



Francisco de Souza Salgado Neto

**Análise Mecânica e Microestrutural da
Interação do Bambu com o Concreto**

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

2018

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



Francisco de Souza Salgado Neto

**Análise Mecânica e Microestrutural da Interação
do Bambu com o Concreto**

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,
Abril de 2018

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Francisco de Souza Salgado Neto.

TÍTULO: Análise Mecânica e Microestrutural da Interação do Bambu com o Concreto.

GRAU: Mestre ANO: 2018

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.

Francisco de Souza Salgado Neto.

Conjunto Cidade Nova 6 WE 70, nº 421. Coqueiro.

67140 – 120. Ananindeua – PA – Brasil.

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

Salgado Neto, Francisco de Souza, 1991

Análise Mecânica e Microestrutural da Interação do Bambu com o Concreto. / Francisco de Souza Salgado Neto. – 2018.

Orientador: Marcelo de Souza Picanço.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2018.

1. Concreto - Fibras naturais 2. Bambu - Propriedades mecânicas 3. Concreto - Testes I.
Título.

CDD 23.ed.624.1834



ANÁLISE MECÂNICA E MICROESTRUTURAL DA INTERAÇÃO DO BAMBU COM O CONCRETO

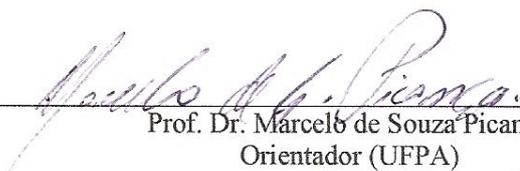
AUTOR:

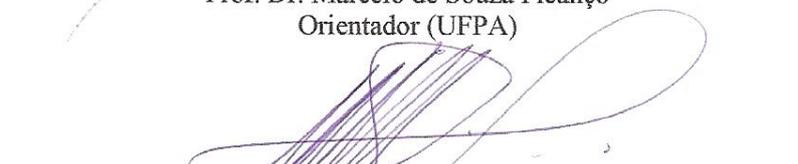
FRANCISCO DE SOUZA SALGADO NETO

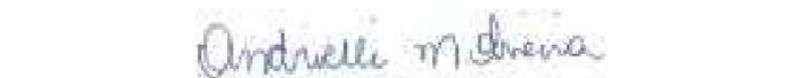
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 03 / 04 / 2018

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo
Membro Interno (UFPA)


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

Visto:


Prof. Dr. DÊNIO RAMAM CARVALHO DE OLIVEIRA
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*Dedico este trabalho a todos os familiares e amigos
que me apoiaram em toda minha vida acadêmica.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus que guiou meus passos em todos os momentos e em mais uma batalha da minha vida, pois chegar neste momento necessitou de muito sacrifício e dedicação.

Agradeço a todo o Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPA (PPGEC), em especial o Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço que me acolheu e me orientou de forma que eu pudesse amadurecer como profissional, bem como todos os professores que acrescentaram conhecimento imprescindíveis para esta pesquisa.

Agradeço aos meus pais que incansavelmente me deram suporte e foram minha verdadeira fundação que possibilitaram a edificação de mais um sonho em minha vida.

A CAPES pelo financiamento da pesquisa, na forma de bolsa de mestrado.

A EMBRAPA pela solicitude e fornecimento do bambu utilizado nesta pesquisa.

Devo agradecer, também, a todos os amigos do mestrado e do Laboratório de Engenharia Civil que me acompanharam e colaboraram de forma direta ou indireta, em especial, ao André, Anderson, Caroline, Danielle, Denisson, Joel, João, Mayron, Maurilio, Patrícia, Rafaela, Rodrigo, Renata Godinho, Saulo, Youssef, minha querida orientadora de TCC Luciana Cordeiro, dentre outros.

A minha namorada, Marcelly Mendonça, que teve um papel importantíssimo para o desenvolvimento desta pesquisa, não medindo esforços para ajudar nas minhas dificuldades e nos momentos de desânimo.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para que eu chegasse até aqui. O meu muito obrigado!!!

“A persistência é o caminho do êxito.”
(Charles Chaplin)

RESUMO

SALGADO NETO, F. S. **Análise Mecânica e Microestrutural da Interação do Bambu com o Concreto**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2018.

Diversos materiais têm sido empregados na construção civil, sendo o aço e o concreto os mais utilizados. No entanto, tais materiais apresentam elevados custos de produção e geram grandes impactos ao meio ambiente. A proposta desta pesquisa é analisar a interação entre o concreto e o bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*, bem como verificar o potencial do arame recozido como mecanismo de reforço de aderência entre os materiais supracitados, justificada pela busca de materiais alternativos e renováveis concomitantemente com defesa da sustentabilidade. O cronograma experimental divide-se em 3 etapas: caracterização morfológica, física e mecânica do bambu; dosagem do concreto; e estudo da interação bambu concreto, analisando o emprego de dois tipos de envolvimento de arame recozido na superfície do bambu como mecanismo de reforço de aderência: espiral simples e espiral dupla, a partir da determinação da resistência de aderência aos 28 dias para cada caso, do comportamento carga x deslocamento e da análise microestrutural da interação bambu concreto. Os fatores fixos foram: resistência à compressão do concreto (28 MPa), embutimento de 200 mm, taliscas de bambu com seção retangular de 20 mm x 10 mm. Todos os resultados obtidos foram analisados mediante testes estatísticos e constatou-se que a presença do nó e o emprego de arame recozido aumentam a resistência de aderência em 42% e no mínimo 25%, respectivamente.

Palavras-chave: Aderência; Bambu; Microestrutura; *Dendrocalamus giganteus*.

ABSTRACT

SALGADO NETO, F. S. **Mechanical and Microstructural analysis of concrete bamboo interaction**. MSc Thesis, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2018.

Several materials have been used in construction, steel and concrete being the most used. However, such materials present high production costs and generate great impacts to the environment. The purpose of this research is to analyze the interaction between concrete and bamboo of the species *Dendrocalamus giganteus* as well as to verify the potential of the annealed wire as a reinforcement of bond between the above-mentioned materials, justified by the search for alternative and renewable materials concomitantly with the defense of sustainability. The experimental schedule is divided into 3 stages: morphological, physical and mechanical characterization of bamboo; concrete dosing; and study of bamboo concrete interaction, analyzing the use of two types of wrapping wire on the bamboo surface as a mechanism of bond reinforcement: single spiral and double spiral, from the determination of the bond strength at 28 days for each case, of the load x displacement behavior and the microstructural analysis of the concrete bamboo interaction. The fixed factors were: compressive strength of the concrete (28 MPa), 200 mm is the length of bonded interface, bamboo sticks with rectangular section of 20 mm x 10 mm. All the results obtained were analyzed by statistical tests and it was verified that the presence of the node and the use of wire increases the bond strength by 42% and at least 25%, respectively.

Keywords: Bond strength; Bamboo; Microstructure; *Dendrocalamus giganteus*.

