras alinhadas na direção de carregamento;
- Ligação completa entre a fibra e a matriz.

A instabilidade pós-pico ocorre quando o teor de fibras é inferior ao volume crítico. Esse fenômeno acontece após atingir o pico de força máxima correspondente à ruptura da matriz no ensaio de tração na flexão BENTUR; MINDESS (1990); VILLARES (2001).

#### 2.3.4 A interface fibra-matriz

A interface é a região principal que determina uma série de propriedades de sistemas multifásicos ZHANDAROV; MADER (2004). Compósitos cimentícios possuem uma zona de transição da interface (entre 10 e 40 $\mu\text{m}$ ) ao redor do elemento de reforço, cuja microestrutura é consideravelmente diferente do bulk. As características da interface variam com tipo de fibra e são modificadas ao longo do tempo. Além disso, apresentam grande influência na ligação entre a fibra e a matriz e no processo de quebra dessa ligação, quando a fibra é arrancada BENTUR; MINDESS (2007).

A natureza particulada da matriz leva à formação de espaços preenchidos com água ao redor das fibras, principalmente nos monofilamentos, assim como em fibras de aço. Isso pode ocorrer devido à exsudação do concreto fresco e ao empacotamento ineficiente dos grãos de cimento na superfície da fibra. Com isso, a interface fibra-matriz é mais porosa e menos densa, além de apresentar maior concentração de cristais de hidróxido de cálcio, que tendem a se depositar em grandes cavidades. Como esse composto apresenta menor resistência mecânica que o C-S-H, a zona de transição da interface é a região limitante da resistência do compósito BENTUR; MINDESS (2007).

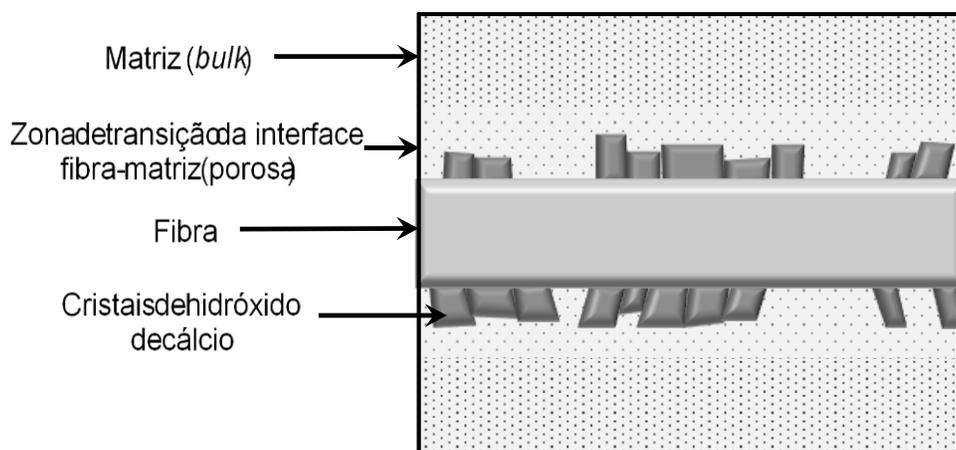


Figura 2.21– A interface fibra-matriz. Fonte: adaptada de BENTUR; MINDESS (2007).

Fibras na forma de multifilamentos podem permanecer na forma de feixes mesmo após a mistura na matriz cimentícia. As fibras que permanecem com essa morfologia possuem espaços entre os filamentos, que tendem a ser preenchidos com produtos da hidratação do cimento se o compósito for mantido em ambiente com alta umidade, sendo a superfície da fibra um sítio para a nucleação desses compostos. Assim, a ligação entre a matriz e a fibra não apresenta grande uniformidade em baixas idades, tendendo a ser mais homogênea com o decorrer da hidratação do cimento BENTUR; MINDESS (2007).

A forma mais tradicional para a avaliação do comportamento mecânico do concreto com fibras é por meio da determinação da tenacidade ou da resistência residual pós-fissuração no ensaio de flexão em prismas.

Assim como em todos os compósitos reforçados com fibras, a ligação entre a fibra e a matriz de concreto é extremamente importante. Macrofibras retas com baixa área superficial serão arrancadas em baixos níveis de tensão interfacial e as tensões geradas na fibra são muito menores que sua resistência à tração. A deformação das fibras pode melhorar sua ligação com a matriz. Entretanto, se a ligação for muito forte, as tensões que se desenvolvem na fibra podem ultrapassar sua resistência, causando sua ruptura. Nesse caso, a energia absorvida pelas fibras é baixa, proporcionando baixa tenacidade. A eficiência da fibra é aprimorada quando seu arrancamento ocorre em tensões que se aproximam de sua resistência à tração BANTHIA (1998).

Os tipos de interação principais que ocorrem entre a fibra e a matriz são a aderência química e física, o atrito e a ancoragem mecânica induzida por deformações na superfície da fibra. A ligação fibra-matriz por aderência ou por atrito é relativamente fraca e somente é significativa em compósitos com fibras de alta área superficial (microfibras, com diâmetro aproximado de 10 $\mu$ m) ou em matrizes com porosidade muito baixa (fator água/cimento de cerca de 0,30). Em concretos convencionais (fibras com diâmetro superior a 0,10mm e fator água/cimento da ordem de 0,40), a ancoragem mecânica é necessária BENTUR; MINDESS (2007).

A forma mais comum de quantificar a energia de ligação entre a fibra e a matriz é pela realização de ensaios de arrancamento (single pull-out). A partir desse teste, pode ser previsto o comportamento pós-fissuração do compósito e o mecanismo de ligação entre a fibra e a matriz pode ser analisado BENTUR; MINDESS (2007).

Em estágios de carregamento posteriores, pode ocorrer à quebra da ligação na interface e o processo de transferência de tensões que predomina é o atrito gerado pelo deslizamento entre

a fibra e a matriz. Nesse caso, ocorrem deslocamentos diferentes para a fibra e para a matriz. A tensão de atrito é uma tensão de cisalhamento e é considerada como sendo uniforme ao longo da interface fibra-matriz. Esse processo é de maior importância na fase pós-fissuração e controla a resistência e a deformação últimas do compósito BENTUR; MINDESS (2007). A transição entre a transferência elástica e a transferência por atrito ocorre quando a tensão de cisalhamento devido à aplicação de carga supera a força de ligação de aderência entre a fibra e a matriz. Quando essa força é superada, a quebra da ligação fibra-matriz é iniciada e a tensão por atrito ocorre na interface onde a ligação já foi rompida BENTUR; MINDESS (2007).

Essa transição é um processo gradual, onde ambos os mecanismos de transferência de tensões podem ocorrer, dependendo da energia de ligação por aderência entre a fibra e a matriz e a resistência à tração da matriz. Em matrizes de alta resistência à tração, a quebra de ligação fibra-matriz pode ocorrer antes da formação de fissuras, quando a tensão elástica excede a energia de ligação por aderência BENTUR; MINDESS (2007).

A principal diferença entre a transferência de tensões na fase pré ou pós-fissuração é que em matrizes não fissuradas a máxima tensão de cisalhamento na interface ocorre nas extremidades da fibra, enquanto que em matrizes fissuradas essa tensão é máxima no ponto em que a fibra entra na matriz. Se a ligação fibra-matriz já foi quebrada previamente, a tensão de cisalhamento será elástica na região afastada da fissura e de atrito nas regiões próximas da fissura BENTUR; MINDESS (2007).

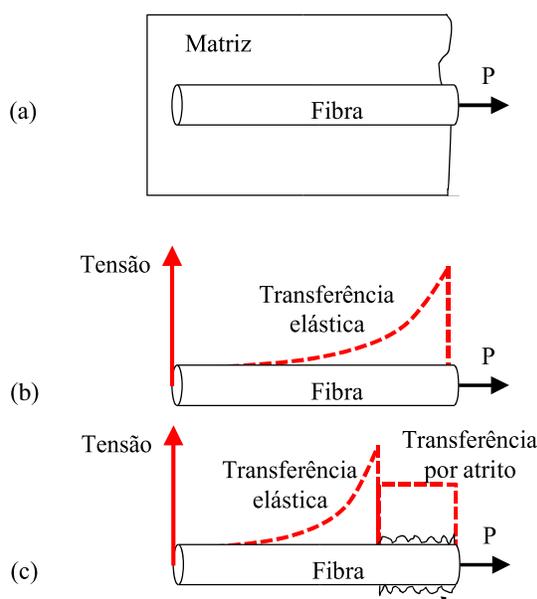


Figura 2.22– Distribuição de tensões ao longo da fibra interceptando uma fissura: matriz fissurada.

Fonte: (BANTHIA, 1998; BENTUR; MINDESS, 2007).

A Figura 2.22a mostra a interface intacta, a Figura 2.2b mostra a ligação fibra-matriz parcialmente rompida e a Figura 2.22c mostra a ligação da fibra-matriz rompida.

O efeito cumulativo de grande quantidade de fibras localizadas na região onde a fissura ocorreu tende a promover maior capacidade de absorção de energia ZOLLO (1996). Nesse esquema, pode ser visto que a propagação de fissuras ocorre na interface fibra-matriz, pois esta é a zona de menor resistência.

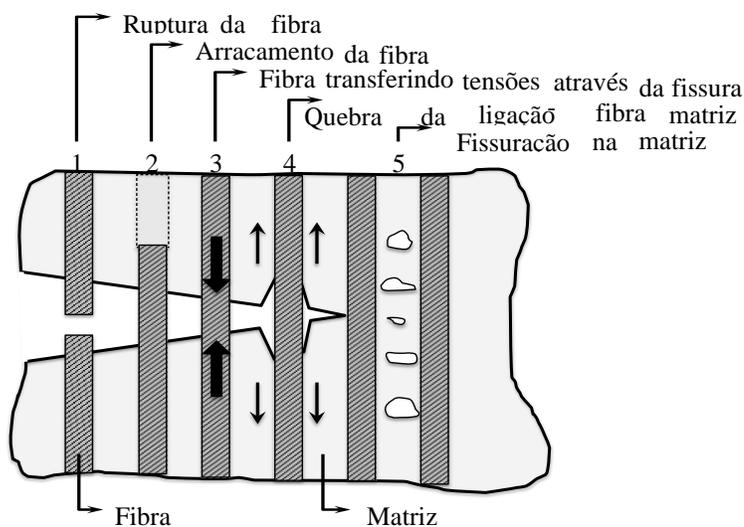


Figura 2.23– Mecanismos de absorção de energia entre a fibra e a matriz. Fonte: ZOLLO (1996).

### 2.3.5 Comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras

#### 2.3.5.1 Classificação de comportamento

Tratando-se do comportamento do compósito em um ensaio de tração, podem ser obtidas duas respostas diferentes NAAMAN (2003):

- Strain- softening: há uma perda progressiva da capacidade resistente da matriz após sua ruptura. Esse fenômeno ocorre devido à abertura de apenas uma fissura NAAMAN (2003);

- Strain- hardening: o compósito apresenta um ganho de capacidade resistente após a fissuração da matriz. Esse fenômeno está associado à formação de múltiplas fissuras até a obtenção da tensão máxima pós-fissuração. A partir desse ponto, o compósito apresenta o comportamento de strain- softening, com a abertura das fissuras formadas NAAMAN (2003). Para ensaios de flexão, o comportamento do compósito também pode ser classificado de duas maneiras NAAMAN (2003):

- Deflection- softening: após a ruptura da matriz, a carga resistida pelo compósito é menor do que a carga de pico obtida no ensaio. É acompanhado da abertura de apenas uma fissura NAAMAN (2003);

- Deflection- hardening: após a ruptura da matriz, a carga resistida pelo compósito é maior do que a carga necessária para romper a matriz. É acompanhado da formação de múltiplas fissuras, até atingir a carga máxima pós-fissuração. A partir desse ponto, o compósito apresenta o comportamento de deflection- softening, com a abertura das fissuras formadas NAAMAN (2003).

Para que o comportamento do compósito à flexão seja de deflection- hardening, a tensão pós-fissuração resistida pelas fibras em um ensaio de tração deve ser, no mínimo, 1/3 da tensão de ruptura da matriz. Em ensaios de flexão, a deformação na seção não fissurada favorece a propagação estável das fissuras, induzindo o comportamento de hardening. Então, se um compósito apresenta comportamento de deflection- hardening em um ensaio de flexão, não necessariamente apresentará o comportamento de strain- hardening em um ensaio de tração (ENTUR; MINDESS (2007); DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE (2009); NAAMAN (2003).

A classificação desses comportamentos depende majoritariamente do volume de fibras utilizado. Para volumes acima do volume crítico (para ensaios de tração ou flexão), obtém-se o comportamento de hardening. Para volumes abaixo do volume crítico, o comportamento é de softening DI PRISCO; PLIZZARI; VANDEWALLE (2009); NAAMAN (2003).

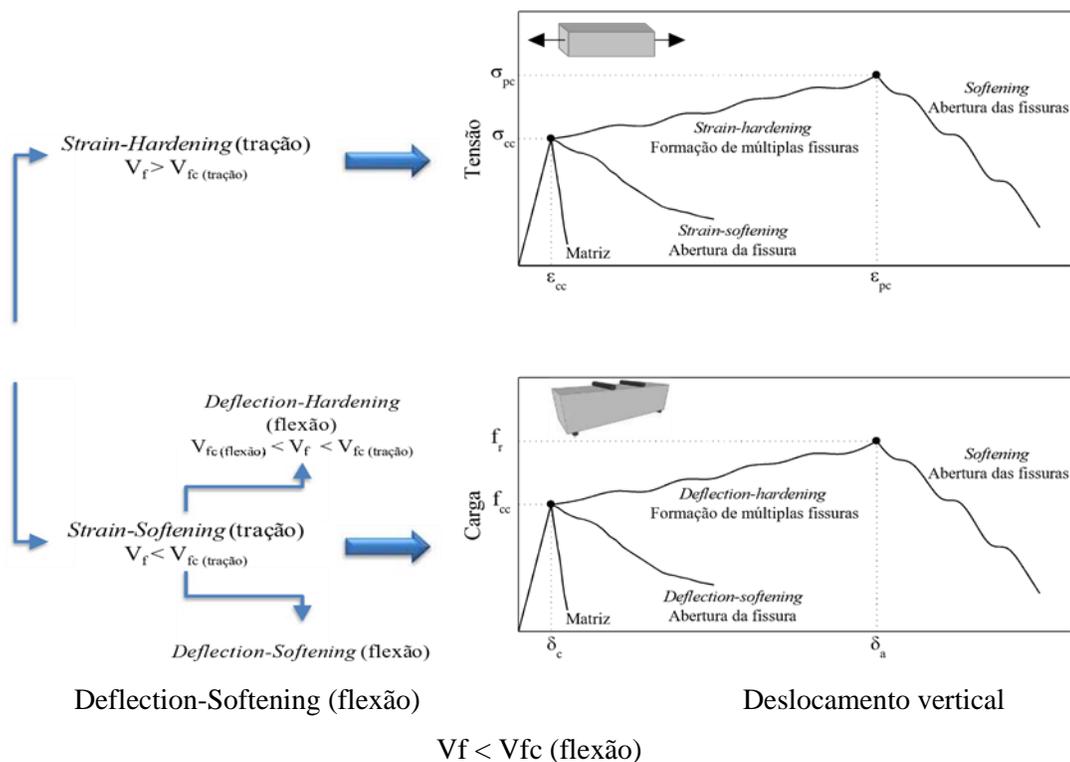


Figura 2.24– Conceitos de softening e hardening para classificação do comportamento de concreto reforçado com fibras. Fonte: DI PRISCO; PLIZZARI, VANDEWALLE, 2009; NAAMAN (2003).

Quando o comportamento do compósito for de deflection- softening, a carga resistida pelas fibras pode aumentar com o aumento da abertura da fissura, devido à maior resistência da fibra ao deslizamento. Esse fenômeno é chamado de slip- hardening e é recorrente principalmente devido à abrasão na superfície da fibra imposta pelo atrito com a matriz. Com isso, fragmentos são liberados da superfície da fibra, aumentando sua superfície de contato com a matriz e, portanto, aumentando sua resistência ao arrancamento LIN; LI (1996). Outro motivo para a ocorrência desse fenômeno são as deformações impostas na fibra, principalmente do torcimento dos fios BENTUR; MINDESS (2007); NAAMAN (2000). Com a maior ancoragem na matriz, a carga que a fibra resiste promove deformações plásticas que proporcionam uma reorganização de sua estrutura molecular, tornando-a mais resistente BENTUR; MINDESS (2007).

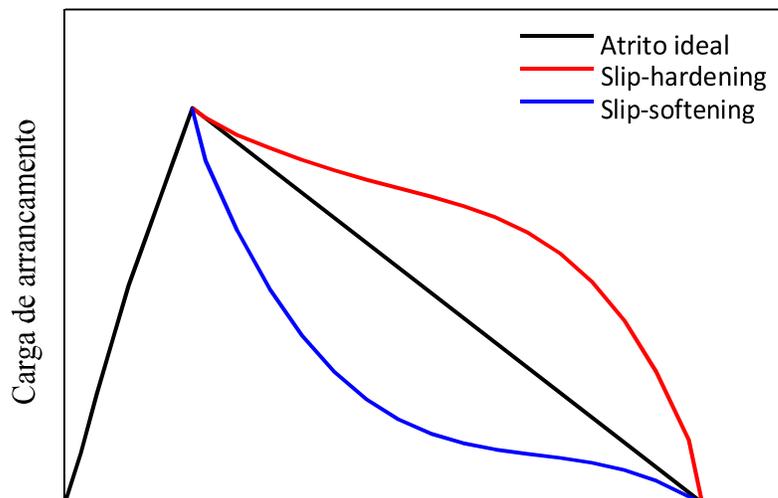


Figura 2.25– Comportamentos da fibra durante seu arrancamento, mostrando o atrito ideal, slip-hardening e slip-softening. Fonte: BENTUR; MINDESS (2007); LIN; LI (1996).

### 2.3.5.2 Tipos de Comportamento mecânico

Algumas propriedades podem ser medidas por métodos utilizados para concreto simples, como a resistência à compressão. As propriedades aprimoradas pela utilização de fibras devem ser avaliadas por métodos de ensaios específicos, a partir da determinação da tenacidade ou da resistência residual do compósito BENTUR; MINDESS (2007).

a) Comportamento à compressão:

HANNANT (1978), BENTUR; MINDESS (1990) e JOHNSTON (2001) destacam que a resistência à compressão da matriz é pouco influenciada pela incorporação de fibras em concreto com teor de 1% aumenta a resistência à compressão em cerca de 0 a 25%. A utilização de teores elevados e fibras longas aumentam levemente a resistência à compressão, Figura 2.26, pois a restrição à deformação transversal provocada pela presença das fibras impede que o concreto rompa prematuramente por perda de monoliticidade GARCEZ (2005).

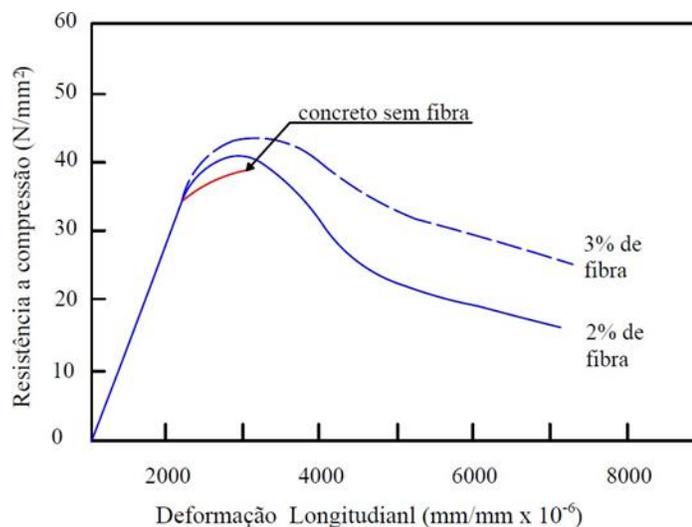


Figura 2.26 - Aumento da resistência à compressão com aumento de volume de fibra.

Fonte: BENTUR e MINDESS (1990).

A orientação das fibras no concreto tem grande efeito no desempenho mecânico do compósito. De acordo com MECHTCHERINE e JUN (2008), a orientação paralela à direção da força aplicada revelou valores levemente mais baixos de resistência à compressão, no entanto, a capacidade de deformação não foi afetada.

b) Comportamento à tração:

NAAMAN (2008) afirma que os materiais compósitos constituídos de fibras descontínuas com base de matriz cimentícia podem ser classificados de acordo com seus comportamentos à tração, normalmente, dividida em comportamento strain-softening e comportamento strain-hardening, conforme a Figura 2.27.

A análise dos diagramas de tensão-deformação de concreto reforçado com fibras (CRF) submetido à tração mostra dois pontos de interesse NAAMAN (2003, 2008):

- $\sigma_{cc}$  - tensão de fissuração – praticamente influenciada pela resistência da matriz;
- $\sigma_{pc}$  - tensão de pós-fissuração – somente dependente das fibras e da tensão de aderência entre fibra e matriz.

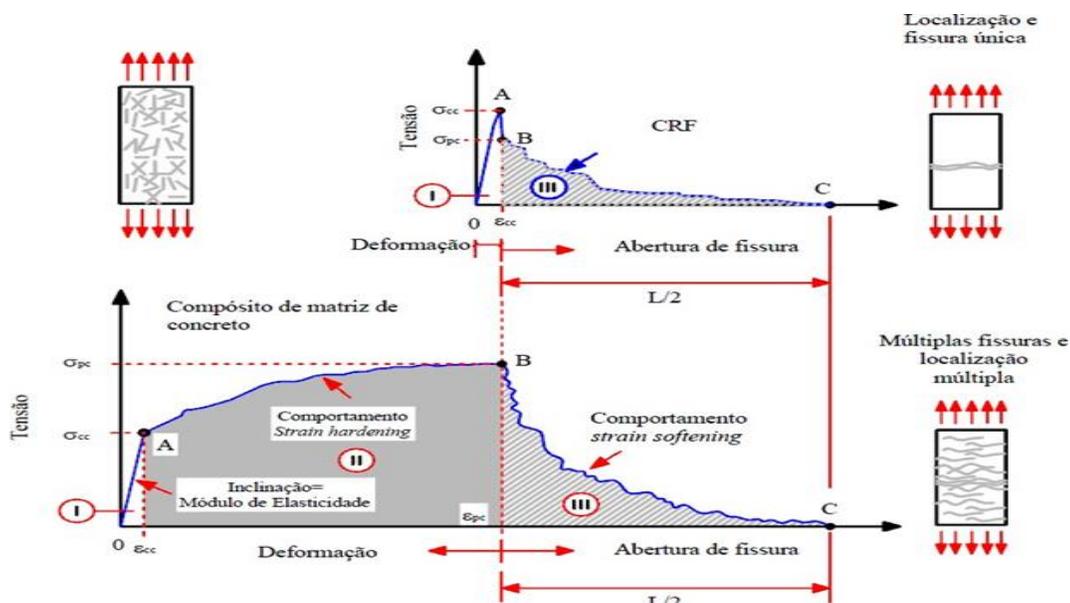


Figura 2.27 - Diagramas de tensão-deformação de concreto reforçado com fibras (CRF) submetido à tração mostram dois pontos de interesse. Fonte: (NAAMAN, 2003, 2008).

O uso dos agregados de maiores dimensões e com elevados teores de fibras na matriz do concreto afetam a resistência à tração, devido ao fato de as fibras apresentarem maior resistência à deformação e tenacidade GARCEZ (2005). O concreto é um composto no qual se podem considerar como fases a pasta, os poros e os agregados FIGUEIREDO (2011). Segundo PASA (2007), a adição das fibras no concreto aumenta a resistência à tração por compressão diametral, conforme resultados obtidos por vários pesquisadores e apresentados na Figura 2.28.

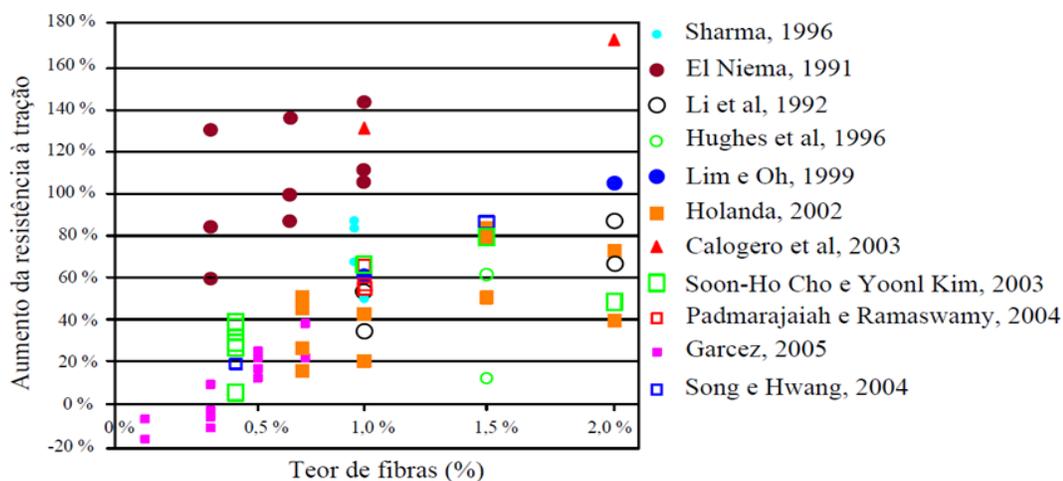


Figura 2.28 - Ganho de resistência à tração por compressão diametral com adição das fibras.

Fonte: PASA (2007).

c) Comportamento à Tenacidade:

No concreto reforçado com fibras, a energia necessária para vencer os mecanismos de reforço das fibras, que se estabelecem após a fissuração da matriz, é muito superior à energia absorvida na ruptura da matriz. Por isso, a capacidade de absorção de energia é a principal propriedade beneficiada pelo reforço das fibras BARROS (1995).

Para SINGH, SHUKL e BROWN (2004), o desempenho das fibras em um compósito pode ser avaliado por meio de sua tenacidade, pois a maior parte da energia até a ruptura provém da aderência entre a fibra e a matriz. Um dos principais motivos para a incorporação de fibras ao concreto é o acréscimo, na capacidade de absorção, de energia pela matriz.

O melhor desempenho do concreto reforçado com fibras quando comparado com concreto convencional vem da sua melhor capacidade de absorver energia durante a fratura. A ruptura da matriz do concreto sem a presença de fibras ocorre de forma frágil, ou seja, o seu comportamento é caracterizado pela rápida propagação das fissuras (resposta pré-pico). Já no caso do concreto reforçado com fibras, a sua ruptura é caracterizada quando a matriz suporta esforços após a sua fissuração, o que ajuda manter a integridade estrutural e de coesão no material (resposta pós-pico) MEHTA; MONTEIRO (2008).

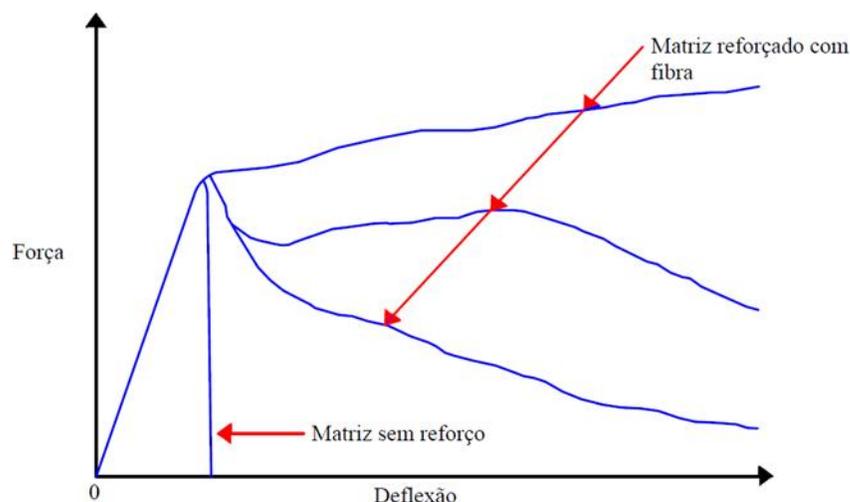


Figura 2.29- Comportamento de concreto endurecido submetido à flexão com várias adições.

Fonte: ACI 554.1R,2002; ISLAM (2012).

Há uma série de técnicas disponíveis para a medição da tenacidade do concreto reforçado com fibras. A maioria dessas técnicas adotam corpos de prova prismáticos como base para

avaliar a medida da tenacidade, a partir de ensaio de flexão. O método de ensaios disponíveis para a medição da resistência de CRF encontra-se resumido na Tabela 2.4.

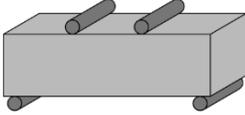
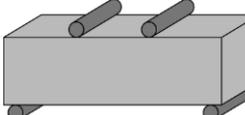
Tabela 2.4– Alguns métodos de ensaio para determinação da tenacidade especificada para o concreto projetado reforçado com fibras de aço.

Norma ou recomendação	Forma do C.P.	Dimensões do C.P. (mm)	Parâmetros monitorados	Medida da tenacidade
Norma americana ASTM C1550 (American Society for Testing and Materials)	Painel circular	D=800 h=75	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Relação entre a energia absorvida para valores solicitados da deflexão central
Norma japonesa JSCE SF-4	Prisma	b= 100 ou 150 h=100 ou 150 L=300 ou 450 C=380 ou 500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Energia absorvida até uma deflexão equivalente a L/150. Fator de tenacidade para uma deflexão equivalente a L/150
FIB 2010 (Fédération Internationale du Béton)	Du Prisma	b=150 h=150 L=500 c=550	Carga x Abertura de fissura medida no meio do vão	Limite de proporcionalidade (LOP), Resistência residuais para valores de abertura de fissura de 0,5, 1,5, 2,5, 3,5 mm
ASTM C1609 (American Society for Testing and Materials)	Prisma	b=150 h=150 L=450 c=500	Carga x deflexão média medida no meio do vão	Resistência de pico, resistências residuais para valores de deflexão de L/600 e L/150

Fonte: Autor

O resumo dos ensaios das normas ASTM C1609 (2010) e JSCE-SF4 (1984) se apresenta na Tabela 2.5.

Tabela 2.5- Resumo dos ensaios das normas ASTM C1609 (2010), JSCE-SF4 (1984) e EN 14651 (2007).

Item	JSCE-SF4 (1984)	ASTM C1609 (2010)
Esquema de ensaio		
Tipo de controle de ensaio	<i>Open loop</i>	<i>Closed loop</i>
Equipamento de controle da máquina	LVDT	LVDT
Geometria do corpo de prova	Prismático	Prismático
Corpo de prova e velocidade	100 mm x 100 mm x 350 mm 150 mm x 150 mm x 500 mm	100 mm x 100 mm x 350 mm 150 mm x 150 mm x 500 mm
Primeira velocidade de deflexão ou da abertura de fissura	(Para C.P. 100 x 100 x 350) L/1500 a L/3000 (mm/min)	(Para C.P. 100 x 100 x 350) 0 a L/900 (mm) de deflexão: 0,025 a 0,075
Segunda velocidade de deflexão ou da abertura de fissura		L/900 a L/150 de deflexão: 0,05 a 0,2 (mm/min)
Primeira velocidade de deflexão ou da abertura de fissura	(Para C.P. 150 x 150 x 500) L/1500 a L/3000 (mm/min)	(Para C.P. 150 x 150 x 500) 0 a L/900 (mm) de deflexão: 0,035 a 0,1 (mm/min)
Segunda velocidade de deflexão ou da abertura de fissura		L/900 a L/150 de deflexão: 0,05 a 0,3 (mm/min)

Fonte: Autor.

### 2.3.6 Trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras

Vários fatores influenciam a trabalhabilidade do concreto reforçado com fibras, por exemplo, o tamanho do agregado graúdo, o fator de aspecto e o volume de fibras utilizado na mistura MEHTA; MONTEIRO (2008). O aumento de diâmetro máximo de agregado graúdo na mistura tem maior efeito na trabalhabilidade do que outros fatores. O fator de compactação é muito importante, segundo VILLARES (2001), pois a vibração decorrente da ação de compactar pode causar rotação e alinhamento das fibras em determinadas direções.

Os ensaios de trabalhabilidade foram desenvolvidos especialmente para o concreto reforçado com fibras de aço. As fibras geralmente tendem a endurecer a mistura e a fazê-la parecer dura, oferecem estabilidade considerável em condições estáticas e, ainda, podem responder bem à vibração. O enrijecimento das fibras pode desaparecer sob o efeito de vibração. A

determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump) não é considerada como um bom índice e pode ser enganadora, para a trabalhabilidade da mistura baseada em condições estáticas. Em geral, é recomendado utilizar o efeito dinâmico nos ensaios de trabalhabilidade BENTUR; MINDESS (1990).

### 2.3.7 Concreto reforçado com fibras naturais

As características do concreto reforçado com fibras dependem muito da resistência mecânica da matriz, do seu módulo de deformação e da sua adesão com as fibras. Modificações nessas características podem aperfeiçoar a eficiência das fibras e aumentar sua durabilidade na matriz cimentícia PIMENTEL et al. (2006).

Segundo a pesquisa de SAVASTANO JR. (1992), pode-se afirmar que, embora as fibras naturais existam em abundância a um custo relativamente baixo, algumas de suas desvantagens permanecem como o baixo módulo de elasticidade, alta absorção de água, susceptibilidade ao ataque de insetos e fungos, carência de durabilidade em meio alcalino e variabilidade das propriedades de fibras do mesmo tipo.

Ao se considerar a compatibilidade de fibras naturais com matrizes cimentícias, quatro problemas deverão ser considerados:

- O baixo módulo de elasticidade e a fraca ligação fibra-matriz, que levanta o questionamento se realmente este tipo de fibras poderiam efetivamente ser utilizadas como reforço do concreto;
  - Algumas espécies de madeiras ou plantas podem retardar o tempo de hidratação do cimento;
  - A estabilidade dimensional do compósito, a qual pode ser inferior se comparada a outros compósitos, devido à capacidade de absorção da fibra;
  - A durabilidade em longo prazo e a perda de resistência à tração e compressão é questionável, devido às variações biológicas, químicas e físicas que a fibra poderá vir a sofrer.
- Segundo (SILVA, 2002) outro problema encontrado na produção de compósitos reforçados com fibras vegetais, é o processo de moldagem e adensamento de argamassas e concreto, ou seja, betoneiras comuns para mistura e vibração para adensamento, gerando problemas que podem ser resumidos em: má distribuição das fibras no interior da matriz; dificuldade de moldagem com teores elevados de fibras; baixas resistências, causadas pela necessidade de

aumento na relação a/c para melhorar a trabalhabilidade da matriz ou concreto em consistência fluida; além de problemas que se referem à durabilidade.

Bentur e Akers, citado por SAVASTANO (1992), estudaram a evolução da zona de transição em compósitos à base de cimento com fibras de celulose e registraram a ocorrência do aumento de porosidade e do acúmulo de portlandita já nas primeiras idades. Em seguida, foram empregadas diversas condições de envelhecimento e constatou-se a "petrificação" das fibras, cujos vazios internos teriam sido preenchidos por produtos de hidratação do cimento, sob condições propícias de carbonatação. Como conclusão do trabalho, constataram a redução da tenacidade do compósito após o seu envelhecimento, com predominância de quebra das fibras.

BENTUR e MINDESS (1990) relatam uma série de pesquisas que constataram que o desempenho do concreto reforçado com fibras foi superior ao convencional, seja com ataques de cloretos, seja por efeito de congelamento.

Melhorar a durabilidade desses compósitos continua sendo um desafio e os principais problemas estão relacionados à incompatibilidade entre componentes das fibras vegetais e da matriz. Vários tipos de carboidratos presentes nas fibras, tais como lignina, hemicelulose, açúcares, fenóis e taninos, interferem na pega do cimento. A presença de determinados compostos torna essas fibras sujeitas à ação degradante de fungos e insetos. Há, também, o ataque alcalino por produtos da hidratação do cimento e a fragilização por mineralização da fibra, resultante da migração desses produtos para seus vazios TOLÊDO FILHO et al (2003). As fibras vegetais apresentam alta absorção de água, o que prejudica a aderência com a matriz, pois sofrem expansão quando imersas na mistura ainda úmida e se retraem, na secagem, gerando descolamento na interface.

A fibra vegetal sofre reações de degradação ao ser posta em contato com a água alcalina do poro da matriz. A lignina e a hemicelulose são os compostos da fibra mais facilmente atacáveis. A água do poro em contato com a fibra, após a reação química, seria, então, neutralizada e o processo de degradação não progrediria. Porém, devido aos gradientes de umidade do ambiente externo, essa água pode migrar, para outras áreas, por difusão. Em sua antiga posição, surge outra porção de água, ainda não neutralizada, e a fibra vegetal sofrerá nova reação química com os compostos alcalinos nela presentes. Esse processo leva a uma degradação progressiva da fibra, com a perda de material de sua superfície GRAM (1983). Além desse tipo de ataque, a fibra pode perder suas características elásticas devido à migração

dos compostos hidratados do cimento para suas cavidades (lúmen e vazios das paredes), onde ocorre a mineralização, tornando-a rígida e frágil. Esses processos levam a uma perda das propriedades desejáveis do compósito, ao longo do tempo.

A queda da durabilidade se reflete no aumento da incidência de fratura da fibra, no interior do compósito, e diminuição da incidência do arrancamento da fibra, com redução da resistência mecânica e da tenacidade do material.

As alternativas para amenizar os efeitos desses processos degradantes, encontráveis na literatura técnica, constam de ações no sentido de reduzir a alcalinidade da água do poro da matriz (por uso de cimentos especiais, menos alcalinos, ou substituição da parte do cimento por pozolanas), tratamentos prévios das fibras (impregnação com sílica), redução de porosidade da matriz (fillers, compactação, processos de cura especiais, vedação externa do componente). As pozolanas usadas, por sua vez, podem vir de fontes economicamente viáveis, como é o caso do reaproveitamento de resíduos, tais como a cinza de casca de arroz, de pó de resíduo cerâmico. A escória de alto forno, subproduto da fabricação do aço, tem-se mostrado uma alternativa viável.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL E METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é laboratorial, dosado um concreto com traço padrão, um de referência, sem fibra e um com adição de bambu. Serão analisados os comportamentos mecânicos, através dos ensaios de compressão axial simples, tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e tração na flexão. Todos os materiais utilizados foram caracterizados conforme as suas respectivas normas.

Foram moldados 40 Corpos de Provas (CP's) cilíndricos e prismáticos: 10 foram moldados com concreto sem adição de fibras, nomeado como concreto de referência (CPB25-00%) e 30 foram moldados com concreto adicionados de bambu (CPB-0,5%; CPB-1,0% e CPB-1,5%).

As seguintes abreviações foram usadas para representar o tipo, comprimento e a fração volumétrica das fibras na mistura:

- As duas letras iniciais: CP – corpo de prova  
A partir da terceira letra: Tipo da fibra utilizada
- N – Nenhuma
- B – Bambu
- Os dois algarismos seguintes – Fck do concreto
- A porcentagem após o hífen – fração volumétrica da fibra

O programa experimental foi elaborado com a finalidade de avaliar as propriedades físicas e as resistências mecânicas do concreto reforçado com fibras do bambu. A pesquisa analisou a interação mecânica e microestrutural, entre o concreto e a fibra de bambu, inicialmente cortados em formato de taliscas extraídas do colmo e em seguida retirada a casca do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*. O concreto foi produzido no Laboratório de Materiais da empresa Tabalmix Concreto LTDA, localizada na cidade de Ananindeua- PA. Segue abaixo a Figura 3.1 que ilustra o fluxograma representativo ao processo realizado da pesquisa.

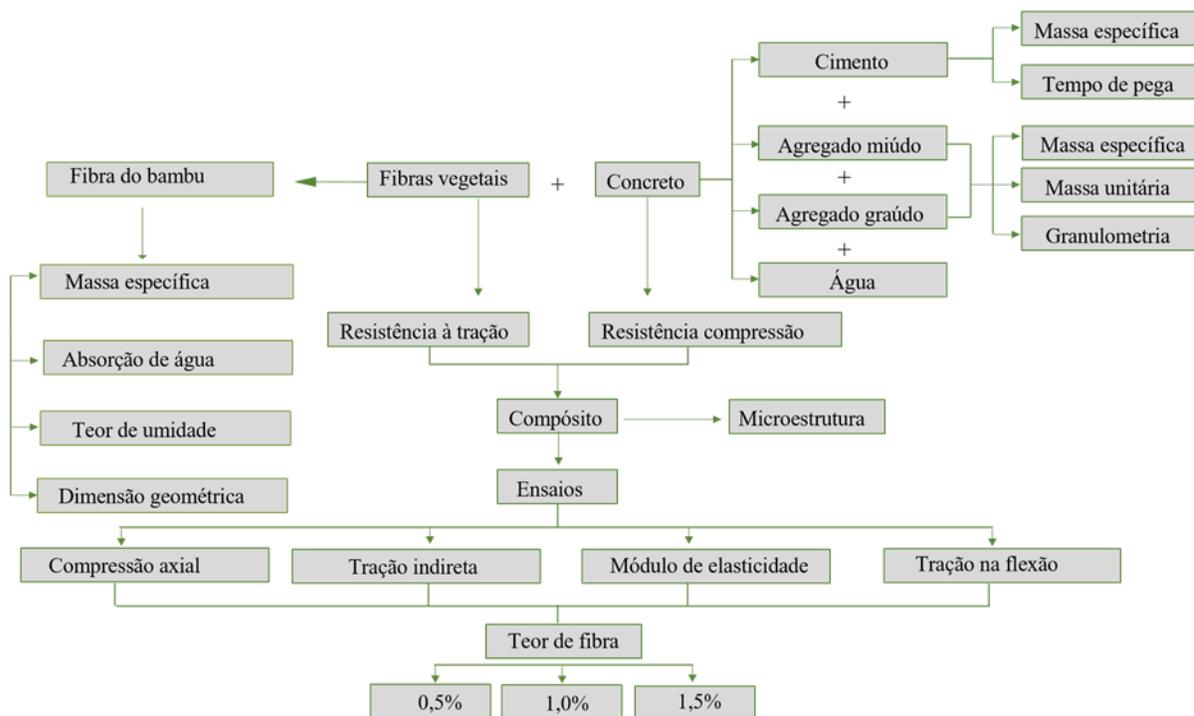


Figura 3.1 - Estrutura do programa experimental. Fonte: Autor.