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 - Distribuição não uniforme da fibras em função da espessura.	24
Figura 2.2 - Estrutura externa comum à todas as espécies de bambu.	25
Figura 2.3 - Conglomerado agroindustrial em torno do bambu.	28
Figura 2.4 - Aplicações do bambu como elemento estrutural.	28
Figura 2.5 - Sistema de ensaio das espécies de bambu.	33
Figura 2.6 - Micrografias eletrônicas de varredura da seção transversal do bambu.	38
Figura 2.7 - Micrografias eletrônicas de varredura da anatomia do bambu.	39
Figura 2.8 - Conjuntos vasculares do bambu obtidas por microscopia eletrônica de varredura.	40
Figura 2.9 - Micrografia eletrônica de varredura do bambu na direção longitudinal.....	41
Figura 2.10 - Micrografia de células parenquimáticas preenchidas com amido.	41
Figura 2.11 - Imagem 3D da microestrutura de bambu (amostra região interna).	42
Figura 2.12 - Análise de imagem de microtomografia de raios X.	43
Figura 2.13 - Morfologia dos elementos do bambu obtida por mecanismos de microscopia. .	44
Figura 2.14 - Composição do bambu (<i>Dendrocalamus giganteus</i>) ao longo da espessura do colmo.	45
Figura 2.15 - Comparação entre as frações volumétricas e o resultados médios dos ensaios..	46
Figura 2.16 - Absorção de água de espécies de bambu.	47
Figura 2.17 - Comportamento de talisca de bambu não tratada como reforço em concreto. ...	48
Figura 2.18 - Estágios de aderência aço-concreto.	51
Figura 3.1 - Estrutura do programa experimental.....	59
Figura 3.2 - Touceira de <i>Dendrocalamus giganteus</i>	61
Figura 3.3 - Sistema de ensaio de massa específica.	63

Figura 3.4 - Corpos de prova de bambu para ensaio de tração.....	64
Figura 3.5 - Corpos de prova de bambu para ensaio de compressão.	64
Figura 3.6 - Produção concreto.	66
Figura 3.7 - Detalhamento do bambu sem nó para o ensaio de arrancamento.....	67
Figura 3.8 - Detalhamento do bambu com nó para o ensaio de arrancamento.....	68
Figura 3.9 - Gaiola de reação para o ensaio de aderência.	69
Figura 3.10 - Sistema de ensaio de aderência.....	69
Figura 4.1 - Tempo de pega do Cimento Portland Tipo IV.....	71
Figura 4.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	72
Figura 4.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo.....	73
Figura 4.4 - Micrografia eletrônica de varredura do bambu na direção longitudinal.....	74
Figura 4.5 - Micrografia de células parenquimáticas do bambu preenchidas com pontoações celulares.	75
Figura 4.6 - Resultados de massa específica do bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i>	76
Figura 4.7 - Diagramas de absorção e evaporação de água do bambu.	77
Figura 4.8 - Diagrama de variação dimensional do bambu.	78
Figura 4.9 - Resultados do ensaio de tração do bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i>	79
Figura 4.10 - Ruptura à tração do bambu. (a) Sem nó; (b) Com nó.	80
Figura 4.11 - Diagrama Tensão x deformação do bambu.	80
Figura 4.12 - Resultados de módulo de elasticidade do bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i>	81
Figura 4.13 - Resultados de resistência à compressão do bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i> ..	82
Figura 4.14 - Ruptura à compressão bambu. (a) Sem nó; (b) Com nó.....	83
Figura 4.15 - Resultados de resistência à compressão do concreto aos 28 dias.....	84
Figura 4.16 - Resultados de resistência de aderência bambu concreto aos 28 dias.....	86
Figura 4.17 - Diagrama carga x deslocamento do ensaio de arrancamento bambu concreto...	88
Figura 4.18 - Micrografias do ensaio de arrancamento.	89

Figura 4.19 - Micrografias do concreto da região de contato com o bambu.	90
Figura 4.20 - Micrografias do concreto da região de contato com o aço.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 - Resultados de Módulo de Elasticidade (ARMANDEI <i>et al.</i> , 2015).	34
Tabela 2.2 - Relação resistência à tração e massa específica de alguns materiais.	35
Tabela 2.3 - Índice percentual da composição do bambu por camada.	45
Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas do bambu <i>Dendrocalamus giganteus</i> por camada.	46
Tabela 2.5 - 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. ...	48
Tabela 3.1 - Propriedades do concreto.	66
Tabela 3.2 - Programa experimental ensaio de arrancamento.	68
Tabela 4.1 - Resultados de massa específica do cimento.	71
Tabela 4.2 - Caracterização do agregado miúdo	72
Tabela 4.3 - Caracterização do agregado graúdo	73
Tabela 4.4 - Tensões de aderência experimentais e de cálculo.	85
Tabela 4.5 - Influência dos diferentes tratamentos empregados no estudo de aderência bambu concreto.	87
Tabela A.1 - Resultados do ensaio de massa específica do bambu.	100
Tabela A.2 - Resultados do ensaio de absorção de água do bambu com nó.	100
Tabela A.3 - Resultados do ensaio de absorção de água do bambu sem nó.	101
Tabela A.4 - Resultados do ensaio de evaporação de água do bambu sem nó.	101
Tabela A.5 - Resultados do ensaio de evaporação de água do bambu com nó.	101
Tabela A.6 - Resultados do ensaio de inchamento (espessura do bambu).	102
Tabela A.7 - Resultados do ensaio de contração (espessura do bambu).	102
Tabela A.8 - Resultados do ensaio de inchamento (largura do bambu).	102
Tabela A.9 - Resultados do ensaio de contração (largura do bambu).	103

Tabela A.10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão do bambu.	103
Tabela A.11 - Resultados do ensaio de resistência à tração do bambu.	104
Tabela A.12 - Resultados do ensaio de arrancamento das amostras sem nó.	105
Tabela A.13 - Resultados do ensaio de arrancamento das amostras com nó.	106
Tabela A.14 - Resultados do ensaio resistência à compressão do concreto aos 28 dias.	106
Tabela B.1.1 - Teste de normalidade dos resultados de massa específica do bambu.	107
Tabela B.1.2 - Teste de normalidade dos resultados de absorção de água do bambu com nó.	107
Tabela B.1.3 - Teste de normalidade dos resultados de absorção de água do bambu sem nó.	107
Tabela B.1.4 - Teste de normalidade dos resultados de evaporação do bambu sem nó.	108
Tabela B.1.5 - Teste de normalidade dos resultados de evaporação do bambu com nó.	108
Tabela B.1.6 - Teste de normalidade dos resultados de inchamento (espessura do bambu). .	108
Tabela B.1.7 - Teste de normalidade dos resultados de contração (espessura do bambu).	109
Tabela B.1.8 - Teste de normalidade dos resultados de inchamento (largura do bambu).	109
Tabela B.1.9 - Teste de normalidade dos resultados de contração (largura do bambu).	109
Tabela B.1.10 - Teste de normalidade dos resultados de resistência à tração do bambu.	109
Tabela B.1.11 - Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão do bambu.	110
Tabela B.1.12 - Teste de normalidade dos resultados de módulo de elasticidade do bambu.	110
Tabela B.1.13 - Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão do concreto.	110
Tabela B.1.14 - Teste de normalidade dos resultados de arrancamento bambu concreto.	111
Tabela B.2.1 - Teste de homocedasticidade dos resultados de massa específica do bambu. .	111
Tabela B.2.2 - Teste de homocedasticidade dos resultados de absorção de água do bambu.	111
Tabela B.2.3 - Teste de homocedasticidade dos resultados de evaporação do bambu.	112
Tabela B.2.4 - Teste de homocedasticidade dos resultados de inchamento do bambu.	112