### 3.1 MATERIAIS

Para moldagem dos corpos de prova cilíndricos de concreto, conforme prescrições da ABNT Para o estudo das características físicas e mecânicas os colmos serão subdivididos em três regiões ou partes consecutivas a partir da base e que serão denominadas parte A (basal ou inferior), parte B (intermediária ou média) e parte C (superior ou apical), conforme se vê na Figura 3.2.

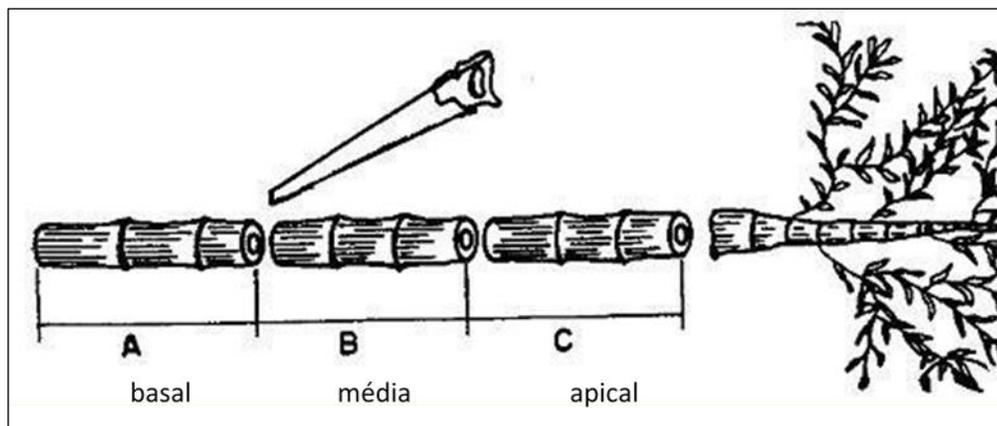


Figura 3.2- Partes do colmo a serem utilizadas. Fonte: PEREIRA (2012).

O bambu utilizado na pesquisa, trata-se do tipo *Dendrocalamus giganteus* com 5 colmos de 2-6 anos, retirou-se a base até a região intermediária do vegetal, ou seja, até altura de aproximadamente 12 metros, foram cortados com facão a touceiras adultas plantadas na EMBRAPA- PA (I), campus da Embrapa Amazônia Oriental- Belém, em agosto de 2017. Estes colmos foram armazenados em sombra na posição vertical, passando por um processo de secagem natural no Laboratório de resistência de materiais, Faculdade de Engenharia Civil, pelo período de 14 meses, até outubro de 2018 (II). Após este período de armazenamento, foi feito o desdobro em serra circular de bancada (corte transversal) de cada seção (A, B e C) em subseções com 80 cm de comprimento (III). Em seguida o beneficiamento inicial, também em serra de bancada para a confecção de taliscas (IV). Armazenamento das taliscas para secagem ao ar até a umidade de equilíbrio (V). Através do processo de corte, utilizando formão de marceneiro, das cascas das taliscas de bambu obteve-se as fibras (VI). As fibras utilizadas foram coletadas após a fase de corte, conforme descrito. Assim segue abaixo a sequência das etapas desse processo de beneficiamento, de acordo com a Figura 3.3.



Figura 3.3 - Processo de obtenção da fibra de bambu. Fonte: (Autor).

A Figura 3.3VI mostra as fibras obtidas através do resultado do lascamento das cascas das taliscas dos colmos do bambu (*Dendroclamus Gigantus*) proveniente do corte com formão de marceneiro e lâminas de aço buscando padronizar diâmetro e comprimento das mesmas.

Nesta pesquisa foi fundamental a realização da caracterização deste material a fim de conhecer suas propriedades, além de possibilitar um maior entendimento do seu comportamento quando misturado ao concreto. Também se avaliou a geometria da fibra e também foram realizados os seguintes ensaios: massa específica, teor de umidade e absorção de água.

### 3.1.1 Fibra de Bambu (*Dendrocalamus Giganteus*)

#### 3.1.1.1 Geometria do bambu

Para determinação da área da seção transversal das fibras do bambu (FB), foram utilizados dois métodos. Um deles foi através do uso do paquímetro digital, Figura 3.5, de 0,01 mm de precisão. Para cada fibra, dentre 30 amostras, calculou-se o diâmetro equivalente a partir de três medidas em posições axiais e ortogonais convenientemente espaçadas (uma em cada extremidade e uma no centro), com a obtenção do diâmetro equivalente ( $D_e$ ), calculou-se a área da seção transversal da fibra, considerando sua geometria retangular. No entanto, esse método tem pouca precisão, pois há variação entre os diâmetros medidos ao longo do comprimento das fibras de bambu, além do fato de que esta não tem a sua seção transversal perfeitamente retangular. Além disso, o pressionamento em excesso da fibra com o paquímetro, pode cabar gerando um resultado impreciso.

O outro método usado para medir a área da seção transversal das fibras foi baseado nas imagens obtidas através de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), onde através da imagem capturada do microscópio adquiriram-se as dimensões do elemento estudado, Figura 3.4. Seccionou-se uma pequena parte da fibra do bambu para visualização de sua seção transversal no microscópio e em seguida contornou o perímetro desta, para que assim fosse gerada a dimensão de sua área transversal. Neste segundo método utilizado é verificada uma maior precisão de medidas, pois à ampliação da imagem mostra-se muito eficaz para reconhecimento do contorno da fibra, possibilitando assim, calcular a área da seção através de um software de engenharia, neste caso utilizou-se o autocad 2016.

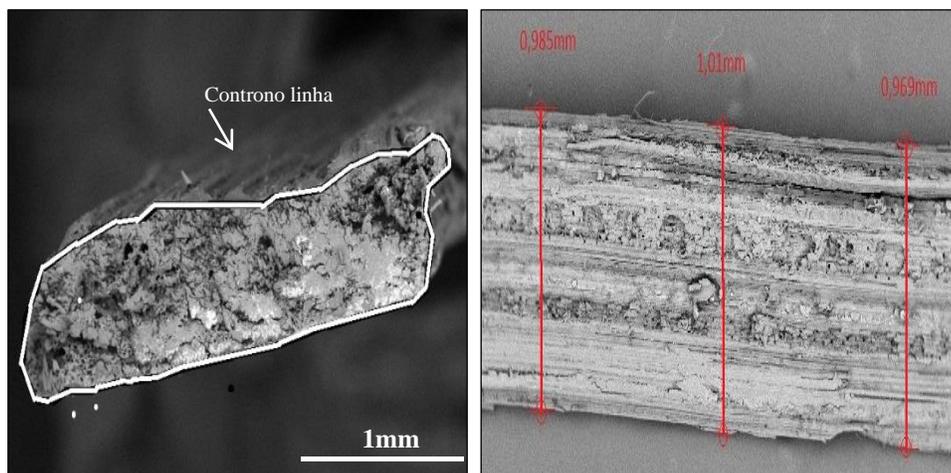


Figura 3.4 – Seção transversal da fibra de bambu por imagem de microscópio eletrônico de Varredura de Bancada (MEV). Fonte: Autor.



Figura 3.5– Ensaio de caracterização realizado com paquímetro. (a) Comprimento da fibra do bambu; b) Diâmetro da fibra de do bambu. Fonte: Autor.

### 3.1.1.2 Massa Específica

Nesta etapa foi caracterizado o bambú para realização do ensaio de massa específica ( $\mu$ ) através de um frasco graduado (100 a 500 ml), o comprimento médio ficou entorno de 40 mm e secas em estufa até constância de massa, ou seja, entre duas pesagens consecutivas, espaçada de 2 horas, não apresentem variação maior que 0,1%.

Esse comprimento foi utilizado de acordo com o obtido após o beneficiamento da fibra e introduzido no frasco graduado, Figura 3.6. Foram introduzidas 10 g de fibras e 375cm<sup>3</sup> de água. Em imersão, o material foi deixado por 24 horas antes de ser efetuada a leitura do

volume de líquido deslocado. Este procedimento é necessário para que o líquido ocupe os vazios do material. A estimativa da massa específica foi calculada através da Eq. (02), sendo ( $m_{fi}$ ) a massa da fibra seca e (L) é a leitura no frasco graduado, passadas 24 horas.

$$\text{Eq. 02} \quad \mu = m_{fi} / (L - 375)$$

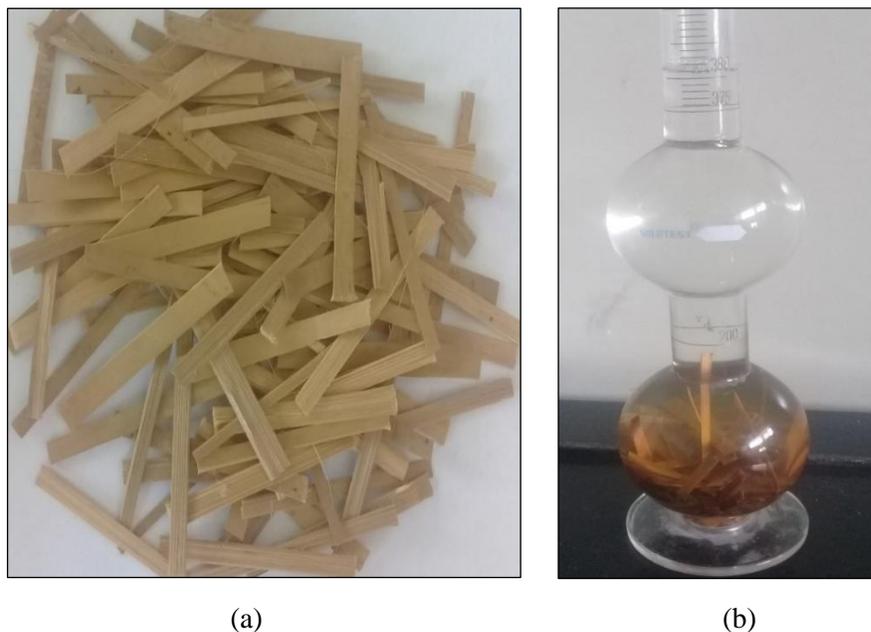


Figura 3.6 – Ensaio de massa específica. (a) tamanho da fibra de bambu. (b) Frasco de Chapman com bagaço de bambu. Fonte: (Autor).

### 3.1.1.3 Teor de umidade e Absorção de água

Conforme visto outrora, o bambu apresenta elevada absorção de água e, conseqüentemente, exibe variações em suas dimensões principalmente na seção transversal. Portanto, tornou-se necessário observar o comportamento do bambu em imersão de água.

Para determinar o teor de umidade (H) da fibra de bambu, as mesmas foram mantidas e expostas ao ar livre dentro do laboratório por 24 horas. Após esse período de tempo, as fibras foram pesadas em balança digital eletrônica (Gehaka BG 4000) com precisão de 0,01g. Antes, as fibras foram colocadas em estufa a uma temperatura de 100°C por 24 horas, e novamente pesados. Para estimar a umidade natural foi utilizada a Equação (03), onde ( $P_e$ ) é o peso após passar na estufa e, ( $P_a$ ) é o peso ao ar livre.

$$\text{Eq. 03} \quad H = \frac{("P"_{\text{a}} - "P"_{\text{e}})}{"P"_{\text{e}}} \cdot 100(\%)$$

A metodologia desenvolvida para o ensaio de absorção segue como realizado por TOLEDO FILHO (1997). O procedimento de determinação do índice de absorção d'água, o bambu seco ao ar livre com comprimento médio de 40mm. As amostras foram secas em estufa até constância de massa e, em seguida, foram colocadas em imersão em água, e tiveram suas massas determinadas, para este procedimento foi utilizado papel absorvente para retirar o excesso de água das amostras.

Procedeu-se então, às determinações de massa com intervalos de 5 minutos, 30 minutos, 1 hora e 2 horas. A partir desse procedimento os intervalos foram de 24 horas até o sexto dia. Posteriormente em intervalos de 48 horas, até atingir o ponto de saturação. Utilizou-se a Equação (04) para calcular a absorção de água, onde (" $P$ "<sub>ht</sub>) é o peso úmido em g no tempo (" $t$ ") e (" $P$ "<sub>e</sub>) é o peso seco em estufa em g. A Tabela 3.1 apresenta dados obtidos dos ensaios de caracterização da fibra de bambu.

$$\text{Eq. 04} \quad A = \frac{("P"_{\text{ht}} - "P"_{\text{e}})}{"P"_{\text{e}}} \cdot 100(\%)$$

Tabela 3.1- Caracterização do bambu.

<i>Dendrocalamus Giganteus</i>			
Ensaio realizado	Resultados	Limites	Método de ensaio
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	1,33	--	--
Teor de umidade	3%	--	--
Absorção de água	8%	--	Toledo Filho (1997).

Fonte: Autor.

A Tabela 3.2 apresenta dados obtidos dos ensaios de absorção de água da fibra de bambu. A Figura 3.7 mostra esses resultados em conjunto com aqueles obtidos por GHAVAMI; TOLÊDO FILHO (1992) para fibras de sisal e coco e por PIKANÇO (2005) para as fibras de Curuá e Jutá.

Tabela 3.2- Absorção de água das fibras no tempo.

Tempo (horas)	24	48	72	96	120	144	192	240	288
Bambu (Este trabalho)	8	11	11	13	13	13	13	13	13
Absorção de água(%)									
Curauá	346	407	426	429	437	440	449	449	449
Sisal	160	175	190	205	210	230	240	240	240
Coco	80	90	95	96	96	96	96	96	96
Juta	223	254	263	274	274	274	275	275	275

Fonte: Autor.

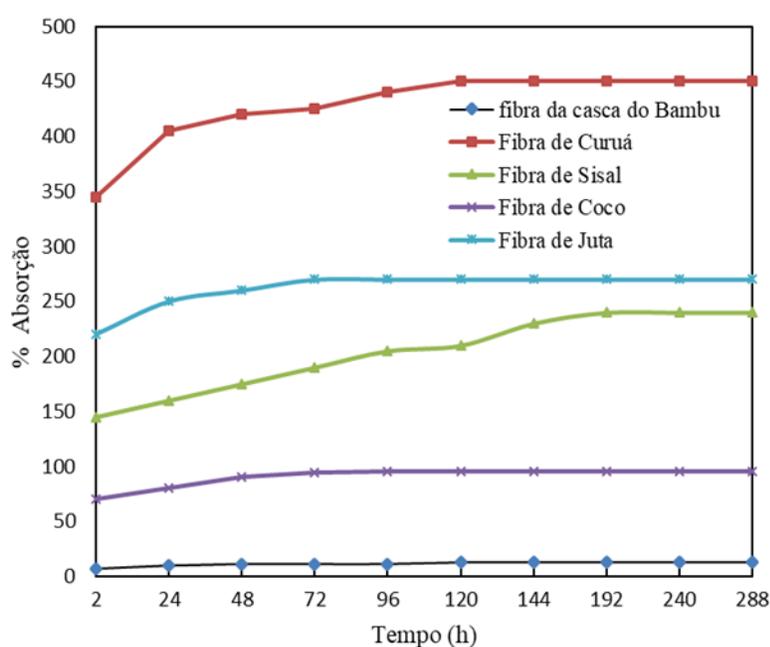


Figura 3.7- Absorção de água das fibras vegetais. Fonte: adaptado PIKANÇO (2005).

Pode-se notar a baixa capacidade de absorção de água das fibras proveniente da casca do bambu, quando comparado com as demais fibras vegetais do gráfico. As fibras de curauá, juta, sisal e coco, respectivamente, chegam a absorver 56, 34, 30, 12 vezes de água a mais em relação as fibras oriundas da casca do bambu após 288 horas de imersão. O bambu absorveu apenas 8% do seu peso seco em água após 24 horas de imersão, não havendo alteração para a saturação mantendo o percentual de 13% de absorção.

Na produção de compósitos cimentícios, uma fibra natural que apresente baixa absorção, a exemplo do que foi observado para o bambu, diminui inconvenientes que poderiam comprometer o desempenho dos elementos moldados. O primeiro deles seria a diminuição da

trabalhabilidade da mistura fresca, uma vez que a água adicionada seria, em boa parte, absorvida pelas fibras, podendo trazer dificuldades nas operações de mistura, lançamento e adensamento. Isso poderia causar a necessidade de maior quantidade de água para garantir certa trabalhabilidade. Se isso ocorrer, esse excesso de água, ao ser perdido por difusão e secagem, poderia resultar em maior porosidade do material compósito, em detrimento da resistência mecânica. O segundo problema seria o fato de que, ao absorvem a água da mistura fresca, as fibras vegetais sofrem considerável expansão transversal, GHAVAMI; TOLÊDO FILHO (1992) e, ao secarem, essas fibras sofrem retração volumétrica no interior da matriz, o que pode causar descolamento entre as duas fases, fibra e matriz. Desse modo, a aderência do reforço à matriz pode tornar-se precária, levando ao rebaixamento dos índices de resistência mecânica do compósito. No entanto, as fibras retiradas da casca do bambu, nos 5 minutos de imersão, alcançaram uma absorção de água de 1,5%, que corresponde à cerca de 20% da absorção total, no ponto de saturação. Em relação ao estado completo de saturação, essa absorção de água na primeira hora não corresponde a uma parcela de considerável. Isso significa que não pode haver grande comprometimento da trabalhabilidade da mistura, pela imersão destas fibras, já que essas atingem se apresentaram baixa capacidade de reter a água, justamente no período necessário ao manuseio da mistura fresca.

#### 3.1.1.4 Fração volumétrica das fibras

Para GIOVEDI (2004), a importância do controle das frações volumétricas está ligada às propriedades do material, como resistência mecânica e módulo de elasticidade. METHA; MONTEIRO (2008) destacam que com adições menores que 1%, as fibras são utilizadas para reduzir a retração, já com adição de até 2%, as fibras aumentam o módulo de ruptura, tenacidade à fratura e resistência de impacto. Para adições maiores que 2%, as fibras aumentam o desempenho do concreto, podendo ser chamados de compósitos de alto desempenho.

O cálculo da fração volumétrica da fibra no concreto foi realizado através da relação do volume da fibra pelo volume total do compósito, a fração é dada em percentual, conforme deduzida através da equação (05) e (06).

$$\text{Eq. 05} \quad V_f = \frac{vf}{vc}$$

Onde:

$V_f$ : Fração volumétrica

$vf$ : Volume da fibra

$vc$ : Volume do compósito

$$\text{Eq. 06} \quad V_f = \frac{\frac{m_{fibras}}{\rho_{fibras}}}{\frac{m_{areia}}{\rho_{areia}} + \frac{m_{seixo}}{\rho_{seixo}} + \frac{m_{cimento}}{\rho_{cimento}} + \frac{m_{\acute{a}gua}}{\rho_{\acute{a}gua}} + \frac{m_{fibras}}{\rho_{fibras}}}$$

Onde:

$m_{areia}$ : massa da areia;

$\rho_{areia}$  : massa específica da areia

$m_{seixo}$ : massa do seixo;

$\rho_{seixo}$  : massa específica do seixo

$m_{cimento}$ : massa do cimento;

$\rho_{cimento}$  : massa específica do cimento

$m_{\acute{a}gua}$ : massa da água;

$\rho_{\acute{a}gua}$  : massa específica da água

$m_{fibras}$ : massa das fibras;

$\rho_{fibras}$  : massa específica das fibras

A Tabela 3.3 mostra a quantidade e fração volumétrica correspondente de bambu utilizado na pesquisa.

Tabela 3.3- Fração volumétrica de fibra de bambu inserido no concreto.

Amostras	6,0kg/m <sup>3</sup>	12,0kg/m <sup>3</sup>	18,1kg/m <sup>3</sup>
Concreto de Referência (%)	0	0	0
Concreto com fibras (%)	0,5	1,0	1,5

Fonte: Autor.

### 3.1.1.5 Resistência à tração da fibra

Não há normatização nacional para ensaios mecânicos em fibras naturais curtas, então, adotou-se orientações da norma ASTM C1557/2014 (*Standard Test Method For Tensile Strength and Yang's Modulus of fibers*) para determinação de resistência à tração e módulo de elasticidade da fibra do bambu. Nesse método, a fibra individual é inserida a uma moldura confeccionada com uma folha de papel kraft, com gramatura 180g/m<sup>2</sup>, Figura 3.8a, onde existe um orifício locado no centro do molde. Este orifício, a princípio, servirá também para determinação do diâmetro, porém levando em consideração a grande variabilidade de diâmetro ao longo da fibra do bambu, o que traz maior imprecisão ao resultado do teste. Foi realizado a conferência de seus diâmetros/áreas de seção transversal conforme método descrito no item de caracterização geométrica das fibras de bambu antes das amostras serem fixadas nos moldes. Em seguida a fibra foi colada na moldura, tomando-se o cuidado de utilizar um comprimento aderido que promovesse uma ancoragem suficiente, assegurando que somente seriam transmitidos, ao segmento livre, esforços de tração. Após a fixação da fibra de bambu, o conjunto foi fixado às garras da máquina, em seguida, os moldes foram seccionados nas laterais, Figura 3.9, para que a carga de tração aplicada atuasse exclusivamente na fibra. A máquina utilizada para esse ensaio foi uma EMIC/Linha DL, Figura 3.9, com velocidade de aplicação de carga de 0,5mm/min.