Tabela B.2.5 - Teste de homocedasticidade dos resultados de contração do bambu.	112
Tabela B.2.6 - Teste de homocedasticidade dos resultados de resistência à tração do bambu.	113
Tabela B.2.7 - Teste de homocedasticidade dos resultados de módulo de elasticidade do bambu.	113
Tabela B.2.8 - Teste de homocedasticidade dos resultados de resistência à compressão do bambu.	113
Tabela B.2.9 - Teste de homocedasticidade dos resultados de resistência à compressão do concreto.	113
Tabela B.2.10 - Teste de homocedasticidade dos resultados de arrancamento bambu concreto.	113
Tabela B.3.1 - Teste t - Student dos resultados de massa específica do bambu.....	114
Tabela B.3.2 - Teste t - Student dos resultados de absorção de água do bambu.	114
Tabela B.3.3 - Teste t - Student dos resultados de evaporação do bambu.	114
Tabela B.3.4 - Teste de Wilcoxon dos resultados de evaporação do bambu.	115
Tabela B.3.5 - Teste t - Student dos resultados de inchamento do bambu.....	115
Tabela B.3.6 - Teste Wilcoxon dos resultados de inchamento do bambu.....	115
Tabela B.3.7 - Teste t - Student dos resultados de contração do bambu.	115
Tabela B.3.8 - Teste Wilcoxon dos resultados de contração do bambu.....	116
Tabela B.3.9 - Teste t - Student dos resultados de resistência à tração do bambu.....	116
Tabela B.3.10 - Teste t - Student dos resultados de módulo de elasticidade do bambu.....	116
Tabela B.3.11 - Teste t - Student dos resultados de resistência à compressão do bambu.	116
Tabela B.3.12 - Teste t - Student dos resultados de arrancamento.....	116
Tabela B.4.1 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão do concreto.	117
Tabela B.4.2 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de arrancamento (família sem nó)....	117
Tabela B.4.3 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados de arrancamento (família sem nó).	117

Tabela B.4.4 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de arrancamento (família com nó)...	117
Tabela B.4.5 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados de arrancamento (família com nó).....	118

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.

Símbolo	Significado
%	: Porcentagem
°C	: Graus Celsius
‰	: Permilagem
a/c	: Relação água/cimento
cm	: Centímetros
cm ³	: Centímetros cúbicos
CO ₂	: Gás carbônico
CP – IV	: Cimento Portland Tipo IV
C-S-H	: Silicatos de Cálcio Hidratado
ELS	: Estado Limite de Serviço
ELU	: Estado Limite Ultimo
ϵ_c	: Deformação de compressão no concreto
ϵ_s	: Deformação de tração da armadura do aço
ϵ_{yd}	: Deformação de tração de cálculo da armadura de aço
f_{bd}	: Resistência de aderência de cálculo
f_{cd}	: Resistência de cálculo do concreto à compressão
f_{ck}	: Resistência característica do concreto à compressão
f_{ctd}	: Resistência de cálculo do concreto à tração
g	: Grama
GPa	: Giga Pascal
kN	: Quilo Newton
l_b	: Comprimento de ancoragem
LVDT	: Transformadores Diferenciais Variáveis Linearmente
m	: Metro
mm	: Milímetros
mm ²	: Milímetros quadrados

MPa	: Mega Pascal
N	: Newton
pH	: Potencial hidrogeniônico
SiO	: Monóxido de silício
γ_c	: Coeficiente de minoração da resistência do concreto
ρ_a	: Massa específica da areia
ρ_b	: Massa específica da brita
ρ_c	: Massa específica do cimento
τ_b	: Tensão média de aderência

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	20
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	20
1.2 JUSTIFICATIVA	21
1.3 OBJETIVO	22
1.3.1 Objetivos específicos	22
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 ASPECTOS GERAIS DO BAMBU	23
2.2 BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUTURAL	27
2.3 DETERIORAÇÃO DO BAMBU	29
2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU	30
2.5 MICROESTRUTURA DO BAMBU	36
2.6 COMPLEXIDADES DA ASSOCIAÇÃO DO BAMBU COM CONCRETO	47
2.6.1 Absorção de água e variação dimensional do bambu	47
2.6.2 Aderência bambu - concreto	50
2.6.2.1 Resistência de aderência	54
2.7 RECOMENDAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DE BAMBU	55
2.8 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO BAMBU NO CONCRETO	58
3. METODOLOGIA	59
3.1 MATERIAIS	59
3.1.1 Cimento	59
3.1.2 Agregado miúdo	60
3.1.3 Agregado graúdo	60
3.1.4 Água	60
3.1.5 Aditivo	60
3.1.6 Arame recozido	61
3.1.7 Bambu	61
3.1.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	62

3.1.7.2 Massa específica	62
3.1.7.3 Absorção de água e variação dimensional.....	63
3.1.7.4 Resistência à tração paralela as fibras	63
3.1.7.5 Resistência à compressão paralela as fibras	64
3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	65
3.2.1 Concreto	65
3.2.2 Interação bambu - concreto	67
3.2.2.1 Arrancamento bambu - concreto	67
3.2.2.2 Microscopia eletrônica de varredura bambu - concreto	70
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	71
4.1.1 Cimento	71
4.1.2 Agregado miúdo	72
4.1.3 Agregado graúdo	73
4.1.4 Bambu.....	74
4.1.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	74
4.1.4.2 Massa específica	75
4.1.4.3 Absorção de água e variação dimensional.....	76
4.1.4.4 Resistência à tração paralela as fibras	78
4.1.4.5 Resistência à compressão paralela as fibras	82
4.1.5 Concreto	83
4.2 INTERAÇÃO BAMBU CONCRETO	84
4.2.1 Arrancamento bambu - concreto	84
4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	88
5. CONCLUSÕES GERAIS	92
SUGESTÕES DE PESQUISAS.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
APÊNDICE	100

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ao longo de toda história, inúmeros materiais têm sido empregados como materiais de construção. Nos primórdios da civilização, os materiais mais requeridos eram os que se encontravam na natureza, como por exemplo a pedra e a madeira, e também o bambu. Com o decorrer do tempo e do desenvolvimento do conhecimento, obtiveram-se novos materiais, como o aço e o concreto, materiais mais utilizados na construção civil. No entanto, tais materiais apresentam elevados custos de produção e geram grandes impactos ao meio ambiente, ao passo que a madeira e o bambu são materiais renováveis e sustentáveis, bem como, exibem custos de produção mais baixos.

O crescimento populacional e a constante urbanização das cidades contribuem para o desenvolvimento do setor construtivo e, conseqüentemente, intensificação da utilização de matérias-primas, diversos gêneros anteriormente abundantes começam a se tornar economicamente caros ou até inviáveis, reflexo do começo da escassez destes insumos tradicionais.

A atual crise energética provocada pelo crescimento industrial indiscriminado tem gerado preocupações cada vez maiores sobre a gestão dos recursos energéticos ainda disponíveis e sobre a degradação ambiental, conduzindo a uma busca contínua de materiais não-poluente e processos de fabricação que exigem menos energia (GHAVAMI, 2005). Segundo dados estatísticos do Instituto Aço Brasil a produção siderúrgica brasileira de aço bruto em 2016 atingiu aproximadamente 30,2 milhões de toneladas, uma redução de 9,2 % em relação ao ano de 2015.

Assim sendo, as alterações do equilíbrio ecológico e o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente são umas das principais preocupações de alguns pesquisadores nas últimas décadas, os quais buscam em seus estudos novas tecnologias como alternativas para uma indústria da construção civil mais sustentável e carente de matérias-primas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Neste contexto, o bambu apresenta-se como fonte de proteção ao solo e sequestrador de carbono atmosférico, podendo ser empregado como regenerador ambiental por meio do reflorestamento de outras madeiras. Este vegetal, naturalmente, possui características atrativas, tais como: baixa densidade, boa resistência, principalmente, à tração e à flexão, crescimento acelerado e esteticamente favorável. Podendo assim, ser alternativa para uma indústria da construção civil mais sustentável e carente de matérias-primas. De acordo com *World Commission On Environment and Development* (1987), sustentabilidade, em geral, é um termo usado para definir ações e atividades humanas que visam suprir as necessidades atuais sem comprometer o futuro das próximas gerações.

Segundo Ghavami (1995), pesquisas da Associação Brasileira em Materiais e Tecnologias Não Convencionais (ABMTENC) sobre o consumo energético e o impacto dos diferentes materiais convencionais e alternativos apontam que o bambu consome menos energia, exibindo resultados satisfatórios nos testes que o utilizam como substituto ao aço em elementos estruturais de concreto. Verificou-se que para o aço, a energia necessária para produzir 1 m³ por unidade de tensão projetada, é de 50 vezes mais energia do que para o bambu.

O bambu faz parte de uma cultura milenar, mantida principalmente pelos povos asiáticos, sendo fonte econômica muito importante para esses países. Apesar disso, Gaion *et al.* (2005) afirmaram que o bambu ainda é pouco conhecido e explorado na América Latina. Embora esta disponha de grandes áreas florestais de bambu, apenas alguns países como Venezuela, Colômbia, Peru e Costa Rica promovem a pesquisa e exploração do bambu, ainda que estudos e aplicações na produção industrial ainda sejam muito restritos.

Assim sendo, existe um significativo aumento na comunidade científica na exploração do bambu como fonte de estudo (GHAVAMI, 2005; ARMANDEI *et al.*, 2015; LIMA JUNIOR *et al.*, 2010; TAN *et al.*, 2011; PEREIRA e BERALDO, 2008), pois, acredita-se no potencial deste material como tecnologia alternativa para a indústria da construção civil.

1.3 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é analisar a interação mecânica entre o concreto e o bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* bem como verificar o potencial do arame recozido como mecanismo de reforço de aderência entre os materiais supracitados.

1.3.1 Objetivos específicos

- Estudar as propriedades físicas e mecânicas do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*;
- Determinar a tensão de aderência do bambu com o concreto;
- Analisar a interface microestrutural bambu concreto por meio de Microscopia Eletronica de Varredura (MEV).

Assim sendo, espera-se, por meio da metodologia empregada nesta pesquisa, alcançar os objetivos supracitados e contribuir para a comunidade científica acerca da utilização do bambu como material de engenharia.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa está dividida em cinco capítulos, conforme descrito a seguir:

No primeiro capítulo é apresentada a introdução, na qual são abordados a importância do tema, as justificativas, os objetivos e a estrutura da pesquisa.

O segundo capítulo é composto pela revisão bibliográfica a qual fornece informações para conhecimento e compreensão do tema, sendo dividido em: aspectos gerais do bambu; bambu como elemento estrutural; deterioração do bambu; propriedades mecânicas do bambu; microestrutura do bambu; complexidades da associação do bambu com concreto; recomendações para utilização de bambu e vantagens e desvantagens da utilização do bambu no concreto.

O terceiro capítulo corresponde a metodologia empregada na pesquisa, abordando os materiais utilizados e o programa experimental. O quarto capítulo, por sua vez, apresenta os resultados obtidos nos ensaios, assim como sua análise e discussão.

O quinto capítulo finaliza o trabalho apresentando as conclusões acerca do estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPECTOS GERAIS DO BAMBU

Bambu é uma palavra de substantivo masculino originada do idioma Marati (MICHAELIS, 2017). Segundo Pereira e Beraldo (2008), para a botânica, o bambu é cada uma das gramíneas lenhosas ou arborescentes dos gêneros *Bambusa*, *Arundinária*, *Dendrocálamo* e gêneros correlacionados distribuídos em larga escala em todo o planeta, principalmente, nas regiões tropicais e subtropicais dos hemisférios.

De forma mais específica, o mesmo autor define 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. 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*.

Bambus são gramas gigantes e não árvores como comumente se crê. Eles pertencem à família do *Bambusoideae*. O colmo de bambu, em geral, é uma concha cilíndrica, que é dividida por diafragmas transversais nos nós. As cascas de bambu são materiais ortotrópicos com alta resistência na direção paralela às fibras e baixa resistência perpendicular às fibras, respectivamente (GHAVAMI, 2005).

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 2.1 ilustra que as fibras são concentradas nas regiões mais perto da pele exterior (casca).

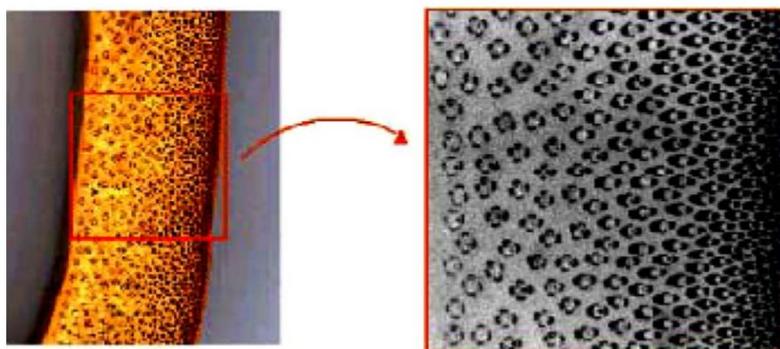


Figura 2.1 - Distribuição não uniforme da fibras em função da espessura.
Fonte: Ghavami (2005).

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 afunilar da base para o topo, o qual o diâmetro não possui grande variação até 75% da altura. Ghavami e 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 e 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. A Figura 2.2 ilustra os principais constituintes da estrutura externa do bambu, comum à todas espécies.