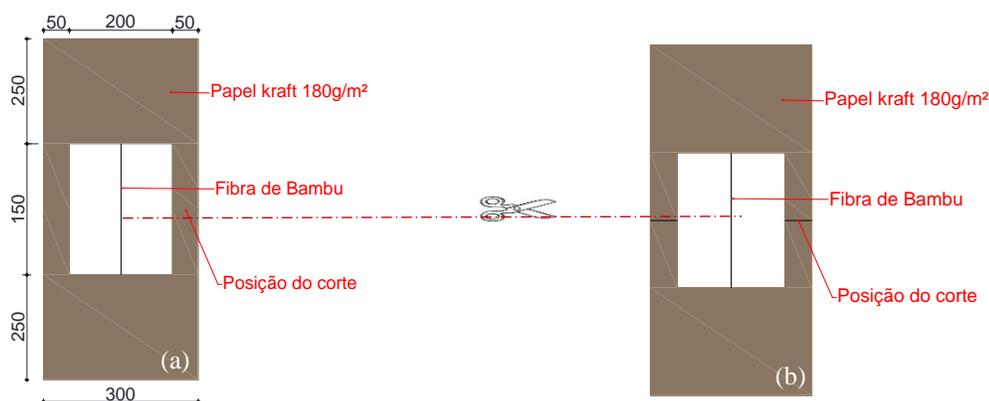


Figura 3.8– Ensaio de tração na fibra. (a) Molde (em milímetros), (b) Detalhe do corte do molde para realização do ensaio. Fonte: Autor.

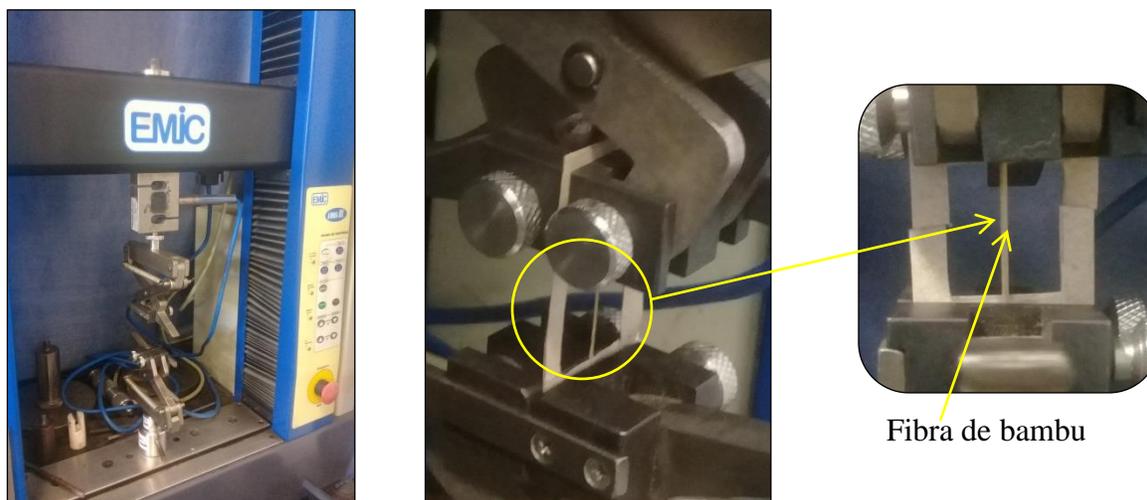


Figura 3.9– Amostra posicionada com corte nas laterais para início do ensaio em máquina de tração.

Fonte: Autor.

O ensaio foi realizado no Laboratório de Ecocompósitos da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará. De posse dos diâmetros médios das fibras, foram ensaiadas 30 amostras, porém foram descartadas aquelas que sofreram deslizamentos o que a ruptura ocorreu próximo ao molde do papel, com isso, obteve-se 20 amostras em conformidade com referida Norma.

Para calcular a tensão de tração da fibra, utilizou-se a carga máxima obtida no ensaio e com os diâmetros previamente medidos, a seção transversal da fibra foi anteriormente calculada. A Equação (07) foi utilizada para determinar os valores de resistência.

$$\text{Eq. 07} \quad \sigma = \frac{P_{\text{máx}}}{A}$$

Onde:

$\sigma$ = resistência à tração, em MPa;

$P_{\text{máx}}$ = carga máxima da tração, em N;

$A$ = área da seção transversal da fibra, em mm<sup>2</sup>

### 3.1.1.6 Módulo de Elasticidade da fibra

Após o ensaio de resistência à tração, obtiveram-se os dados referentes à deformação da fibra para determinada carga aplicada dessa forma, traçou-se a curva tensão *versus* deformação.

Assim pode-se calcular o módulo de elasticidade tangencial no trecho da curva correspondente a 20% e 70% da tensão máxima, aplicando a Equação (08).

$$\text{Eq. 08} \quad E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \times \frac{1}{10^3}$$

Onde:

E= módulo de elasticidade, em GPa;

$\Delta\sigma$ = variação da tensão, em Mpa;

$\Delta\varepsilon$ = variação da deformação unitária, em mm/mm.

### 3.1.1.7 Análise morfológica da fibra

Foi realizada a análise morfológica das fibras por meio da microscopia eletrônica de varredura, executada no Laboratório de Microanálises da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal do Pará. Utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura Hitachi modelo TM3000 Tabletop Microscope CPU Swift ED3000, Figura 3.10.



Figura 3.10- Equipamento para análise microestrutural. Fonte: Autor.

### 3.1.2 Cimento Portland CP IV 32

Nesta pesquisa utilizou-se o cimento tipo CP-IV (Cimento Portland Pozolânico), especificado pela NBR 5736; ABNT (1999). Esse material possui adições de escória e materiais pozolânicos que modificam a microestrutura do concreto, diminuindo a permeabilidade, a

difusão iônica e a porosidade capilar, aumentando a estabilidade e a durabilidade do concreto, melhorando ainda seu desempenho ante a ação de sulfatos e da reação álcali-agregado. Também devido ao menor teor de álcalis em sua composição, evitando o ataque a estrutura do bambu, baixo calor de hidratação, o que o torna bastante recomendável na concretagem de grandes volumes e sob temperaturas elevadas, comparado aos outros disponíveis no mercado. O consumo de cimento por metro cúbico de concreto é um parâmetro fundamental na produção deste compósito, pois define a viabilidade econômica de um traço. Para isso foi necessário conhecer a massa específica deste cimento, determinada conforme a NBR NM 23 ABNT (2001). Além disso, foi realizado o ensaio de tempo de pega de acordo com a NBR 65 ABNT (2003). A Tabela 3.4 apresenta dados obtidos dos ensaios de caracterização física do cimento e Figura 3.11, mostra a curva do tempo de pega do cimento utilizado na pesquisa

Tabela 3.4- Caracterização física do cimento CP IV 32.

Propriedades físicas		CP IV 32	Limites	Norma
	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,85		NBR NM 23:2000
	Consistência Normal da pasta (mm)	5,5		NBR16606 - 2017
Finura	Fibra peneira 200 mm (%)	0,04	<12	NBR 11579:2013
	Área específica (m <sup>2</sup> /kg)	415		NBR NM 76:1998
Tempo de pega (min)	Início de pega	85	≥ 60	NBR NM 65:2003
	Fim de pega	485	≤ 720	NBR NM 65:2003

Fonte: Autor

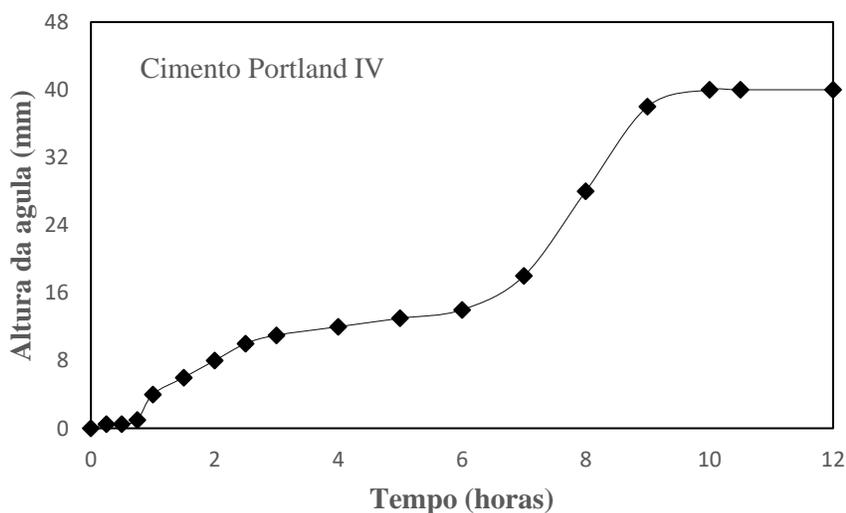


Figura 3.11 - Tempo de pega do Cimento Portland Tipo IV. Fonte: Autor

Na Tabela 3.4 observa-se que o cimento utilizado nesta pesquisa possui massa específica de  $2,85 \pm 0,06 \text{ g/cm}^3$ . A figura 3.11 mostra que o tempo de início e o fim de pega ficaram entorno de 1,5 e 10 horas, respectivamente, portanto, este aglomerante encontra-se dentro dos padrões normativos.

### 3.1.3 Agregado miúdo

Para esta pesquisa foi utilizada areia de origem quartzosa típica da região, fornecida pela empresa Tabalmix Concreto LTDA, proveniente dos leitos de rios próximo da cidade Belém-Pa, localizado no KM 21-PA. Para que a relação água/cimento fosse mantida constante utilizou-se agregado com teor de umidade nulo. Para efeito de caracterização foi determinada sua massa unitária conforme a NBR NM 45 (ABNT, 2006), composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003) e massa específica segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009). A Tabela 3.5 apresenta dados obtidos dos ensaios de caracterização do agregado miúdo.

Tabela 3.5- Caracterização do agregado miúdo.

Ensaio realizado	Resultados	Limites	Método de ensaio
Massa específica ( $\text{g/cm}^3$ )	2,62	--	NBR NM 52:2009
Massa unitária ( $\text{g/cm}^3$ )	1,50	--	NBR NM 45:2006
Dimensão máxima (mm)	2,4	--	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	2,4	--	NBR NM 248:2003
Granulometria	Areia média	--	NBR NM 248:2003

Fonte: Autor

A Figura 3.12 mostra os resultados do ensaio de granulometria, onde o agregado miúdo utilizado neste estudo se enquadra na zona utilizável inferior, ou seja, um material muito fino, característico da região amazônica. Para efeito de dosagem, é estabelecido como um dos parâmetros o abatimento do tronco de cone, esse material, por possuir tal característica, apresenta maior superfície específica e demandaria uma quantidade água maior para se obter a trabalhabilidade adequada. No entanto, é justo lembrar que o agregado miúdo contribui na

produção de um concreto com microestrutura mais densa e compacta melhorando as propriedades do compósito final.

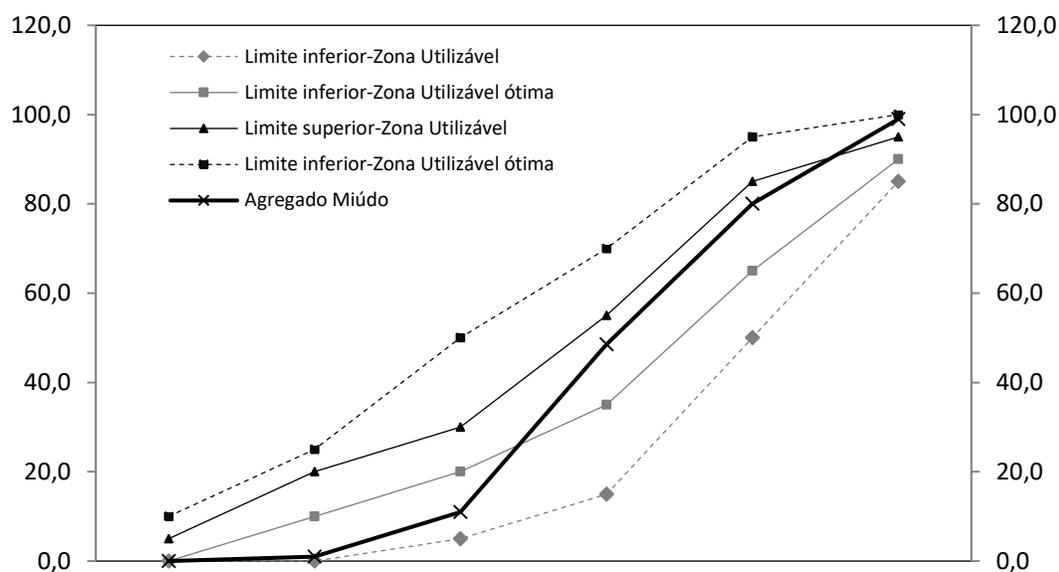


Figura 3.12- Ensaio de granulometria do agregado miúdo.

Outro ponto importante é que este agregado miúdo apresentou uma curva granulométrica não uniforme, ou seja, contínua para cada faixa de peneira. Por esse motivo este material é ideal para dosagem de concretos, pois promove misturas mais econômicas e também contribui para a diminuição dos vazios presentes na mistura, proporcionando melhor desempenho do concreto.

### 3.1.4 Agregado graúdo

Para esta pesquisa foi utilizado seixo de origem quartzosa típica da região, fornecida pela empresa TABALMIX CONCRETO LTDA, proveniente dos leitos dos rios da cidade de Ourém. Para efeito de pesquisa este material foi lavado para retirar impurezas e passaram por processo de secagem para não absorver água de amassamento. Para este material foi determinada sua massa específica conforme a NBR NM 53; ABNT (2009), massa unitária e índice de vazios conforme a NBR NM 45 (2006) e composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248; ABNT (2003). A Tabela 3.6 apresenta dados obtidos dos ensaios de caracterização do agregado graúdo.

Tabela 3.6- Caracterização do agregado graúdo.

Ensaio realizado	Resultados	Limites	Método de ensaio
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,60	--	NBR NM 53:2009
Massa unitária no estado solto (g/cm <sup>3</sup> )	1,60	--	NBR NM 45:2006
Massa unit. no estado compactado (g/cm <sup>3</sup> )	1,65	--	NBR NM 45:2006
Dimensão máxima (mm)	6,3	--	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	2,32	--	NBR NM 248:2003
Granulometria	Dmax=6,3mm	d/D=4,8/9,5	NBR NM 248:2003

Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensões do agregado graúdo

Fonte: Autor.

A Figura 3.13 mostra os resultados do ensaio de granulometria, onde que o agregado graúdo utilizado neste estudo se enquadra no limite superior das peneiras 4,8/12,5, ou seja, seixo considerado fino. Segundo MEHTA; MONTEIRO (2014) os agregados comumente usados para concreto de peso normal apresentam massa específica entre 2600 e 2700 kg/m<sup>3</sup> e massa unitária entre 1300 e 1750 kg/m<sup>3</sup>. Portanto, os agregados utilizados nesta pesquisa atendem as especificações encontradas na literatura.

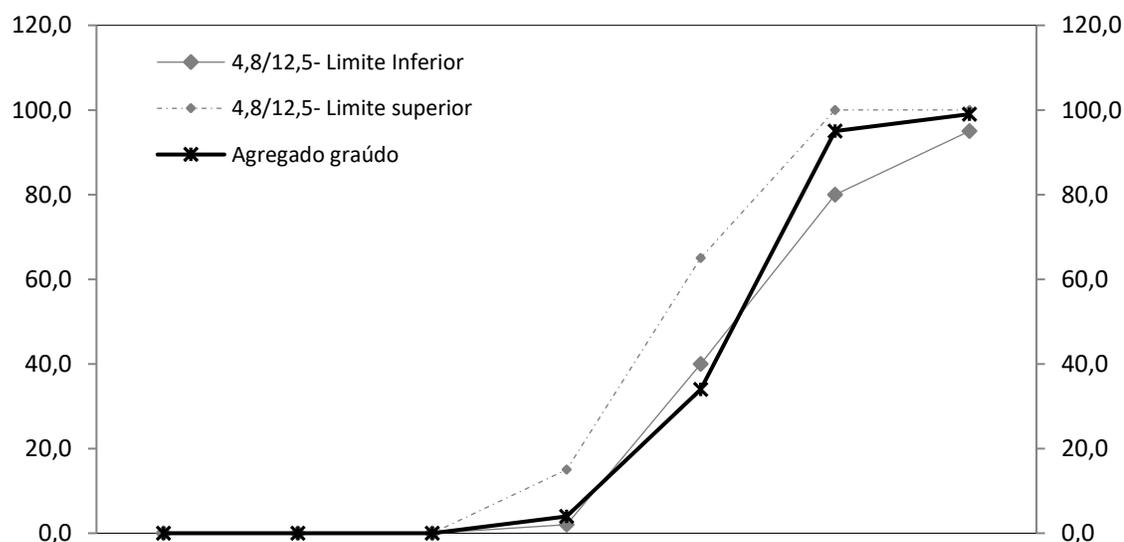


Figura 3.13– Ensaio de granulométrica do agregado graúdo. Fonte: Autor.

### 3.1.5 Aditivo superplastificante

Os aditivos químicos atuam freqüentemente nas propriedades reológicas do concreto e alteram as reações de hidratação do cimento: melhoram a trabalhabilidade, modificam a viscosidade, atuam na retenção de água, aceleram ou retardam o tempo de pega, controlam o desenvolvimento de resistências mecânicas, intensificam a resistência à ação do congelamento, diminuem a fissuração térmica, atenuam as conseqüências do ataque por sulfatos, reação álcali-agregado e corrosão de armadura, entre outras propriedades.

O aditivo empregado nas misturas experimentais é um superplastificante sintético éter policarboxílico modificado (PCE) livre de cloretos. Sua composição básica provém de uma cadeia de que atua como dispersante do material cimentício sem alterar o tempo de pega. A densidade deste material fica entorno de  $1,09\text{g/cm}^3$  com pH de  $7,0 \pm 1,0$  (dados do fabricante). Este aditivo atende os requisitos (tipo P e SP) da NBR 11768; ABNT (2011).

### 3.1.6 Água de amassamento

A água desempenha um papel importantíssimo na produção de concreto, visto que ela é responsável pela hidratação do cimento. A água utilizada para a confecção do concreto produzido nesta pesquisa é oriunda da empresa TABALMIX CONCRETO LTDA, fornecida pela Companhia de Saneamento do Pará, COSANPA. Por se tratar de uma empresa que trabalha exclusivamente com fornecimento de concreto, há periodicamente analisa da qualidade da água, através de ensaios laboratoriais. Portanto, a água utilizada é válida para a produção de concretos.

## 3.2. CONCRETO

### 3.2.1 Dosagem do concreto

O concreto empregado nesta pesquisa foi obtido por meio do método de dosagem IPT/EPUSP HELENE; TERZIAN (1992) que consiste em ajustar o teor ótimo de argamassa estabelecendo, como parâmetro de controle, o valor do abatimento do tronco de cone, que neste estudo foi de  $120 \pm 20$  mm. Os concretos foram confeccionados em betoneira de eixo inclinado com a seguinte ordem de mistura: cerca de 20% da água, agregado graúdo, agregado miúdo, cerca de 40% da água, cimento, fibra de bambu, o restante da água, por último

adicionou-se o aditivo para melhorar a trabalhabilidade e atingir o abatimento estabelecido. A Tabela 3.7 resume as propriedades do concreto produzido.

Tabela 3.7- Traço experimental da pesquisa.

$\alpha$	Traço unitário	a/c	Aditivo <sup>a</sup>	Abatimento tronco de cone	Consumo de cimento	Fck
52%	1: 2,12: 2,88	0,58	0,15 %	100 ± 20 mm	316,95 Kg/m <sup>3</sup>	25 MPa

Legenda:  $\alpha$ : teor de argamassa; a/c: relação água/cimento; fck: resistência à compressão característica do concreto.

<sup>a</sup>- (S.P- Aditivo superplastificante).

Foram utilizadas misturas de concretos de referência (concreto sem fibra de bambu) a fim de atingir resistência à compressão do concreto de 25 MPa (Traço I, Traço II, Traço III e Traço IV). Com adição de fibras com teores de 6,0 kg/m<sup>3</sup>, 12,0 kg/m<sup>3</sup> e 18,1 kg/m<sup>3</sup> para a classe de resistência, foram formados quatro traços de concreto reforçado com bambu, cujas composições e consumo de materiais estão apresentadas na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Composições e consumo de materiais dos traços utilizados.