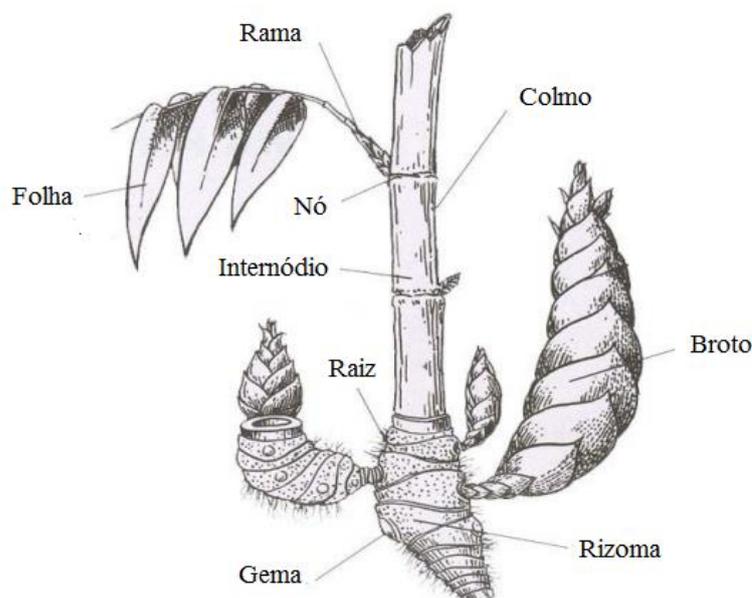


Figura 2.2 - Estrutura externa comum à todas as espécies de bambu.

Fonte: Adaptado de National Mission on Bamboo Applications - NMBA (2004).

Subitamente, o que distingue o bambu dos outros materiais vegetais estruturais é sua elevada produtividade. Este material atinge elevada resistência mecânica estrutural cerca de dois anos e meio de ter eclodido do solo, não havendo assim, neste aspecto, nenhum candidato a altura no reino vegetal. Corroborando-se a isso, 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 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 e Beraldo (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 analisaram 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 a cerca de 23%.

Os autores ainda explicam que o bambu é uma planta monocotiledônea de origem tropical, de rápido crescimento, sendo considerado um importante regenerador ambiental devido ao seu sistema radicular. O *Dendrocalamus giganteus* é popularmente conhecido por bambu-gigante, sendo uma espécie entouceirante de grande porte, cujos colmos podem variar de 24 a 40 metros de altura, com diâmetros entre 10 e 20 cm.

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 entre 8 e 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 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), uma 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 e MARINHO, 2005).

2.2 BAMBU COMO ELEMENTO ESTRUTURAL

As propriedades mecânicas do bambu tem sido alvo de muitos estudos para alguns pesquisadores, logo, pode-se deparar com inúmeros valores, porém, há uma variabilidade nesses valores para autores distintos. Esse fato se dá, essencialmente, pela carência de normas que padronizem a realização de ensaios, obrigando o pesquisador a estudar o bambu de acordo com as restrições de seu laboratório de estudo e com o que ache mais adequado pelo fato do bambu ser um material, tipicamente, heterogêneo por se tratar de um material natural.

Os primeiros estudos de tentativa de substituição do aço pelo bambu com reforço de concreto se deram o início do século XX, mais exatamente em 1918, os quais denotam que os chineses foram pioneiros na utilização de bambu em construções. Com o advento da Segunda Guerra Mundial, Japão e Estados Unidos também incentivaram tais pesquisas devido a possível dificuldade de obtenção de aço (FERREIRA, 2002).

Segundo Salcedo (2001), antes de terem sido utilizados na China em 1918, os primeiros ensaios realizados com bambu foram feitos por H. K. Chou (1914) nos Estados Unidos, a qual foram realizadas concretagens de pilares solicitados a flexão de pontes para linha de trens com bambu da espécie *Phyllostachys*. Foram ensaiadas mais de 200 amostras e apresentaram resistência à flexão de 93,5 MPa, resistência à tração de 98,6 MPa, compressão de 38,7 MPa e cisalhamento de 8,0 MPa.

Há uma tradição milenar da utilização de bambu mantida pelos povos asiáticos, sendo uma fonte econômica muito importante para esses países. De acordo com a NMBA – *National Mission on bamboo application*, Índia (2004), um bilhão de pessoas pelo mundo vivem em casas de bambu. Países como a Colômbia, Equador e Costa Rica, utilizam este material para a construção de suas habitações há milhares de anos. Portanto, países com uma cultura milenar de bambu possuem as melhores tecnologias, como é o caso da China no aproveitamento industrial e a Colômbia na construção civil. A Figura 2.3 ilustra o conglomerado agroindustrial em torno do bambu na Colônia de Parque Verde em Fazenda Rio Grande, Região Metropolitana de Curitiba (CASAGRANDE JR. *et al.*, 2003).



Figura 2.3 - Conglomerado agroindustrial em torno do bambu.

Fonte: Adaptado de Casagrande Jr. *et al.* (2003).

Assim sendo, devido a sua flexibilidade e resistência o bambu é utilizado desde estruturas mais simples como bicicletas e andaimes, além de malocas e casas populares até edifícios monumentais que hoje são símbolos da arquitetura hindu, como o Taj Mahal e a Catedral de Bambu projetada pelo arquiteto Simón Vélez (Figura 2.4).

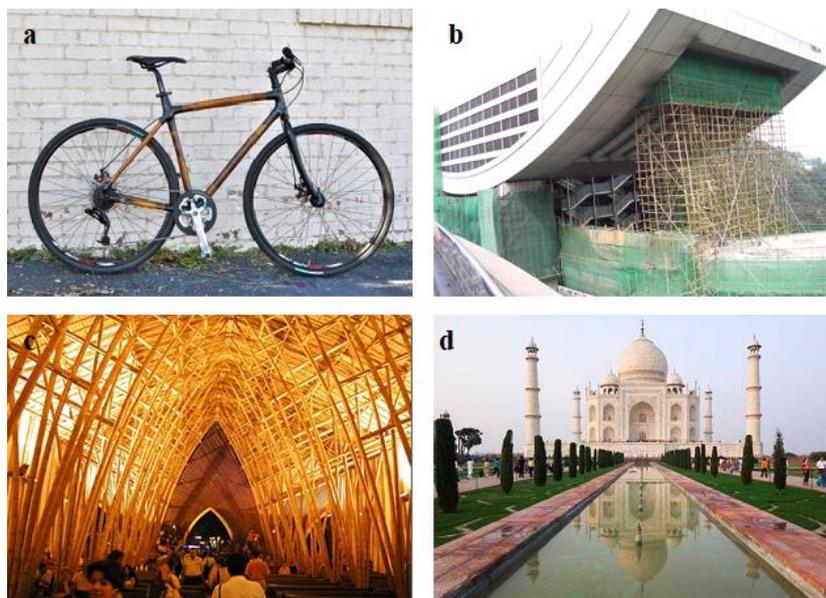


Figura 2.4 - Aplicações do bambu como elemento estrutural.

(a) bicicleta; (b) andaime em Hong Kong; (c) Catedral de Bambu projetada por Simón Vélez; (d) Taj Mahal. As cúpulas no monumento Hindu foram feitas de bambu.

Fonte: (a) www.bamboobikemaker.com (2016); (b) www.engenhariaeconstrucao.com (2012); (c) www.ecoeficientes.com.br (2018); (d) whc.unesco.org (2018).