Componentes	Traço I	Traço II	Traço III	Traço IV
	<b>fck = 25(MPa)</b>	<b>fck = 25 (MPa)</b>	<b>fck = 25 (MPa)</b>	<b>fck = 25 (MPa)</b>
	S/fibras	C/fibras	C/fibras	C/fibras
Cimento(kg/m <sup>3</sup> )	316,96	316,96	316,96	316,96
Areia (kg/m <sup>3</sup> )	671,74	671,74	671,74	671,74
Seixo (kg/m <sup>3</sup> )	913,04	913,04	913,04	913,04
Água (l/m <sup>3</sup> )	183,48	183,48	183,48	183,48
Aditivo (l/m <sup>3</sup> )	0,83	0,83	0,83	0,83
Teor de fibra	-	6,0 kg/m <sup>3</sup> (0,5% volume)	12,0 kg/m <sup>3</sup> (1,0% volume)	18,1 kg/m <sup>3</sup> (1,5% volume)

Fonte: Autor.

### 3.2.2 Produção do concreto

O volume do concreto para cada traço foi igual a 65 litros. Na produção do concreto foi utilizada uma betoneira de 150 litros para misturar a quantidade do concreto por traço.

Foram moldados 04 corpos de prova prismáticos e 36 corpos de prova cilíndricos para todos os traços. Após a produção do concreto, os corpos de prova utilizados nos ensaios de caracterização foram moldados em fôrmas cilíndricas metálicas padronizadas com dimensões de 100 mm x 200 mm. Também foram utilizadas fôrmas metálicas para moldagem dos prismas de dimensões 150 mm x 150 mm x 450 mm. Todos os corpos de prova foram untados com óleo mineral, a fim de facilitar a retirada após a cura.

### 3.2.3 Produção do concreto em cada traço

O procedimento para a produção do concreto foi composto de duas etapas, as quais foram repetidas para os quatro traços requeridos.

ETAPA 1 - Foi lançado um percentual de 20% de água, posteriormente agregado gráudo e miúdo, metade do volume de água em um tempo máximo de mistura de 1 minuto. Adicionou-se o cimento, que foi deixado por mais 1 minuto, e, em seguida, colocou-se a fibra de bambu de forma gradual, a fim de garantir uma melhor dispersão no concreto, o restante de água misturada com o aditivo para um tempo de mistura de todos os materiais em torno de 5 minutos. Para cada betonada foi executada a moldagem de acordo com a norma NBR 5738 (2007). Na Tabela 3.9 estão relatados os números dos corpos de prova moldados em cada betonada.

Tabela 3.9- Número dos corpos de prova utilizados para cada betonada.

Item	Traço I	Traço II	Traço III	Traço IV
	fck = 25 (MPa)	fck = 25 (MPa)	fck = 25 (MPa)	fck = 25 (MPa)
	S/ fibras	C/ fibras (6,0 kg/m <sup>3</sup> )	C/ fibras (12,0 kg/m <sup>3</sup> )	C/ fibras (18,1 kg/m <sup>3</sup> )
Corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm)	9	9	9	9
Corpos de prova prismáticos (150 mm x 150 mm x 450mm) segundo JSCE - SF4	1	1	1	1
Total	10	10	10	10

Fonte: Autor.

Para avaliar a consistência do concreto, retirou-se uma parte da mistura para a realização do ensaio de abatimento de tronco de cone segundo a NBR NM 67 (1998), Figura 3.14 e também determinou-se a massa específica do concreto no estado fresco. A mistura foi colocada num recipiente de volume conhecido (14,8 litros) em três camadas e cada camada foi compactada e adensada com 25 golpes da haste de compactação, de acordo com os procedimentos da ABNT NBR 9833 (2008).



Figura 3.14- Ensaio de abatimento de tronco de cone. Fonte: Autor.

Após a dosagem e misturas dos materiais, foram confeccionados corpos de prova (cp's) cilíndricos de 100 x 200 mm (diâmetro x comprimento), bem como corpos de prova prismáticos de 150 x 150 x 450 mm, Figura 3.15. A moldagem dos corpos de prova e a realização dos ensaios basearam-se na norma da NBR 5738 ABNT (2003).



Figura 3.15- Corpos de prova cilíndricos e prismáticos moldados em formas metálicas.  
Fonte: Autor.

ETAPA 2- Ao adicionar as fibras na matriz do concreto, observou-se que não houve uma perda de trabalhabilidade para o teor 0,5% de fibras, somente quando se utilizou no traço experimental os teores de 1,0% e 1,5%, gerando assim uma diminuição da consistência do concreto. Adicionou-se o teor 0,15% de aditivo superplastificante para corrigir a perda de trabalhabilidade. O tempo de mistura foi de 5 minutos.

Os resultados obtidos para o abatimento do tronco do cone estão apresentados na Tabela 3.10.

Tabela 3.10- Abatimento de tronco de cone de cada betonada sem e com aditivo.

Item	Traço I	Traço II	Traço III	Traço IV
	fck = 25 (MPa)	fck = 25 (MPa)	fck = 25 (MPa)	fck = 25 (MPa)
	S/ fibra	C/ fibra (6,00 kg/m <sup>3</sup> )	C/ fibra (12,0 kg/m <sup>3</sup> )	C/ fibra (18,1 kg/m <sup>3</sup> )
Trabalhabilidade (Slump) (mm)	105	120	115	105

Fonte: Autor.

Para cada etapa foram moldados 01 corpo- de- prova prismático com dimensões de 150 mm x 150 mm x 450 mm e 09 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm, de concreto reforçado com bambu. Após 1 hora de moldagem, os corpos de prova foram cobertos por um pano molhado e mantidos por 24 horas. Após esse período, os corpos de prova foram transferidos para um tanque de água, onde ficaram submersos até a data de realização de ensaio, Figura 3.16, de acordo com procedimento da Norma NBR 5738 (2015).



Figura 3.16- Cura dos corpos de prova cilíndrico e prismáticos. Fonte: Autor.

### 3.2.4 Preparação dos corpos de prova prismáticos no estado endurecido

Os corpos de prova prismáticos foram marcados e numerados para todos os traços. Essas marcações facilitaram o alinhamento e a colocação do corpo de prova sobre a base da máquina de ensaio e facilitaram também a aplicação do dispositivo “YOKE” no corpo de prova. Os suportes do dispositivo “YOKE” foram colocados sobre os cutelos da base da máquina de ensaio, para que não ocorresse rotação que influenciasse a medida de deslocamento, como se observa nas Figura 3.17 e Figura 3.18.



Figura 3.17- Corpos de prova prismáticos. Fonte: Autor.



Figura 3.18- Suportes do dispositivo “YOKE”. Fonte: Autor.

### 3.2.5 Dispositivo “YOKE”

Segundo VILLARES (2001), o tipo de equipamento utilizado para a medida de deflexão influencia a medida de deflexão de primeira fissura. O dispositivo “YOKE” de fixação é localizado na linha neutra da face lateral do corpo de prova e definido como um acessório aplicado no corpo de prova prismático no ensaio de tração na flexão ou no ensaio de tenacidade à flexão para fixar os acessórios de medição, tais como medida de deflexão (LVDT) e medida de abertura de fissura (Clip Gage).

A medição de deflexão a partir do dispositivo “YOKE” representa valores verdadeiros de primeira fissura nas vigas. A representação esquemática dos detalhes dos suportes do dispositivo “YOKE” está demonstrada Figura 3.19.

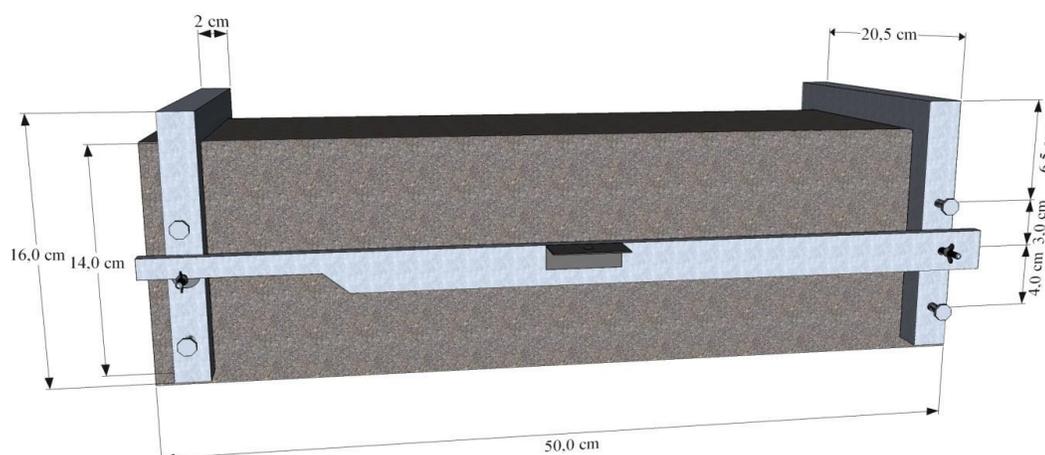


Figura 3.19- Representação esquemática dos detalhes dos suportes do dispositivo “YOKE”.  
Fonte: ARIF (2014).

### 3.3 MÉTODOS DE ENSAIO

Os métodos de ensaios foram empregados para caracterizar o concreto nos estados fresco e endurecido. No concreto fresco, utilizaram-se os métodos de ensaios de consistência do concreto por abatimento do tronco de cone e massa específica do concreto. Já os concretos endurecidos foram caracterizados pelos ensaios de módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), resistência à compressão ( $f_c$ ) e resistência à tração por compressão diametral ( $f_{st}$ ). Em ambos, o período foi de 28 dias. Os ensaios de tenacidade à flexão por meios dos procedimentos estabelecidos pelas normas JSCE-SF4, foram realizados na idade de 35 dias.

#### 3.3.1 Resistência à compressão ( $f_c$ ) e módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ )

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 concreto reforçado por fibras naturais vegetais, a cura do corpo de prova é geralmente feita por imersão em água. Após a retirada 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 que durante o ensaio de compressão axial é comum que o corpo de prova, embora já rompido, mantenha suas partes unidas pelas fibras, não perdendo 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 certa capacidade, mesmo que mínima, de carregamento, após a fissuração da matriz.

A escolha do concreto ou de um material construtivo qualquer para uma aplicação específica depende de sua capacidade de suportar a força aplicada (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A norma técnica brasileira que prescreve os procedimentos para o ensaio de compressão do concreto é a ABNT NBR 5739 (2007) (Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos). A tensão à compressão foi determinada dividindo-se a carga máxima obtida pela área da seção transversal do corpo de prova conforme a equação 09:

$$\text{Eq. 09} \quad f_c = \frac{4F}{\pi \cdot d_{cp}^2}$$

Onde:

$f_c$  = Resistência à compressão (MPa);

F = Força de compressão (N);

d<sub>cp</sub> = Diâmetro do corpo de prova (mm).

A determinação da resistência à compressão ( $f_c$ ) para cada um dos traços estudados compreendeu a realização de 3 ensaios para concreto sem fibra e 3 ensaios para concreto com bambu para idade de 28 dias. Para isso, foi utilizada a máquina eletromecânica máquina servo-eletromecânica EMIC com capacidade de 200 toneladas e controlada por computador. Utilizou-se um plano de carregamento feito de dois pratos de aço especificado pela norma para a determinação da resistência à compressão dos corpos de prova na idade de execução do programa experimental conforme Figura 3.20 abaixo.

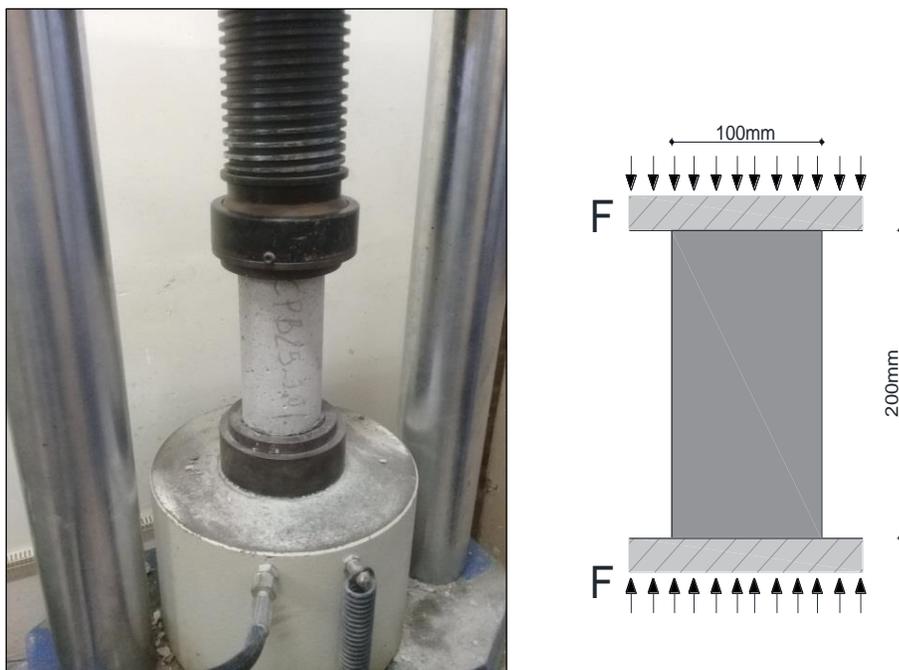


Figura 3.20- Ensaio de resistência à compressão axial ( $f_c$ ). Fonte: Autor.

Utilizou-se placas de neopreme para regularização das faces de aplicação de carga dos corpos de prova cilíndricos (superfície inferior e superior) para realizar os ensaios da resistência à compressão ( $f_c$ ) e do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), de acordo com o prescrito pela ABNT NBR 8522 (2017). Durante o ensaio da resistência à compressão ( $f_c$ ) e do módulo de elasticidade ( $E_{ci}$ ), a carga foi aplicada com velocidade de carregamento constante e sem choques até o corpo de prova atingir a sua ruptura.

De acordo com a ABNT NBR 8522 (2008), os corpos de prova devem ser cilíndricos, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura, respeitando a proporção  $l/d=2$ . Para corpos de prova moldados, o diâmetro  $d$  deve ser no mínimo, quatro vezes o tamanho máximo nominal do

agregado graúdo do concreto. Utilizou-se a máquina servo eletromecânica EMIC 200 Toneladas para realização de ensaio de módulo de elasticidade, Figura 3.21.

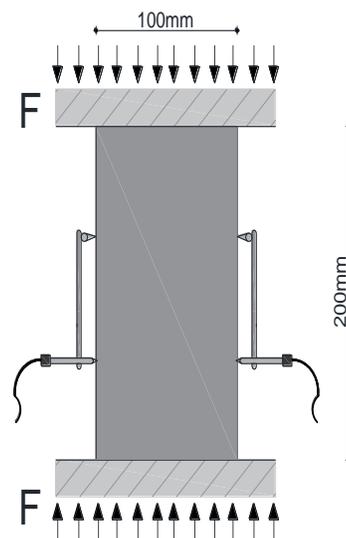


Figura 3.21- Ensaio para determinação do módulo de elasticidade tangente inicial ( $E_{ci}$ ) Fonte: Autor.

Em 3 dos 3 corpos de prova para realizar o ensaio do módulo de elasticidade foi determinada a resistência à compressão de acordo com ABNT NBR 5739 (2007), a fim de determinar o nível de carregamento a ser aplicado no ensaio de módulo. Esse ensaio prescrito pela norma deve obedecer aos valores de carregamento e descarregamento.

A determinação do módulo de elasticidade inicial ( $E_{ci}$ ) pode ser realizada por meio de coeficiente angular formado pelo intervalo de tensões em razão do intervalo de deformações específicas médias, como se observa na equação (10).

$$\text{Eq. (10)} \quad E_{ci} = \frac{\sigma_b - \sigma_a \cdot 10^{-3}}{\varepsilon_b - \varepsilon_a}$$

Onde:

$E_{ci}$  = módulo de elasticidade inicial (GPa);

$\sigma_b$  = Tensão maior (MPa);

$\sigma_b$  = Tensão básica (MPa);

$\epsilon_b$  = Deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão maior;

$\epsilon_a$  = A deformação específica média dos corpos de prova ensaiados sob a tensão básica.

### 3.3.2 Resistência à tração por compressão diametral

Para medida da resistência à tração dos compósitos, foi adotado o método proposto por Lobo Carneiro e normalizado pela ABNT sob o título ABNT NBR 7222 (2011), Resistência à tração de argamassa e concreto por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos. O carregamento foi aplicado ao longo da geratriz do corpo-de-prova cilíndrico, com 100 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento utilizando-se taliscas de madeira que foram interpostas entre o cilindro e os pratos da máquina. Assim, pode ser demonstrado que, sob essa carga, a seção vertical do cilindro fica sujeita a uma tensão de tração horizontal ao longo da sua geratriz, foi colocada duas bases metálica sobre a prensa e o prato da máquina de compressão. Os ensaios realizados foram feitos na Máquina Servo Eletromecânica EMIC com capacidade de 200 toneladas, conforme a Figura 3.22.

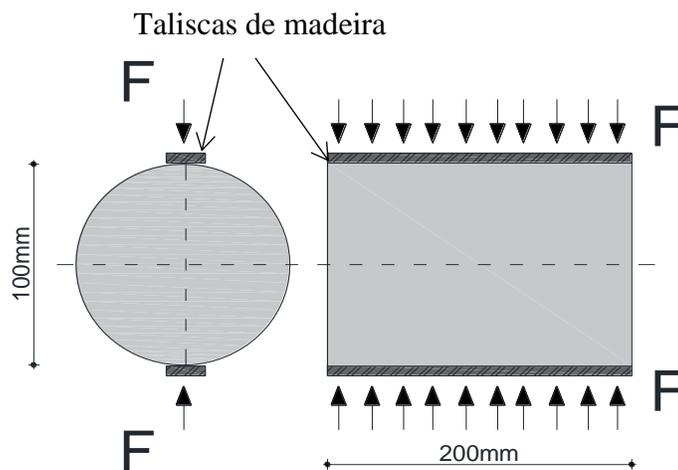


Figura 3.22- Representação esquemática do Ensaio de Tração por Compressão Diametral. Fonte:

Autor.



Figura 3.23- Ensaio de resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ct}$ ). Fonte: Autor.

A determinação da resistência à tração por compressão diametral para cada um dos traços estudados compreendeu a realização de 3 ensaios para concreto sem fibra e 3 ensaios para concreto com bambu na idade de 28 dias. A resistência à tração por compressão diametral deve ser calculada pela equação (11).

$$\text{Eq. (11)} \quad T = \frac{2F}{\pi \cdot d_{cp} \cdot l_{cp}}$$

Onde:

T = Resistência à tração (MPa);

F = Força de ruptura (N);

$l_{cp}$  = Comprimento do corpo de prova (mm);

$d_{cp}$  = Diâmetro do corpo de prova (mm).

### 3.3.3 Resistência à flexão

Ensaio de flexão em quatro pontos (cargas aplicadas nos terços médios) foram realizados em corpos-de-prova prismáticos de concreto sem fibra de bambu, CPB25-00% com fator

água/cimento 0,58, e em compósitos de concreto com adição de bambu (CPB25-0,5%, CPB25-1,0% e CPB25-1,5%).

Os ensaios foram realizados em uma máquina servo eletromecânica EMIC com capacidade de 200 toneladas. Não foi necessária a utilização de extensômetros elétricos, sendo obtidos os deslocamentos do travessão da máquina.

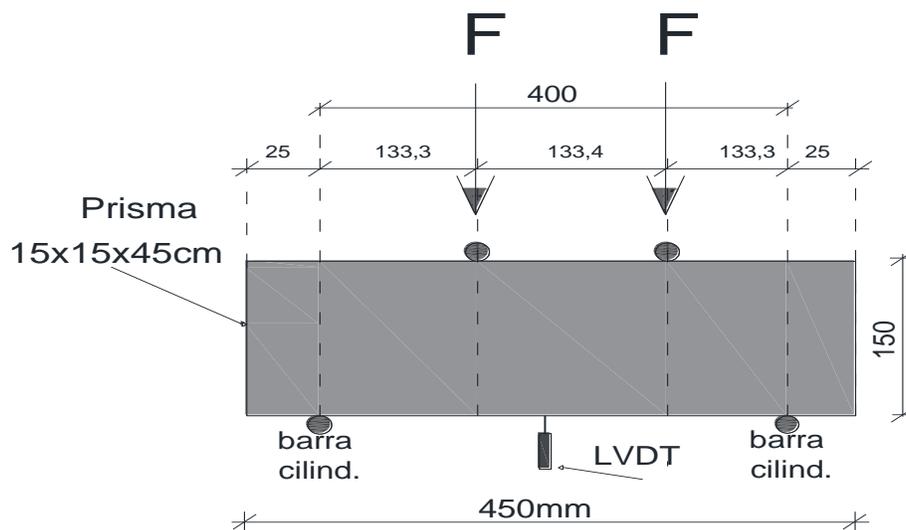


Figura 3.24- Representação esquemática do Ensaio de Tração na Flexão. Fonte: Autor.

Este ensaio à flexão de 4 pontos, segundo a recomendação da norma JSCE- SF4 (1984) também serviu para análise da tenacidade dos compósitos reforçados com fibra. Os ensaios realizados aos 35 dias à compressão. Para isso foram ensaiados 1 corpo de prova prismáticos sem fibras e 3 corpos de prova prismáticos com bagaço de bambu, ambos com dimensão de 150 mm x 150 mm x 450 mm para cada traço, Figura 3.25.