2.3 DETERIORAÇÃO 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.

Em relação as regiões do colmo, Liese (1981, *apud* PEREIRA, 1992) afirma que a durabilidade natural da região do topo se assemelha mais com a região mediana em comparação com a região basal, levando-se a deduzir que há uma descontinuidade que pode interferir nas características deste vegetal.

Segundo Mendes e Alves (1988), as principais causas de deterioração da madeira se deve pelo 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. Por fim, tem-se a degradação biológica, que é causada por organismos xilófagos, representados por fungos, insetos, moluscos, crustáceos e bactérias, que serão o foco deste capítulo.

O mesmo autor ainda explica 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 exibe 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 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 5 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 exibem uma formação pulverulenta, de coloração variada que pode ser removido por meio de raspagem. Mendes e 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.

2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO BAMBU

Conforme Tan *et al.* (2011), o bambu atua como se fosse um pilar engastado no solo submetida as cargas de ação do vento e do peso próprio, assim sendo, é considerada uma estrutura intrinsecamente potencializada para suportar momentos fletores. Em analogia a qualquer outro material, necessariamente deve-se recorrer a ensaios para se obter as propriedades mecânicas do bambu. Como dito anteriormente, ensaios de bambu normalmente são estudos que conduziram a adequação de normas utilizadas para testar materiais tradicionais,

como é o exemplo do aço. Portanto, este capítulo abordará o que se encontra na comunidade acadêmica em termos de resultados e valores que servirão como base para o estudo.

Ghavami e Marinho (2005) estudaram as propriedades físicas, mecânicas e meso-estruturais (análise da variação volumétrica de fibras espessura da parede do bambu) dos colmos inteiros do bambu da espécie *Gradua angustifolia*, ou seja, base, centro e topo do material. Os autores afirmam que o módulo de resistência varia em função do diâmetro e da espessura da parede, assim sendo, varia no decorrer do colmo. Os resultados evidenciaram que esta espécie de bambu resiste melhor quando solicitada à tração do que à compressão, com diferença de valores superior a 50% em todas as partes analisadas. Os autores também observaram que as curvas de tensão-deformação apresentados nos ensaios de resistência à tração e compressão apontam que esta espécie apresenta comportamento quase linear, até a ruptura, com módulo de elasticidade médio obtido no ensaio de tração de 15,11 GPa no sentido longitudinal das fibras e coeficiente de poisson médio de 0,26, com valores deste último aumentando da base para o topo. A cerca de valores de resistência os autores obtiveram uma resistência à tração média de 86,96 MPa exibindo valores maiores na região central, isto é, 95,80 MPa no corpo de prova sem nó e de 82,61 com corpo de prova com nó. Em relação a resistência à compressão observaram um valor médio de 29,48 MPa, sendo máximo de 29,62MPa e 34,52 MPa no topo, com e sem nó respectivamente. De maneira geral, a presença de nó teve pouco influencia na resistência à compressão e módulo de elasticidade médio no sentido longitudinal das fibras neste ensaio foi de 12,58 GPa. Para o esforço de cisalhamento, neste caso interlaminar, a resistência média foi de 2,02 MPa, sendo que esta resistência apresentou redução da parte superior até a base do colmo.

Ghavami e Marinho (2005) ainda concluíram de maneira análoga que os resultados de resistência obtidos para a espécie *Gradua angustifolia* apresentaram valores menores que as da espécie *Dendrocalamus giganteus* quando comparados aos resultados encontrados pelo grupo de pesquisa da PUC – Rio, constatando-se uma diferença de 43,8% na resistência à tração, 41,6% na resistência à compressão e 60% na resistência ao cisalhamento.

Lima Junior *et al.* (2005) analisaram o comportamento de vigas de concreto reforçadas com bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* por meio de um modelo computacional baseado no método de elementos finitos. De maneira geral, as varas de bambu exibiram um módulo de elasticidade médio de 14 GPa, significando que a resistência à tração é igual a 126 MPa. No entanto, considerando os resultados obtidos por Lima e Junior *et al.* (2000) de tensão

a tração de 97 MPa e que as varas de bambu seguem uma distribuição normal o qual 5% destes valores sejam inferiores ao valor característico e sugere que a resistência à tração a característica do *Dendrocalamus giganteus* seja igual a 105 MPa e o módulo de elasticidade igual a 90% de 14 GPa.

Em sua pesquisa Braga Filho *et al.* (2010) caracterizaram colmos de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* Munro com comprimento médio de 20 metros cortados com idade entre 2 a 3 anos e estocados para secar em sombra durante 3 meses em temperatura ambiente. Os autores explicam que o bambu desta espécie exibiu comportamento elástico-linear a tração até a ruptura, tanto na região nodal quanto para a internodal. Para a região nodal a gramínea apresentou resistência à tração de 97 MPa e para região entre nós de 277 MPa e módulos de elasticidade de 13 e 23 GPa, respectivamente.

Em seu estudo Lima Junior *et al.* (2010) também fizeram a caracterização de colmos da espécie *Dendrocalamus giganteus* com comprimento médio de 20 metros cortados com idade entre 4 e 5 anos secados a sombra em temperatura ambiente durante um período de 3 meses. Os autores obtiveram os mesmos resultados determinado por Braga Filho *et al.* (2010), no entanto, determinaram a resistência à compressão do bambu de 58 MPa, tanto para região nodal quanto na internodal. Neste último ensaio, também, foram determinados o módulo de elasticidade do bambu, 19 GPa e 22 GPa para região nodal e internodal, respectivamente. Para a área entre os nós também se definiu o coeficiente de Poisson (0,24) e a resistência ao cisalhamento paralelo as fibras de 7,8 MPa. Além disso, os autores utilizaram apenas os trechos basais e intermediários do colmo devido estas regiões não apresentarem grandes variações de resistência e de geometria e, assim, determinaram que o espaçamento entre nós era de 48,3 cm e diâmetro externo de 15,2cm.

Armandei *et al.* (2015) realizaram um estudo experimental para verificar a variação das propriedades mecânicas de taliscas de bambu das espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Phyllostachys aurea*. O objetivo do trabalho era estudar tais propriedades utilizando uma análise de espectro de frequência para as diferentes regiões da espessura da parede das espécies de bambu, ou seja, o comportamento dos colmos em diferentes regiões de sua seção transversal, conforme a Figura 2.5. Além disso, os autores também avaliaram a influência da posição das fibras nos resultados. Para isso, foram confeccionadas vigas das taliscas de bambu que serão ensaiadas em balanço livre. Estas amostras apresentavam idade entre 2 a 3 anos e foram

selecionadas a partir dos 10 primeiros nós inferiores de bambu, pois a distância internodal é pequena.