Figura 3.25- Ensaio de resistência à tração na Flexão segundo JSCE SF4. Fonte: Autor.

A Figura 3.26 -a mostra corpo de prova, s/ fibra. (b) Corpo de prova, com 0,5% de fibra de bambu. (c) corpo de prova, com 1,0% de fibra de bambu e (d) corpo de prova, com 1,5% de fibra de bambu. Para a coleta de dados de força e de deflexão foi utilizado o equipamento Spider e, para medição de deflexões, foi empregado transdutor de deslocamento à base de extensômetro elétrico, apoiado na lateral do corpo de prova. O transdutor foi colocado na região central da face lateral do corpo de prova, a fim de evitar o efeito de confinamento das extremidades. O transdutor utilizado tem base de medida de 100 mm e sensibilidade de 0,0001 mm. Para obter os dados de força, durante o ensaio, foi utilizada célula de carga de 20 kN e sensibilidade de 0,001 kN. A velocidade de carregamento do ensaio de tenacidade à flexão, segundo JSCE-SF4 (1984), está demonstrada na Tabela 3.11.

Tabela 3.11 - Velocidade de carregamento segundo JSCE-SF4.

Norma	Velocidade inicial até $L/150=3$ mm de deflexão
JSCE-SF4	0,15 mm/min

Fonte: Autor.

### 3.3.4 Microscopia eletrônica de varredura

Com intuito de se analisar a microestrutura dos corpos de prova rompidos, foi realizada a microscopia eletrônica de varredura (MEV), buscou-se observar os aspectos superficiais de fratura visando obter informações da interação entre matriz e reforço, proveniente da fibra de bambu. A preparação das amostras para observação por microscopia foi feita, cortando-se o material em tamanhos convenientes e recobrando suas superfícies de fratura por deposição de carbono. Antes de começar a análise das amostras, estas foram submetidas a vácuo para poderem ser metalizadas a ouro para que houvesse a propagação dos elétrons, conforme Figura 3.26. As condições de operação para o imageamento foram: corrente de feixe de elétrons de  $90 \mu\text{A}$ , voltagem de aceleração constante de 10 kv e distância de trabalho de 15 mm. Esses ensaios foram realizados no Laboratório de Metalografia da IFPa, Campus Belém-PA, em equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo VEGA 3 LMU da TESCAN, com magnificação de 2200 vezes.

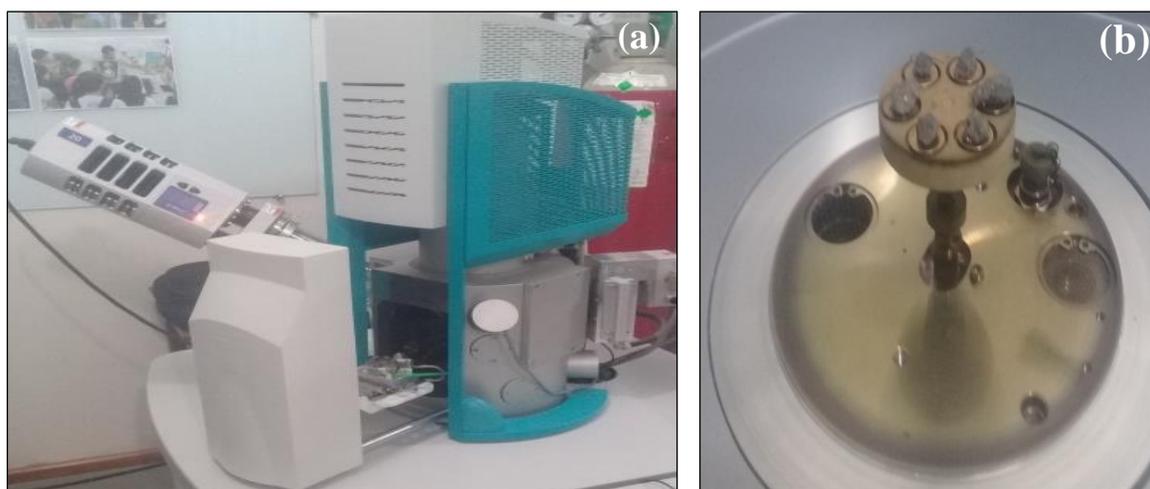


Figura 3.26- Equipamento para análise microestrutural. Fonte: Autor

## 4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo apresenta os principais resultados, bem como as discussões das informações obtidas durante os experimentos.

### 4.1 Propriedades das fibras

Neste item expõem-se os resultados experimentais alcançados pelos ensaios de caracterização físicos e mecânicos das fibras de Bambu.

#### 4.1.1 Características Geométricas das Fibras de bambu

Apresentam-se nessa parte do trabalho os resultados referentes à caracterização geométrica das fibras de bambu.

Pode ser observado, na Tabela 4.1, que as medidas das áreas da fibra de Bambu, realizadas através do microscópio, como também do paquímetro digital, resultaram em valores relativamente diferentes, com o paquímetro, obteve-se um valor médio cerca de 9% inferior àquele obtido com o microscópio. Dos inconvenientes já descritos a respeito do método que utiliza o paquímetro, pode-se concluir que o valor determinado pelo processo óptico (microscópio) tende a apresentar uma maior precisão, haja vista que, com o microscópio conseguimos delinear a real seção da fibra de Bambu para obtenção de sua área. Com relação ao coeficiente de variação ser relativamente alto para ambos os métodos utilizados, conclui-se pelo fato das amostras ensaiadas, assim como todo material do bambu colhido para o estudo, não apresentarem constância na forma geométrica de suas seções transversais, tendo em conta que se trata de uma fibra de origem natural, não passando por qualquer processo de beneficiamento e ou tratamento destinado a comercialização para tal finalidade específica (fibras para reforço de concreto).

Tabela 4.1 – Área da seção transversal e comprimento das fibras de Bambu.

Itens	Paquímetro	Microscópio	Comprimento (mm)
	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	Área da seção (mm <sup>2</sup> )	
Média	2,58	2,43	40,05
DP	0,97	0,74	13,76
CV(%)	95,00	54,46	628,62
Máx.	3,86	3,15	44,94
Mín.	0,80	0,74	40,99

Fonte: Autor.

De acordo com a norma EN 14889-2/2008 a fibra apresenta classificação como Classe II (Macro fibras > 0,30 mm de diâmetro) e conforme os limites de tolerância de desvio de valor individual e desvio de valor médio, seriam respectivamente para o comprimento, +/-10% e +/-5%; para o diâmetro equivalente, +/-50% e +/-5%. Porém, como se trata de uma fibra natural, não se tem valores nominais de diâmetro equivalente para realização de comparativos. No entanto, para o comprimento é possível à análise, uma vez que, foi adotado comprimento médio de 40,00 mm por conta do diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado no traço do experimento. Com isso, a fibra que foi cortada manualmente ficou dentro dos parâmetros de tolerância da Norma EN 14882/22008, com 100% das amostras do limite de tolerância para desvio de valor individual dentro do aceitável e com limite de tolerância para desvio médio de 0,97%, que também atende os requisitos normativos. Observa-se que há uma diferença entre a leitura obtida através do paquímetro digital e Microscópio eletrônico, entorno de 70%, proveniente da precisão do mapeamento do contorno da seção transversal, com já mencionado anteriormente.

#### 4.1.2 Caracterização Mecânica das fibras

Expõem-se nessa parte da pesquisa os resultados referentes à caracterização mecânica das fibras de Bambu, sendo apresentados os resultados dos ensaios de resistência à tração e módulo de elasticidade.

##### 4.1.2.1 Resistência à Tração

Na tabela 4.2 são apresentados os resultados para a média da resistência à tração das fibras de bambu, como também o desvio padrão e valores mínimos e máximos obtidos no ensaio. A resistência à tração média obtida para o bambu empregado na pesquisa foi de 432,20MPa, este resultado da pesquisa se encontra acima dos valores encontrados por outros autores, referente as fibras de Curuá, Jutá e Sisal, que obtiveram resultados entre 200MPa a 500MPa FIDELIS, 2014; GOLDINO (2019). Sendo que as propriedades mecânicas das fibras vegetais são dependentes de fatores como a origem do material, variação do índice pluviométrico, incidência de U.V, composição química, idade do vegetal e método de extração.

No entanto, uma possibilidade para essa variação apresentada se dá primeiramente por estarmos tratando de uma fibra natural, onde a resistência pode ser produto de supostas falhas na superfície do material.

Naturalmente, isto ocorre porque, como foi explanado nessa pesquisa, o paquímetro subestima o diâmetro da fibra e a área da seção transversal, o que implica numa superestimação da tensão calculada.

Tabela 4.2 –Ensaio de Tração das fibras de Bambu.

Variáveis de Análise	Tração (MPa)
Média	432,20
DP(%)	62,34
Nº amostras	20
Máx.	502,00
Mín.	300,00

Fonte: Autor.

Na tabela 4.3 pode-se verificar um comparativo entre a resistência à tração da fibra de bambu com outras amplamente estudadas. A fibra de bambu apresenta resistência média maior que a fibra de coco e muito menor que as demais, sendo viável para ser utilizadas com reforço de compósitos cimentícios.

Tabela 4.3 – Comparativo das resistências à Tração de fibras vegetais.

Espécie	Fonte	Tração (MPa)
Fibra de Curauá	Goldino (2019)	422,89
Fibra de Juta	Fidelis (2014)	249,00
Fibra de Coco	Fidelis (2014)	90,00
Fibra de Sisal	Fidelis (2014)	484,00
<b>Fibra de bambu</b>	<b>Autor (2019)</b>	<b>432,20</b>

Fonte: Autor.

#### 4.1.2.2 Módulo de Elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade foram utilizadas às curvas de tensão por deformação, explanadas anteriormente. Para esse fim, traçou-se uma reta tangente a região linear da curva.

CÁCERES (2016) utilizou como parâmetro tensões correspondentes a 5% e 30% da tensão máxima para traçar a linha tangente, e assim, obter do módulo de elasticidade neste intervalo. Para este estudo foi utilizado o intervalo de 5% e 25%, haja vista que 5% é o limite inferior que se evita a região de acomodação inicial do ensaio. Para o limite superior jugou-se apropriado 25% da tensão máxima, pelo fato de que, acima dessa porcentagem para algumas amostras a reta traçada ultrapassaria a fase linear da curva, portanto, estaria fora da região elástica do material.

A Tabela 4.4 apresenta o resultado do módulo de elasticidade do bambu calculado a partir da média das amostras ensaiadas. Apresentando também, desvio padrão, valor máximo e mínimo obtido.

Tabela 4.4 – Módulo de elasticidade da fibra de Bambu.

Variáveis de Análise	Módulo de Elasticidade (GPa)
Média	46,63
DP	16,14
Nº amostras	20
Máx.	56,80
Mín.	20,31

Fonte: Autor.

A divergência do resultado obtido para o módulo de elasticidade da fibra do bambu nesta pesquisa e com outros trabalhos especificados acima pode ser explicado devido o módulo de elasticidade ser sensível a variações no comprimento da fibra ensaiada, sendo que quanto maior for o comprimento da fibra maior será a probabilidade de existirem defeitos ou falhas que afetem a sua resistência SANTANA, 2016; SILVEIRA (2018).

A Figura 4.1 mostra o gráfico tensão-deformação obtido para as fibras de bambu e o valor médio obtido. A dispersão nos resultados foi grande, no entanto é uma característica usual das fibras vegetais por não haver uma uniformidade dimensional ao longo do seu comprimento, a variação na forma de sua seção transversal, como também no ângulo das microfibras CARDOSO (2014). Para as fibras vegetais, SPINACE et al. (2009), afirmam que seu comprimento tensão-deformação não pode ser descrito como um modelo linear de elasticidade devido sua complexidade.

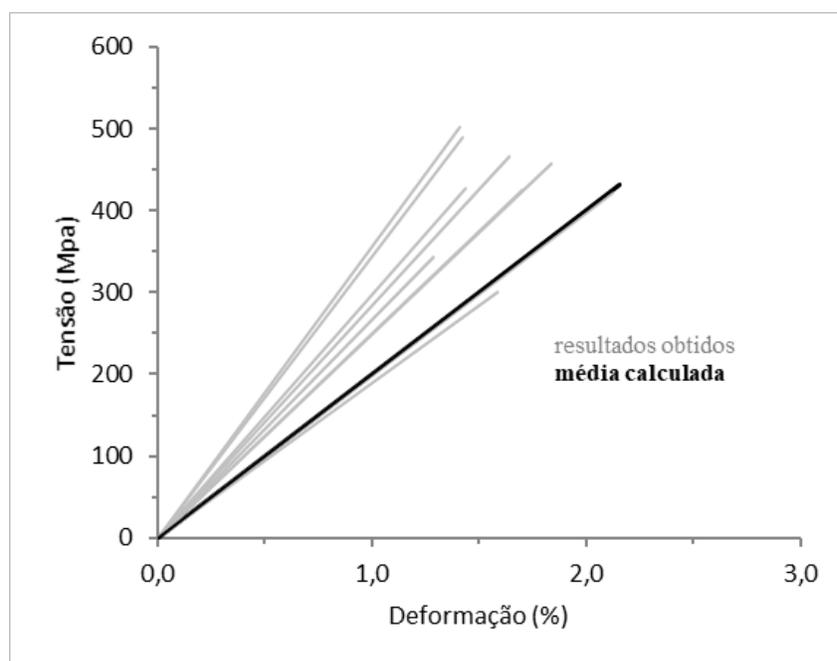


Figura 4.1- Comparativo de resultados obtidos para ensaio de tração da fibra de bambu. Fonte: Autor.

Quando comparada com outras fibras vegetais, Tabela 4.5, o bambu apresenta maior módulo de elasticidade do que as fibras de coco, sisal, juta e curauá, estas características juntamente com os valores obtidos para a resistência a tração fazem com que a fibra do bambu, seja mais rígida e resistente que as outras fibras lignocelulósicas descritas, segundo SILVEIRA (2018).

Tabela 4.5 – Comparativo do Módulo de Elasticidade de fibras vegetais.

Espécie	Fonte	Módulo de Elasticidade (GPa)
Fibra de Curauá	Goldino (2019)	28,83
Fibra de Juta	Fidelis (2014)	43,90
Fibra de Coco	Fidelis (2014)	2,60
Fibra de Sisal	Fidelis (2014)	19,50
<b>Fibra de bambu</b>	<b>Autor (2019)</b>	<b>46,63</b>

Fonte: Autor.

#### 4.1.3 Análise Morfológica

As fibras do bambu tiveram sua morfologia analisada em microscópio eletrônico de varredura (MEV). Pode-se observar na Figura 4.2 a superfície longitudinal apresenta um aspecto rugoso e irregular.

Ao verificar a seção transversal da fibra, Figura 4.2, nota-se que as fibras são compostas por três feixes de microfibrililas, os lúmens são pouco aparente o que indica uma menor área, além de paredes celulares mais espessas o que proporciona a esta fibra uma maior resistência a tração e módulo de elasticidade FIDELIS et al. (2013), segundo CUNHA (2012), as irregularidades presentes na seção transversal das fibras como também seu aspecto fibrilado influenciam positivamente na sua ancoragem em matrizes cimentícias.

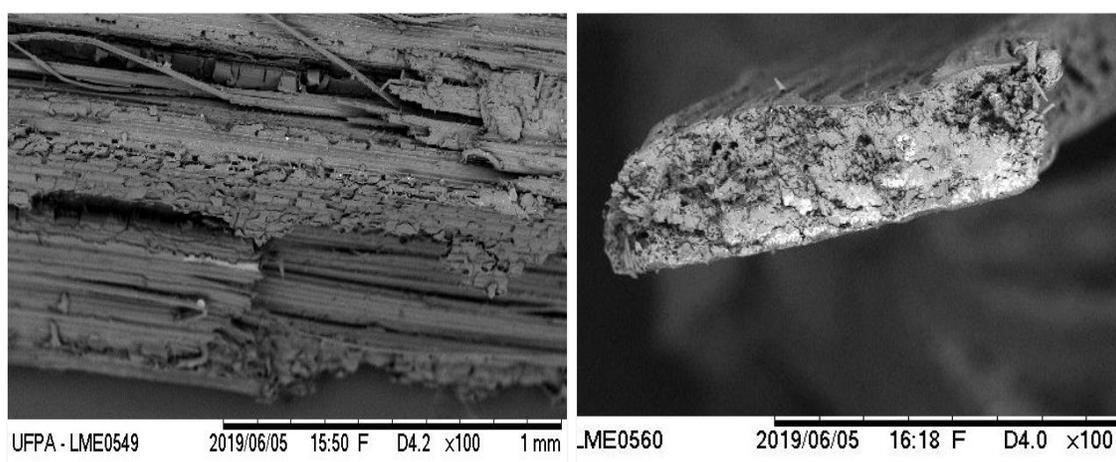


Figura 4.2- Micrografia da fibra de bambu. (a) Superfície longitudinal da fibra, (b) Seção transversal da fibra. Fonte: Autor

#### 4.2 Apresentação e análise dos resultados da resistência à compressão axial do concreto com adição de fibras de bambu.

São apresentados nesta seção os resultados experimentais dos corpos de prova cilíndricos para quatro traços de concreto com fibra de bambu e sem adição. Para cada traço foi calculada a média e o desvio padrão das amostras.

A média dos resultados aos 28 dias atende à média requerida para cada traço e o desvio padrão dos resultados está dentro do limite do controle da norma NBR ABNT 12655 (2015) adotado em função do controle rigoroso no preparo do concreto, de modo que o desvio padrão não deve passar de 4 MPa. Os valores dos resultados da resistência à compressão dos corpos

de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) para concreto com e sem bambu e o desvio padrão da resistência à compressão do concreto para traço 25 MPa estão apresentados na Tabela 4.6 e representados na Figura 4.3.

Tabela 4.6 - Variação de aumento da resistência à compressão axial após de adição do bambu.

AMOSTRAS	fc (MPa)		E (GPa)
	28 dias	Sd – CV(%)	
CPB25-00%	21,71	0,25 – 0,06	23,55
CPB25-0,5%	16,79	0,46 – 0,21	22,78
CPB25-1,0%	14,99	1,25– 1,57	23,04
CPB25-1,5%	14,72	0,68– 0,46	23,38

Fonte: Autor.

MHETA; MONTEIRO (1994) afirmam que a resistência à compressão não é a mais importante contribuição do reforço com fibras no concreto. Isso pode ser facilmente identificado, onde todas as misturas reforçadas com fibra de bambu, independentemente de teores e comprimentos, obtiveram valores de resistência à compressão inferior aos valores da mistura de referência.

HANNANT (1978), BENTUR; MINDESS (1990) e JOHNSTON (2001) destacam que a resistência à compressão da matriz é pouco influenciada pela incorporação de fibras em concreto com teor de 1%.

GARCEZ (2005), afirmou que a utilização de teores elevados e fibras longas aumentam levemente a resistência à compressão, pois a restrição à deformação transversal provocada pela presença das fibras impede que o concreto rompa prematuramente por perda de monoliticidade

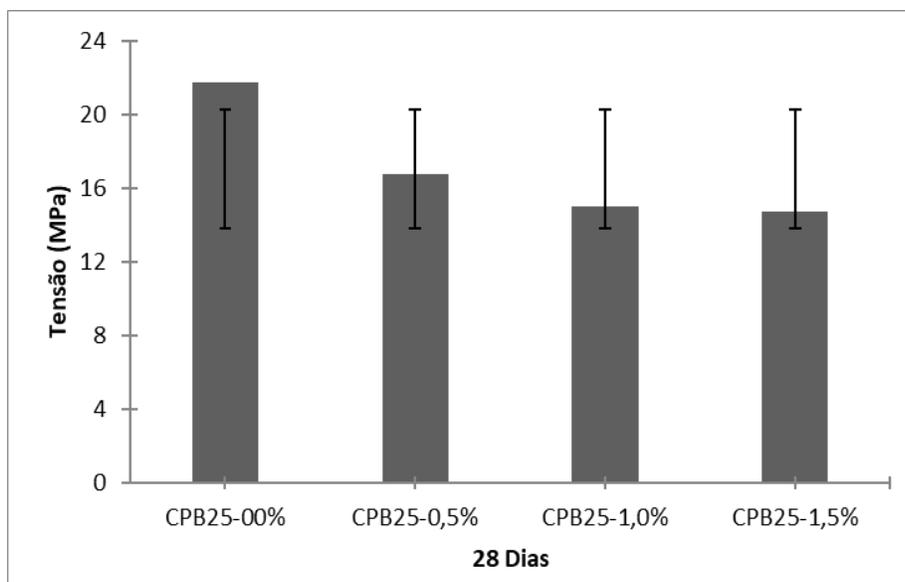


Figura 4.3- Comparação entre os valores obtidos no ensaio de Compressão axial. Fonte: Autor.

No que diz respeito ao ensaio de compressão axial, o melhor resultado foi obtido no concreto com 0,5% de fibra de bambu, no entanto apresentou um decréscimo de aproximadamente 21% em relação à mistura padrão.