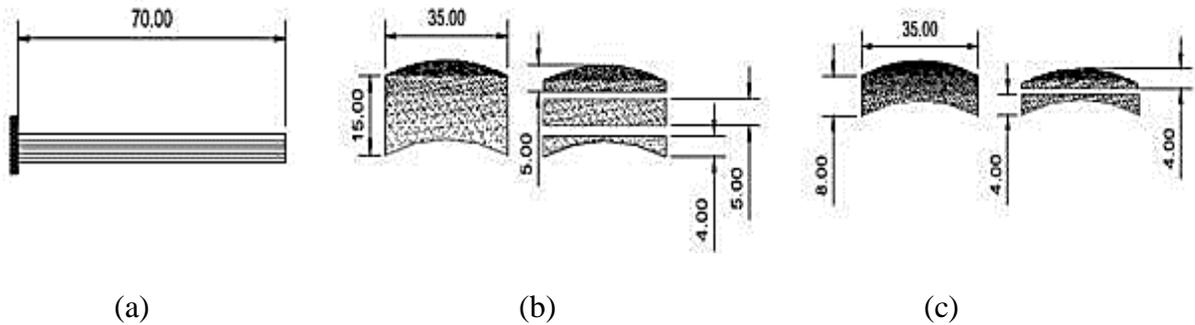


Figura 2.5 - Sistema de ensaio das espécies de bambu.
 (a) Vista longitudinal; (b) vista transversal *Dendrocalamus giganteus*; (c) Vista transversal *Phyllostachys aurea*. Fonte: Adaptado de Armandei *et al.* (2015).

Os autores determinaram a massa específica de todas as categorias das amostras e foi evidenciado que a superfície externa do colmo do bambu tem maior influência no peso próprio deste material levando-se a deduzir que espécies de bambu com maior região de fibras possuem maior relação resistência/peso próprio. Também foi observado o comportamento Carga x Deflexão das vigas de bambu das duas espécies mostrando que quando as fibras estão posicionadas para o lado de cima a viga apresenta maior ductilidade, isto é para mesma carga as taliscas apresentam maior deflexão, fato também observado quando analisadas as regiões isoladas da seção transversal levando se a deduzir que as fibras oferecem ao bambu maior tenacidade.

Além disso, os autores explicam que a vigas apresentaram linearidade de deformação até quando a curva de deflexão apresentou 100 mm, calculada utilizando o momento de inercia considerando uma seção transversal retangular, negligenciando a curva natural do bambu. Em relação ao módulo de elasticidade, Armandei *et al.* (2015) calcularam tanto o módulo estático quanto o dinâmico para as duas espécies em todas nas regiões da seção transversal adotada na pesquisa, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Resultados de Módulo de Elasticidade (ARMANDEI *et al.*, 2015).

Categoria		Módulo de Elasticidade estático (GPa)	Módulo de Elasticidade dinâmico (GPa)
Dendrocalamus giganteus	Segmento completo fibra em cima	11,38	9,04
	Segmento completo fibra em baixo	11,61	9,15
	Região externa	11,92	15,2
	Região central	8,15	9,63
	Região interna	6,62	9,57
Phyllostachys áurea	Segmento completo fibra em cima	9,49	6,48
	Segmento completo fibra em baixo	9,26	6,48
	Região externa	9,8	5,19
	Região interna	4,1	3,07

Fonte: Adaptado de Armandei *et al.* (2015).

Segundo Marçal (2008), o módulo de elasticidade do bambu varia entre 5,5 e 18 GPa. Por meio dos resultados pode se observar que a espécie *Dendrocalamus giganteus* apresenta maior rigidez em comparação a espécie *Phyllostachys áurea*. Além disso, observa-se que as posições das fibras para as duas espécies não interferem significativamente tanto no módulo estático quanto no módulo de elasticidade dinâmico. Entretanto, pode-se observar que a região externa (casca) apresenta maior módulo estático e dinâmico para as duas espécies, levando-se a deduzir que a rigidez do bambu emana principalmente da casca.

Para Hidalgo Lopes (1974) a superfície externa do colmo do bambu apresenta maior resistência à tração do que a região interna. Segundo ele, a região da casca pode alcançar uma tensão de 210 a 250 MPa e na região interna onde se encontra as fibras e onde verifica-se a maior aglomeração de células de parênquima, a resistência à tração está contida entre 150 a 200 MPa. Especificamente para a espécie *Dendrocalamus giganteus*, o autor explica que na presença e na ausência de nó, esta espécie exibiu uma resistência à compressão média de 35 MPa e 38 MPa, respectivamente. Em relação ao nó, o autor afirma que eles atuam com uma amarração transversal e propiciam maior rigidez ao colmo.

A resistência à tração do bambu é considerada elevada, tornando-o atrativo a sua utilização em substituição ao aço, principalmente quando se considera a razão entre sua

resistência e sua massa específica, conforme mostrado por Ghavami (1992, *apud* FERREIRA, 2002) na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Relação resistência à tração e massa específica de alguns materiais.

Material	Resistência à tração (MPa)	Peso específico - P (N/mm ³ x 10 ⁻²)	R= σ_T/P	R/Raço
Aço CA 50	500	7,83	0,63	1
Bambu	140	0,80	1,75	2,77
Alumínio	304	2,70	1,13	1,79
Ferro fundido	281	7,20	0,39	0,62

Fonte: Adaptado Ghavami (1992, *apud* FERREIRA, 2002).

Verifica-se que a razão entre tensão de tração do bambu e sua massa específica é aproximadamente 2,77 vezes maior que a obtida para o aço CA-50, cabendo-se lembrar que esse valor pode aumentar pelo fato de algumas espécies de bambu apresentarem resistências maiores, conforme visto anteriormente por Hidalgo Lopes (1974) e Ghavami (1995), sendo que este afirma que o bambu pode atingir até 170 MPa de resistência à tração para a espécie *Dendrocalamus giganteus*.

Yamaguchi *et al.* (2013) analisaram o comportamento de vigas de concreto (seção 15 x 25 cm² e vão de 2 m) armadas totalmente com bambu da espécie *Phyllostachys pubescens* com seção de 1200 mm² (2 taliscas de 30 x 10 mm) com parede interna do bambu posicionadas uma de frente com a outra e estribos de seção 15 x 3,8 mm espaçados a cada 200 mm e 100 mm, para vigas de bambu da amostra A e B, respectivamente. Os autores determinaram a resistência à tração para as amostras de bambu A e B, sendo 177 e 140 MPa, respectivamente. Para o módulo de elasticidade, os autores obtiveram 11,95 e 10,27 GPa, para as amostras A e B, respectivamente. O autor explica que no ensaio das vigas a carga aumentou linearmente após a fissura de flexão inicial aparecer em ambos as amostras, porque o bambu possui comportamento linear-elástico até sua ruptura à tração. Embora as cargas máximas dos espécimes A e B foram determinadas pela ruptura de um estribo e de uma talisca principal, respectivamente, estes valores foram quase equivalentes (cerca de 70 kN). Isto pode ser porque a resistência à tração do talisca de bambu principal usado para o espécime B era menor do que para o espécime A.

2.5 MICROESTRUTURA DO BAMBU

Inicia-se este presente capítulo com uma breve abordagem sobre a estrutura celular vegetal baseada em (TAIZ e ZEIGER, 2013).

Assim como os animais, os vegetais são formados por tecidos. Nos vegetais, esses tecidos são classificados em três sistemas: dérmico, vascular e fundamental. O sistema dérmico corresponde a 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.