#### 4.3 Apresentação e análise dos resultados da resistência à tração por compressão diametral.

A Tabela 4.7 apresenta os valores de resistência à tração por compressão diametral na idade de 28 dias e com adição de 0,5%, 1,0% e 1,5% do bambu (*Dencrocalamus Gigantus*), nas mesmas idades.

Tabela 4.7 - Variação de aumento da resistência à tração por compressão diametral após de adição da fibra de bambu.

AMOSTRA	fct (MPa) - CV(%) aos 28 dias
CPB25-00%	2,31 – 0,02
CP25-0,5%	2,45 – 0,04
CPB25-1,0%	2,61 – 0,15
CPB25-1,5%	2,78 – 0,03

\* fct – Resistência à tração por compressão diametral

A Figura 4.4, apresenta a resistência média de tração por compressão diametral, tanto em função do comprimento como dos teores, evidenciam o fato de que a adição das fibras do

bambu (*Dencrocalamus Gigantus*), como material de reforço qualificam o compósito quanto às suas características de resistência à tração, onde os resultados apontam que todas as misturas com fibra obtiveram valores superiores ao da mistura de referência.

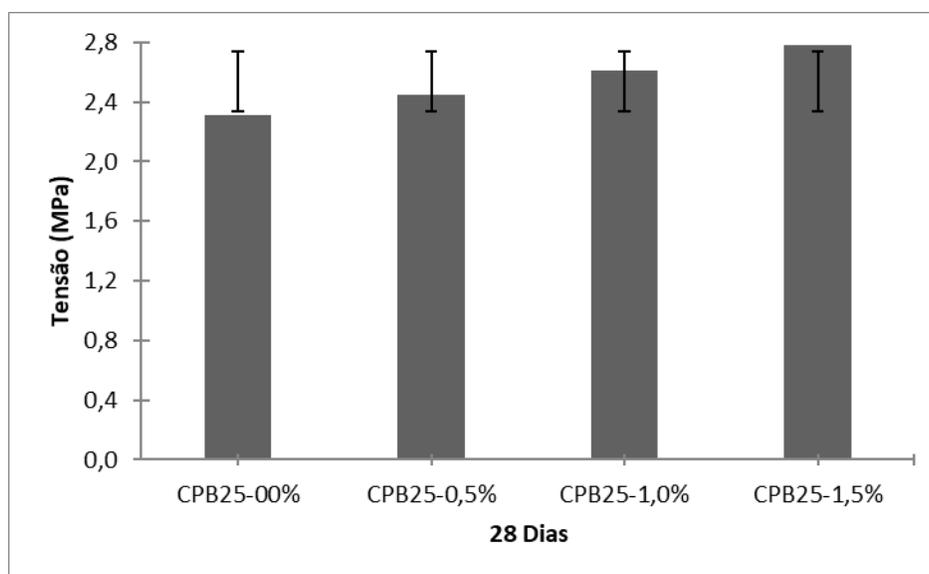


Figura 4.4- Comparação entre os valores médios obtidos no ensaio de Tração por Compressão Diametral.

No que diz respeito ao ensaio de tração por compressão diametral, o melhor resultado foi obtido no concreto com 1,5% de fibra de bambu, apresentando um acréscimo de aproximadamente 20% em relação à mistura padrão.

Analisando os resultados, conclui-se que os ensaios experimentais com fibra de bambu adicionado ao concreto, mantiveram-se na mesma faixa de resistência à tração por compressão diametral, o desempenho melhor do concreto fibroso para esta solicitação foi a que teve maior percentual de adição.

#### 4.4 Apresentação e análise dos resultados do módulo de elasticidade.

NEVILLE (1997) afirma que o módulo de elasticidade (E) aumenta com a resistência do concreto, porém não existe um acordo sobre essa exata dependência. Sabe-se, apenas, que o crescimento do módulo de elasticidade é progressivamente menor do que o crescimento da resistência à compressão do concreto.

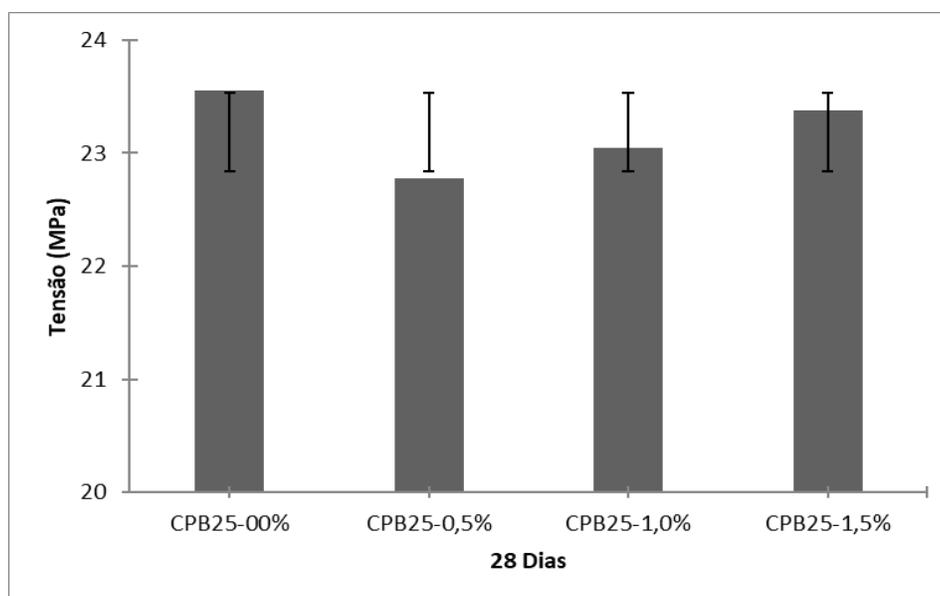


Figura 4.5- Comparação entre os valores médios obtidos no ensaio de Módulo de Elasticidade.

Fonte: (Autor).

No módulo de elasticidade as dosagens tiveram um ligeiro decréscimo para as frações 1,0% e 1,5% próximos ao padrão (referência), ao contrário da dosagem com fração volumétrica de 0,5%, que obteve um decréscimo um pouco mais acentuado entorno de 6%.

Os valores dos resultados do módulo de elasticidade dos corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200 mm) para concreto com e sem fibras são observados na Tabela 4.1. Os valores médios dos módulos de elasticidades e o seu ganho encontram-se na Figura 4.6.

Observou-se também que não ocorreu ganho de resistência no módulo de elasticidade para os concretos reforçados com fibra de bambu, no entanto o traço 25 MPa – 18,1 kg/m<sup>3</sup> (1,0%), foi o que mais se aproximou do resultado, ficando apenas de 1,25% abaixo em relação ao concreto de referência.

#### 4.5 Apresentação e análise dos resultados da Tração na flexão segundo NBR12142/2010

A Tabela 4.6 apresenta os resultados de resistência à flexão, gerada pelo ensaio de tração na flexão em quatro pontos conforme a norma brasileira NBR12142/2010 e a norma japonesa JSCE-SF4, com adição de bambu (*Dendrocalamus Giganteus*).

Tabela 4.8 - Resistência à tração por Flexão após de adição de bambu.

AMOSTRAS	$\sigma_f$ (MPa)
CPN 00- 00%	3,06
CPB 25- 0,5%	3,81
CPB 25- 1,0%	4,57
CPB 25- 1,5%	4,85

Fonte: Autor

METTA; MONTEIRO (1994) afirmam que a maior vantagem do concreto com fibra é a melhora da tenacidade à flexão (energia total absorvida ao ser rompido um corpo de prova à flexão). Estão relacionadas com a tenacidade à flexão as resistências ao impacto e à fadiga do concreto, as quais também são aumentadas consideravelmente. O desempenho dos compósitos fibrosos pode ser observado na Figura 4.6.

No ensaio de tração na flexão, o concreto com maior percentual de fibra de bambu, 1,5%, foi o que apresentou o melhor resultado, de 4,85 MPa, gerando um acréscimo de resistência entorno 58,5% em relação ao concreto sem adição. Para a dosagem com menor fração volumétrica, 0,5% obteve-se um acréscimo de entorno de 24,5%.

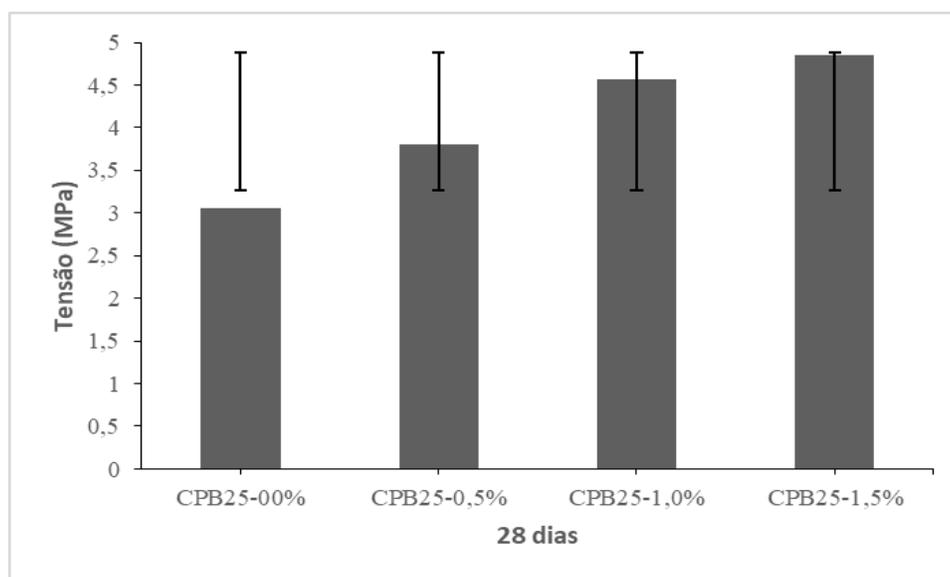


Figura 4.6- Resultado obtido no ensaio de resistência à flexão. Fonte: Autor.

4.6 Comparações dos resultados de resistência mecânica do concreto reforçado bambu com concreto reforçado com bagaço de cana de açúcar.

A pesquisa comparou os resultados obtidos nos ensaios de resistência mecânica dos concretos com bambu com os realizados por OLIVEIRA et al. (2014) para concreto reforçado com fibras de cana-de-açúcar, para que se pudesse parametrizar correlações. A Tabela 4.7 apresenta os dados referentes aos ensaios de resistências à compressão axial, tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade, onde se observa que os concretos com adição de fibras de bagaço de cana-de-açúcar obtiveram ganho de resistência em relação ao concreto sem adição. Os concretos com adição de fibras oriundas do bambu, este trabalho, também apresentaram ganho de resistência à tração por compressão diametral e na flexão, mostrando a eficiência do concreto com fibra em relação a pequenas frações.

Tabela 4.9 - Resistência à tração por Flexão após de adição de bambu.

AMOSTRA		fc (MPa)-CV(%) 28 dias	fct (MPa) -CV(%) 28 dias	E (GPa)-CV(%) 28 dias	$\sigma_f$ (MPa)
Bambu	CPN25-00%	21,35 – 0,06	2,31 – 0,02	13,55-0,01	3,06-0,015
( <i>Dendrocalmus</i>	CPB25-0,5%	16,79 – 0,21	2,39– 0,04	12,78-0,15	3,81-0,02
<i>Gigantus</i> )- Esta	CPB25-1,0%	14,99– 1,57	2,58– 0,15	13,04-0,02	4,57-0,01
pesquisa	CPB25-1,5%	14,72 – 0,46	2,78 – 0,03	13,38-0,02	4,87-0,02
Bagaço de cana de	Padrão	24,09	2,61	26,46	1,67
açúcar- (OLIVEIRA	2% CANA	28,00	2,74	26,11	4,54
et al. 2014)	5% CANA	25,34	2,86	25,40	5,80

Fonte: Autor.

#### 4.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

Com intuito de se analisar a microestrutura dos corpos de prova rompidos, realizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV), realizados em amostras de corpo de prova de concreto rompidos à tração por flexão simples, buscando observar os aspectos superficiais de fratura visando obter informações da interação entre matriz e reforço. A preparação das amostras para observação por microscopia foi feita cortando-se o material em tamanhos convenientes e recobrando suas superfícies de fratura por deposição de carbono. As propriedades dos materiais estão diretamente ligadas com microestrutura. Para essa análise, foram coletadas seis amostras distintas de um concreto após a ruptura do corpo-de-prova prismático que apresentaram falha por arrancamento e por ruptura da fibra. As amostras tinham idade de um pouco mais de um mês na data dessa análise.

As imagens obtidas via MEV apresentam a microestrutura do concreto, bem como a ligação com o bambu, Figura 4.7.

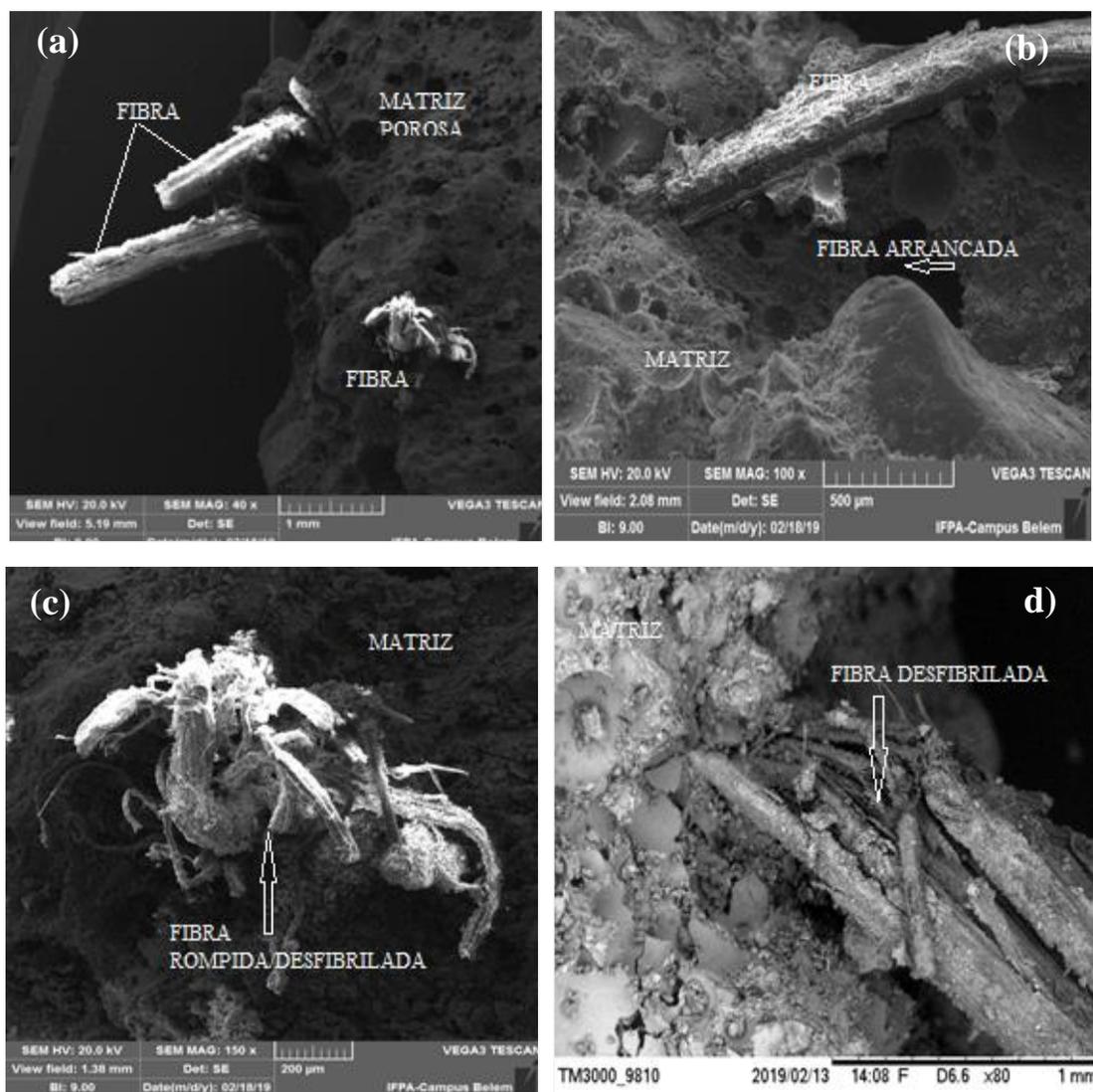


Figura 4.7– Amostras de corpos de prova rompidos dos ensaios à flexão. Fonte: (Autor).

Um fato interessante pode ser observado na figura 4.7 Essa região apresenta morfologia bastante distinta do bulk da matriz, sendo mais porosa e irregular, enquanto que a matriz é mais densa e uniforme. Isso corrobora com que as fibras são envolvidas por água quando o concreto está no estado fresco e tende a ocorrer um depósito de cristais de hidróxido de cálcio em sua superfície, sendo a zona de transição da interface a região limitante da tenacidade do compósito, BENTUR; MINDESS (2007).

Devido à sua resistência, o mecanismo principal pelo qual as fibras naturais conferem tenacidade ao concreto é devido o seu arrancamento da matriz. Tal fato pode ser observado a figura 4.7c, ampliada 150x, mostra a fibra de bambu inserida na matriz, onde se verifica na interface fibra-matriz, a fibra encontra-se desfibrilada. Além disso, nas figuras 4.8a, ampliada 40x, mostra a fibra de bambu inserida na matriz de concreto e figura 4.8 c, ampliada 100x, mostra também a zona de transição interface fibra-matriz, é possível observar que a ligação entre a fibra de bambu e a matriz, dado que a fibra foi descolada da matriz. Pode ser observado na figura 4.7d, ampliada 80x, mostra a fibra de bambu inserida na matriz de concreto. Observa-se que a matriz é densa, mas apresenta muitos vazios e na zona de transição é verificada fissuração até o ponto de presença da fibra, mostra também uma condição de fratura e desfibrilamento da fibra, sendo interessante pois provavelmente houve ganho de energia do compósito, percebe-se vazio deixado quando a fibra é arrancada, dois mecanismos estão presentes para que esta condição aconteça: a quebra da aderência na interface e a quebra da ligação entre as fibras. Essas características tendem a compensar o baixo módulo da fibra e seu alto coeficiente de Poisson.

## 5. CONCLUSÃO

### 5.1 Conclusões Gerais

Os resultados obtidos nos ensaios realizados, foram concentrados na aplicação de fibras de bambu (*Dendrocalamus Giganteus*) em matriz de cimentícia. A Pesquisa se deu de forma preliminar, verificando as resistências mecânicas em corpos de prova cilíndricos e prismáticos, para fins de fabricação de placas cimentícias, depois copilados e analisados, permitindo assim o alcance das conclusões a seguir apresentadas.

As fibras provenientes da somente da casca do bambu se mostraram com percentual de absorção de água muito baixo, ajudando a contribuir para o incremento de resistência na tração e flexão.

Em relação as propriedades mecânicas dos corpos de prova ensaiados, observou-se que as fibras de bambu, oriundas da casca, com percentual de 1,5%, proporcionaram aumento de 58,5% de resistência à tração na flexão, em relação ao concreto sem adição. Em relação à tração por compressão diametral, houve um ganho de resistência, de 20% em relação à mistura padrão. Comprovando a influência das fibras na capacidade de deformação dos compósitos.

No ensaio de compressão axial, foi observado que os concreto com adição de fibra não apresentaram acréscimo de resistência, onde o melhor resultado foi obtido no concreto com 0,5% de fibra de bambu, representando um decréscimo de aproximadamente 21% em relação à mistura padrão.

No ensaio de MEV, observou-se que as fibras do bambu (*Dendrocalamus Giganteus*) adicionados a matriz, mostraram eficiência na função de distribuir melhor as tensões, permitindo aberturas de fissura nos corpos- de- prova prismáticos.

Como conclusão, os ensaios mecânicos preliminares demonstraram que o propósito de utilização de fibras de bambu (*Dendrocalamus Giganteus*) para utilização em placas cimentícias foram satisfatórios, baseado na literatura existente, entretanto, serão necessários outros ensaios para placas, de modo que a eficiência possa ser comprovada por norma e comparando com uso de materiais convencionais.

### 5.2 Sugestões de Pesquisa

É importante que se dê continuidade nos estudos a cerca da fibra de bambu em compósitos cimentícios. Sendo assim, descreve-se a seguir algumas propostas de trabalhos para futuras pesquisa:

- ✓ Estudar a microestrutura da interação bambu-concreto com outros tipos de tratamentos que não interfira no processo de hidratação do cimento.
- ✓ Avaliar a durabilidade do concreto reforçado com fibra de bambu em comparação a outras fibras maderícias ao longo do tempo.
- ✓ Analisar outras variáveis de resposta como por exemplo: embutimento; relação água/cimento e  $f_{ck}$  do concreto.
- ✓ Comparação desses resultados com outros procedimentos para determinar a tenacidade, tais como Barcelona Test e ASTM C1399;
- ✓ Verificação da influência da dimensão máxima dos agregados na medida de tenacidade e na resistência residual;
- ✓ Determinação do volume crítico das fibras e avaliação da sua tenacidade com os resultados obtidos.
- ✓ Realizar ensaios de resistência e durabilidade para placas cimentícias e de concreto;
- ✓ Realizar ensaios de variação dimensional e permeabilidade nas placas com fibra de bambu para aplicação em pisos internos.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMANDEI, M.; DARWISH, I. F.; GHAVAMI, K. Experimental study on variation of mechanical properties of a cantilever beam of bamboo. *Construction and Building Materials*. Vol. 101 (2015) p. 784–790.

BRAGA FILHO, A. C.; LIMA JÚNIOR, H. C.; BARBOSA, N. P.; WILLRICH, F. L. Comportamento estrutural de vigas de concreto reforçadas com ripas de bambu cravejadas de pinos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.14, n.10, p.1115–1122, 2010.

BRITO, F.M.S.; PAES, J.B.; OLIVEIRA, J.T.S.; ARANTES, M.D.C.; FANTUZZI, H. No. Caracterização Anatômica e Física do Bambu Gigante (*Dendrocalamus giganteus* Munro). *Floresta e Ambiente*, Vol. 22(4) pag. 559-566. 2015. Disponível em <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.033913>.

CALLISTER, W. D. *Fundamentos da Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Abordagem Integrada*. / William D. Callister Jr.; Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. 4° ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

CANOVAS SK. New economical solutions for improvement of durability of portland cement mortars reinforced with sisal fibres. *Mater Struct* 1992; 25:417–22.

GHAVAMI, K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement e Concrete Composites*. Vol. 27 (2005) pag. 637–649.

GHAVAMI, K. Ultimate load behavior of bamboo-reinforced lightweight concrete beams. *Cement and Concrete Composites*, London, (1995) v.17, n.4, p.281-288, 1995.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.9, n.1, p.107-114, 2005.

GRAM HE. Durability of natural fibres in concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Research Fo. 1:83, Stockholm, 1983. p. 255.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*. São Paulo: Pini; Brasília: SENAI, 1992. 349p.

HIDALGO LOPEZ, O. *Bamboo, The gift of the gods*. Bogotá: Ed. D’Vinni, 2003. 553p.

CASAGRANDE JR. E. F.; UMEZAWA, H. A.; TAKEDA, J. Arranjo Produtivo Local Sustentável: Estudo de caso para o uso potencial do bambu na geração de emprego e renda no Paraná. XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Ouro Preto, MG, Brasil, 21 a 24 de outubro de 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 5738: Concreto – Moldagem e cura de corpos -de- prova cilíndricos ou prismáticos de concreto: Procedimento. Rio de Janeiro, 1992f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1992g.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT 1982 - NBR 7251- Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT 1987 - NBR 9776 – Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT 1987 - NBR 7217 – Agregados - Determinação da composição granulométrica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT 1991 – NBR 5736 – Cimento Portland pozolânico.

LEVY, J. S. Fundamental recorde in wood preservation (Lectures deliveed to the thirty-sixth session of the timber comunitte), 1979.

LIESE, W. The anatomy of bamboo culms. Technical Report, International Network for Bamboo and Rattan, Beijing, Eindhoven, New Delhi, 1998.

LIMA JR., H. C.; DALCANAL, P. R.; WILLRICH, F. L.; BARBOSA, N. P. Características mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus*: análise teórica e experimental. In: BARBOSA,

N. P.; SWAMY, R. N.; LYNSDALE, C. (ed.). Sustainable construction into the next millennium: environmentally friendly and innovative cement based materials. João Pessoa: Federal University of Paraiba and The University of Sheffield, 2000. p.394-406

LIMA JÚNIOR, H. C.; MESQUITA, L. P.; FABRO, G.; WILLRICH, F. L.; CZARNIESKI, C. J. Vigas de concreto reforçadas com bambu *Dendrocalamus giganteus*. I: Análise experimental. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.9, n.4, p.642-651, 2005.

LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; FABRO, G. Vigas de concreto reforçadas com bambu *Dendrocalamus giganteus*. II: Modelagem e critérios de dimensionamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.9, n.4, p.652-659, 2005.

LIMA JÚNIOR, H. C.; WILLRICH, F. L.; GILMAR FABRO, G., ROSA, M. A.; TANABE, L.; SABINO, R. B. G. Análise mecânica de pilares mistos bambu-concreto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v.14, n.5, p.545–553, 2010.

LUIS, Z. G.; NOGUEIRA, J. S.; RIBEIRO, D. G.; SCHERWINSKI-PEREIRA, J. E. Caracterização anatômica dos órgãos vegetativos de bambu (Poaceae, Bambusoideae). In: Patrícia Maria Drumond; Guilherme Wiedman. (Org.). *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. 1ed. Rio de Janeiro: ICH - Instituto Ciência Hoje, 2017, v. 1, p. 42-59.

MACGREGOR, J. G. *Reinforced concrete, mechanics and design*. New York: Prentice Hall, 1997, 939p.

MARÇAL, V. H. S. *Uso do bambu na construção civil. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso)*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, UNB, Brasília, 2008.

MARINHO, N. P.; NISGOSKI, S.; KLOCK, U.; DE ANDRADE, A. S.; BOLZON DE MUÑIZ, G. I. Análise química do bambu-gigante (*Dendrocalamus giganteus* wall. Ex munro) em diferentes idades. *Ciência Florestal*, vol. 22, núm. 2, abril-junho, 2012, pp. 417-422.

MCCLURE, F.A. *The Bamboos: A Fresh Perspective*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1966.

MEHTA, P. K. e MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2º ed. (português). São Paulo: IBRACON, 2014.

MENDES, A. S.; ALVES, M. V. S. *A degradação da madeira e sua preservação*. Brasília. Instituto Brasileiro Desenvolvimento Florestal. Departamento de pesquisa- Laboratório de Produtos Florestais, 1988.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete: ASTM C 876, 6p. In: *Annual book of ASTM standards*. Philadelphia, 2005c.

C. S. POON, L. LAM, S. C. KOU, Z. S. LIN. A study on the hydration rate of natural zeólita blended cement pastes, 1999.

HELENE, P.R.L.; TERZIAN, P. 1992. *Manual de Dosagem e Controle do Concreto*, São Paulo, SP – Ed. Pini.

MEHTA, K.; MONTEIRO, J.P. 1994. *Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais*, São Paulo, SP – Ed. Pini.

NAN SU, ZONG-HUEI CHEN, HUNG-YUAN FANG. 2000. Reuse of spent catalyst as fine aggregate in cement mortar. *Cement & Concrete Composites*, 23 (2001) 111-118.

MARINHO, N. P.; Nisgoski, S.; Muñiz, G. B. 2014. Avaliação das Dimensões das Fibras dos Colmos do Bambú, *Dendrocalamus giganteus* (Wall) Munro, em diferentes idades. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 251-256, jan. -mar., 2014.

CEB-FIP. Model Code 2010: Final Draft. Model Code Prepared by Special Activity Group 5. Lausanne, 2011.

CIDADE, M. K.; PALOMBINI, F. L.; KINDLEIN JÚNIOR, W. Biônica como processo criativo: microestrutura do bambu como metáfora gráfica no design de joias contemporâneas. *Educação Gráfica* (Online), v. 19, p. 91-103, 2015.

PÖLLMANN, H. Composition of cement phases. In: BENSTED, J.; BARNES, P. (ed.). *Structure and Performance of Cements*, 2nd ed. London and New York: Spon Press, 2002. p. 25-56.

TAYLOR, H.F.W. 1990. *Cement Chemistry*. Academic Press Ltd., London, 475 p.

WALTER, A. – 1985 – Influence of the kiln system on the clinker properties. *Zementkalkgips*, vol. 38, n° 10, p. 612-4.

FERREIRA, G. C. S. Vigas de concreto armadas com taliscas de bambu *Dendrocalamus giganteus*. Tese (Doutorado em Engenharia). Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, 2007.

FILGUEIRAS, T. S.; VIANA, P. L. Bambus brasileiros: morfologia, taxonomia, distribuição e conservação. In: Patrícia Maria Drumond; Guilherme Wiedman. (Org.). *Bambus no Brasil: da biologia à tecnologia*. 1ed. Rio de Janeiro: ICH - Instituto Ciência Hoje, 2017, v. 1, p. 10-27.

GAION, C. P.; PASCHOARELLI, L. C.; PEREIRA, M. A. R. O Bambu como Matéria prima para o Desenho Industrial: um estudo de caso. In: 3° Congresso Internacional de pesquisa em design. Rio de Janeiro. 2005.

GHAVAMI, K. A volta do velho e forte bambu. *Revista Globo Ciência*. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1992 - NBR 5736, Rio de Janeiro. – Cimento Portland pozolânico.

\_\_\_\_\_. ABNT 2003 - NBR 5738. Rio de Janeiro. – Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto.

\_\_\_\_\_. ABNT 2007 - NBR 5739. Rio de Janeiro. - Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos-de-Prova Cilíndricos: Método de Ensaio:

\_\_\_\_\_. ABNT 2005 - NBR 7211, Rio de Janeiro. – Agregados para concretos.

\_\_\_\_\_. ABNT 1987 - NBR 7217, Rio de Janeiro. - Agregados – Determinação da composição granulométrica.

\_\_\_\_\_. ABNT 2011 - NBR 7222, Rio de Janeiro. – Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos-de-prova cilíndricos.

\_\_\_\_\_. ABNT 1982 - NBR 7251, Rio de Janeiro. - Agregado em estado solto - Determinação da massa unitária.

\_\_\_\_\_. ABNT 2003 - NBR 8522, Rio de Janeiro. - Concreto – Determinação do Módulo de Deformação. Estática e Diagrama – Tensão – Deformação: Método de Ensaio.

\_\_\_\_\_. ABNT 1987 - NBR 9776, Rio de Janeiro. - Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.

\_\_\_\_\_. ABNT 2010 - NBR 12142, Rio de Janeiro. -Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão em corpos-de-prova prismáticos.

\_\_\_\_\_. ABNT 2006 - NBR 12655, Rio de Janeiro. - Concreto de cimento Portland – Preparo controle e recebimento – Procedimento.

INTERNATIONAL STANDARD – Dentistry – Polymer-based filling, restorative and luting materials.ISO 4049.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. São Paulo: Pini, 2ª ed.,1997.

TAILOR, G.D. Materials in Construction. In London: Longman Scientific e Technical, 2ª Ed. 284 p.1994.

METTA, K. M., MONTEIRO, P. J. M. Concreto, estrutura, propriedade dos materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573p.

MESQUITA, L. P.; CZARNIESKI, C. J.; BRAGA FILHO, A. C.; WILLRICH, F. L.; LIMA JÚNIOR, H. C.; BARBOSA, N. P. Determinação da tensão de aderência do bambu-concreto. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.2, p.505–516, 2006.

MORAES, J. C. B.; MELGES, J. L. P. Estudo da aderência entre o concreto e a espécie de bambu *Bambusa vulgaris* impermeabilizada com látex extraído de seringueira. 2013. 46 f. Relatório (Iniciação Científica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

NATIONAL MISSION ON BAMBOO APLICATIONS - NMBA, Technology, Information, Forecasting and Assessment Council (TIFAC). Government of India, 2004.

NOGUEIRA, F. M. “Bambucon - bambu reforçado com microconcreto armado”. Monografia (Especialização em Construção Civil). Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2009

PALOMBINI, F. L. Design de estrutura biônica por meio de prototipagem e análise por elementos finitos baseada em microtomografia do bambu. 2016. 106 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PEREIRA, M. A. R. Viabilidade da utilização do bambu para fins de irrigação: Aspectos técnicos. Dissertação Mestrado. Botucatu: UNESP, 1992. 104p.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO A. L. Bambu de corpo e alma. 2° ed. Bauru, São Paulo, Editora Canal 6, 2008.

PEREIRA, M. A. R.; BERALDO A. L. Bambu de corpo e alma. Bauru, Editora Canal 6, 2007.

PINHEIRO, L. M.; MUZARDO, C. D. Aderência e ancoragem – Capítulo 10. Departamento de Engenharia de Estruturas – EESC – USP. São Paulo, 2003.

RAJ, V. Treatise on Utilization of Bamboo as Reinforcement in Ferrocement. In: Journal of Ferrocement: Vol 21, N° 4, October 1991, pp. 371 –381.

ROSA, M.A.; CUNHA, B.S.; LIMA JÚNIOR, H.C.; WILLRICH, F.L; BARBOSA, N.P. bamboo as concrete reinforcement: durability study. Anais das XXXII Jornadas Sul americanas de Engenharia Estrutural Maio / 2006 ISBN 85-99956-01-9 Materiais Estruturais Trabalho JOR0022 - p. 1005-1013.

SALCEDO, L. O. G. Uso del bambu em el concreto reforzado. Palmira: Impresora Feriva S.A. ISBN: 958-8095-13-1. 2001, p. 43.

SALGADO, A.L. de B. Resistência a la extracción de astillas de bambu enclavadas en concreto. In: Sustainable construction into the next millenium environmentally, friendly and innovative cement based materials. João Pessoa. Federal University of Paraiba and The University of Sheffield. 2000. p.407-412.

SAVASTANO, H. J. Materiais a base de cimento reforçados com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo. Tese (Concurso em livre-docencia) – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2000.

SCHEFFER, T. C. 1973. Microbiological Degredation and causal organisms. In NICHOLAS, D. D., ed. Wood deterioration ad its prevention by preservative treatments. Syracuse, Syracuse University Press, v.1.

SOARES, S. F. B. S. Estruturas em bambu. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil 2012/2013). Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil do Porto, Porto, Portugal, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. 5° ed. Artmed, 2013.

TAN, T.; RAHBAR, N.; ALLAMEH, S. M.; KWOFIE, S.; DISSMORE, D.; GHAVAMI, K.; SOBOYEJO, W. O. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. Acta Biomaterialia. Vol. 7. n.º 10 (2011). p. 3796-3803.

TERAI, M.; MINAMI, K. Fracture Behavior and Mechanical Properties of Bamboo Reinforced Concrete Members. Procedia Engineering. Vol. 10 (2011) pag. 2967–2972.

TOLÊDO FILHO, R. D.; GHAVAMI, K.; ENGLAND, G. L.; SCRIVENER, K. Development of vegetable fibre–mortar composites of improved durability. *Cement e Concrete Composites*, v. 25, p.185- 196, 2003.

BENINI, K. C. C. C., Desenvolvimento e caracterização de compósitos poliméricos reforçados com fibras lignocelulósicas: hips/fibra da casca de côco verde e bagaço de cana de açúcar, Guaratinguetá, 2011,125 p. Dissertação (Dissertação em Engenharia Mecânica)-Universidade Estadual Paulista, UNESP, São Paulo, 2011.

CHUNG, D.D.L., *Composite Materials: Science and Applications*, 2nd Edition, Springer-Verlag, London, 2010. 358 p.

JWEEG, M.J. et al, Experimental and Theoretical Studies of Mechanical Properties for Reinforcement Fiber Types of Composite Materials. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, IJMME-IJENS* v.12 n.04, Aug 2012.

LIESE, W., MICHAEL KOHL, M., *Bamboo - The Plant and its Uses*, Springer International, Switzerland, 2015. 362 p.

MARINHO, N. P., et al. Análise Química do Bambu-Gigante, *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 413-418, abr. 2012.

OUTA, R. Estudo e Análise do Coeficiente de Absorção Acústico do Compósito da Fibra da Cana, Ilha Solteira, 2014, 72 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, UNESP, São Paulo, 2014

PIRES, A.J.V. et al. Bagaço de cana-de-açúcar tratado com hidróxido de sódio, *Revista Brasileira Zootecnia*, v.35, n.3, p.953-957, 2006.

OUTA. R. CHAVARETTE. F. R, LOUZADA. M. J.Q. Resistência Mecânica da Fibra Vegetal Mercerizada da Cana de Açúcar e Bambu, *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* v. 10(3): 288-304, 2016.

FUJIAMA, R.T. et al. Metodologia para Caracterização das Fibras de Bambu e Compósitos de Bambu, XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, COBENGE, 2011.

PACHECO-TORGAL. F, JALALI. S., *Cementitious Building Materials Reinforced with Vegetable Fibres: a Review*. *Construction and Building Materials* 25 (2011) 575–581.

ONUAGULUCHI. O, BANTHIA.N. Plant-based natural fibre reinforced cement composites: A review, *Cement and Concrete Composites* 68 (2016) 96e108.

IKPONMWOSA. E. et al. Structural Behaviour of Bamboo-Reinforced Foamed Concrete Slab Containing Polyvinyl Wastes (PW) as Partial Replacement Of Fine Aggregate, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences* (2017) 29, 348–355.

BRITO. F. M. S. et al, Caracterização Anatômica e Física do Bambu Gigante (*Dendrocalamus Giganteus* Munro), *Revista Floresta e Ambiente* 2015; 22(4): 559-566.

MARINHO, N. P., et al, Avaliação das Dimensões das Fibras de Colmos de Bambu, *Dendrocalamus Giganteus* (Wall) Munro, em Diferentes Idades, *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 251-256, jan. -mar., 2014

MONTE, R., TOALDO, G. S., FIGUEIREDO, A. D., Avaliação da Tenacidade de Concretos Reforçados com Fibras Através de Ensaio com Sistema Aberto, *Revista Matéria* V.19, n.02, p.132-149, 2014.

ARIF, M. A. Avaliação da Medida de Tenacidade do Concreto Reforçado com Fibras de Aço. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

SARAZ, J. A. O., ARISTIZABAL, F. V., MEJÍA, J. A. H. Comportamiento Mecánico del Concreto Reforzado Con Fibras de Bagazo de Caña de Azúcar. *Revista Dyna*, 2007, vol. 74, nº. 153. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia p. 69-79.

OLIVEIRA, C.A.S., GOUVEIA, L.L.A., TEIXEIRA, R.L.P. Concreto Estrutural com Adição de Fibras Vegetais. *Revista Construindo*, Belo Horizonte, Minas Geras, v. 6, nº. 2, jul./dez. 2014.

BOUASKER, Marwen et al. Physical Characterization of Natural Straw Fibers as Aggregates for Construction Materials Applications. *Materials*, v. 7, n. 4, p. 3034- 3048, 2014.

CHAUHAN, A., and PRIYANKA C. "Natural Fibers Reinforced Advanced Materials." *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*, 2013.

DA COSTA CORREIA, Viviane et al. Potential of bamboo organosolv pulp as a reinforcing element in fiber–cement materials. *Construction and Building Materials*, v. 72, p. 65-71, 2014.

DE LIMA, Bárbara Silveira 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*, v. 1, n. 9, 2013.

GUARNIERI, Gustavo et al. PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA DE CONCRETO COM ADIÇÃO DE FIBRAS. *Cadernos de Prospecção*, v. 7, n. 3, p. 368, 2014.

KISHIMOTO, Tizuko M.; OLIVEIRA-FORMOSINHO, Júlia. *Tecnologia do Concreto*. Bookman Editora, 2013.

SALVADOR, Renan Pícolo; FIGUEIREDO, Antônio Domingues de. Comparative evaluation of the mechanical behavior of synthetic and steel fiber-reinforced concrete. *Matéria* (Rio de Janeiro), v. 18, n. 2, p. 1273-1285, 2013.

WILLIAMS PORTAL, Natalie et al. Sustainable Potential of Textile-Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014

MARÇAL, V.H.S., Monografia em engenharia civil e ambiental, Universidade de Brasília Faculdade de Tecnologia Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 60 pg 2008.

BERALDO, A. L.; AZZINI, A.; GHAVAMI, K.; PEREIRA, A. R. (2003), Bambu: características e aplicações. In: FREIRE, W. J.; BERALDO, A. L., pp. 253-319, Editor, Tecnologias e materiais alternativos de construção. Campinas, Unicamp.

GHAVAMI, K.; RODRIGUES, C. S.; PACIORNIK, S.(2003). Bamboo: Functionally Granded Composite Material. Asian Engineering (building and housing), Irã, v. 4, n. 1, p. 110, 2003.

CHIPANSKI, E.R. Proposição para melhoria do desempenho ambiental da indústria de aglomerado no Brasil. 2006. 193p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

BITTENCOURT, E. Processamento e caracterização de compósitos lignocelulósicos a partir de resíduos de madeira particulado e fibras vegetais. 2002. 216 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

PEREIRA, M.A.R.; Beraldo, A.L. Bambu de corpo e alma. 1.ed. Bauru: Canal 6 Editora, 2008. 240p.

BERALDO, A. L. et al. Tecnologias e materiais alternativos de construção. Bambu: Características e Aplicações. Campinas: Ed. Unicamp, 2003.

DACOSTA, L. P. E. et al. Qualidade das chapas de partículas aglomeradas fabricadas com resíduo do processamento mecânico da madeira. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 15, n. 3, p. 311-322, 2005.

ROCHA, B. B. Aproveitamento de Resíduos de Madeira e Bagaço de Cana-de-açúcar na Produção e Avaliação de Painéis Aglomerados. Dissertação de Mestrado- UNESP, 2016.

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

SILVA, J. F. Propriedades Físicas e Mecânicas de Argamassa Reforçada com Fibras do Bagaço de Cana-de-açúcar (FBC). Dissertação de Mestrado–Universidade Federal de Goiás, 2010.