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

Luis *et al.* (2017) explicam que 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.

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; 1998; QISHENG *et al.*, 2001, *apud* LUIS *et al.*, 2017).

Em 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 (GROSSER & LIESE, 1971; LIESE, 1985, 1998, *apud* LUIS *et al.*, 2017).

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 diferem 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 comparada 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 2.6.

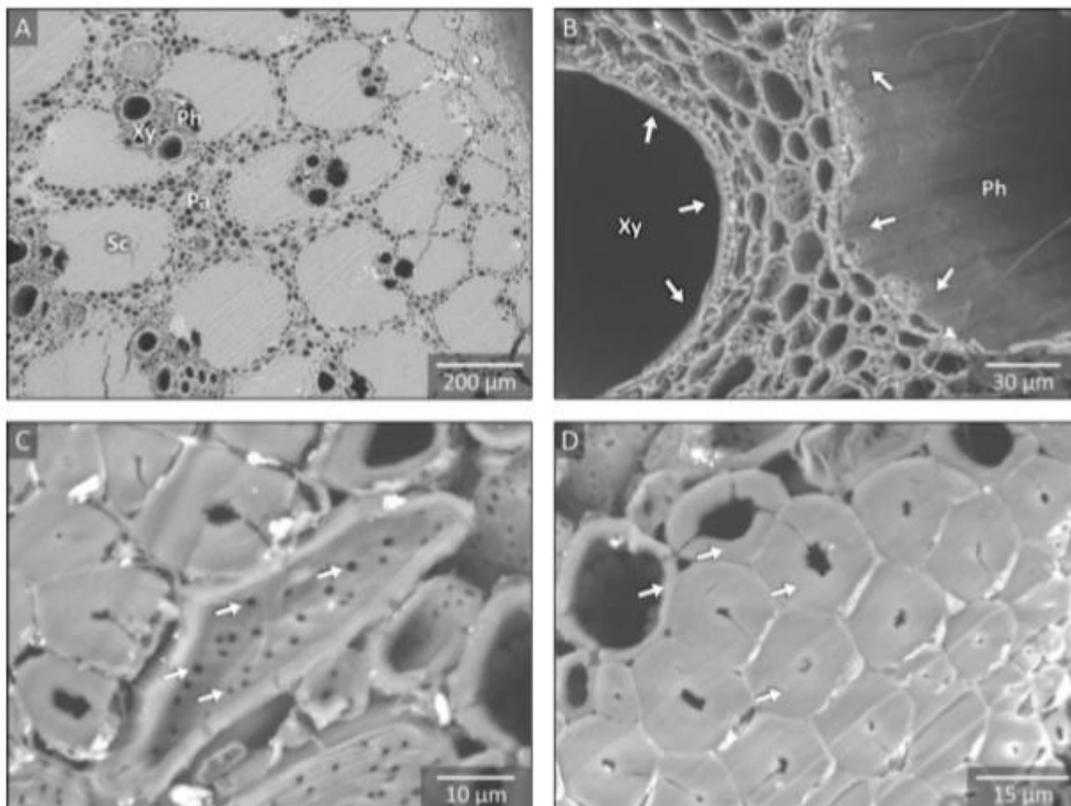


Figura 2.6 - Micrografias eletrônicas de varredura da seção transversal do bambu. (A) elementos dos feixes vasculares: xilema (Xy), floema (Ph), esclerênquima (Sc) e parênquima (Pa); (B) detalhe das paredes celulares do floema, dissolvida, e do xilema; (C) detalhe das pontoações celulares; (D) detalhe dos diferentes níveis de lignificação das paredes de células do esclerênquima. Fonte: Palombini (2016).

O autor explica que as fibras (células do esclerênquima) são visualizadas em corte transversal na Figura 2.6D 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 a 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 2.7.

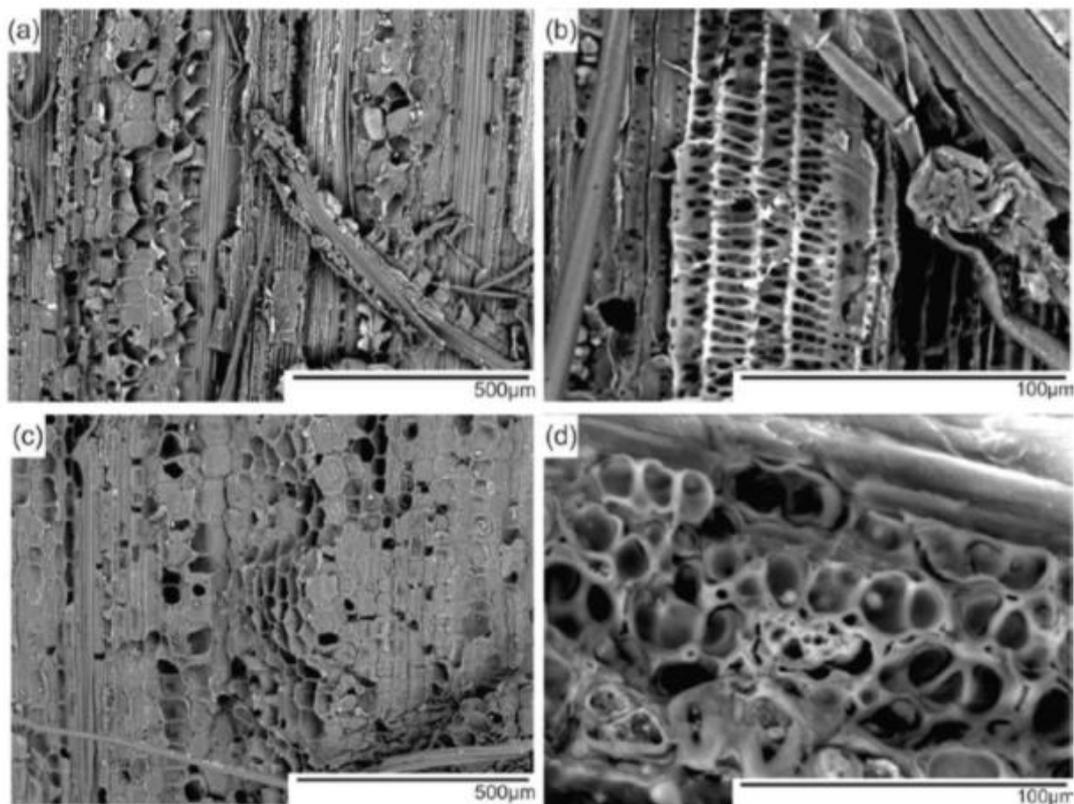


Figura 2.7 - Micrografias eletrônicas de varredura da anatomia do bambu.
Fonte: Cidade *et al.* (2015).

A Figura 2.7a 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 2.7b são observadas as microestruturas das células parenquimáticas protegidas por feixes de fibras ao seu redor, sendo identificadas dimensões e formatos distintos das células. Esta micrografia corresponde a 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 2.7c 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 2.7d pode se visualizar as células parenquimáticas dispostas de forma contígua em todas as direções (CIDADE *et al.*, 2015).

Segundo Liese (1980, *apud* GHAVAMI e 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 2.8.

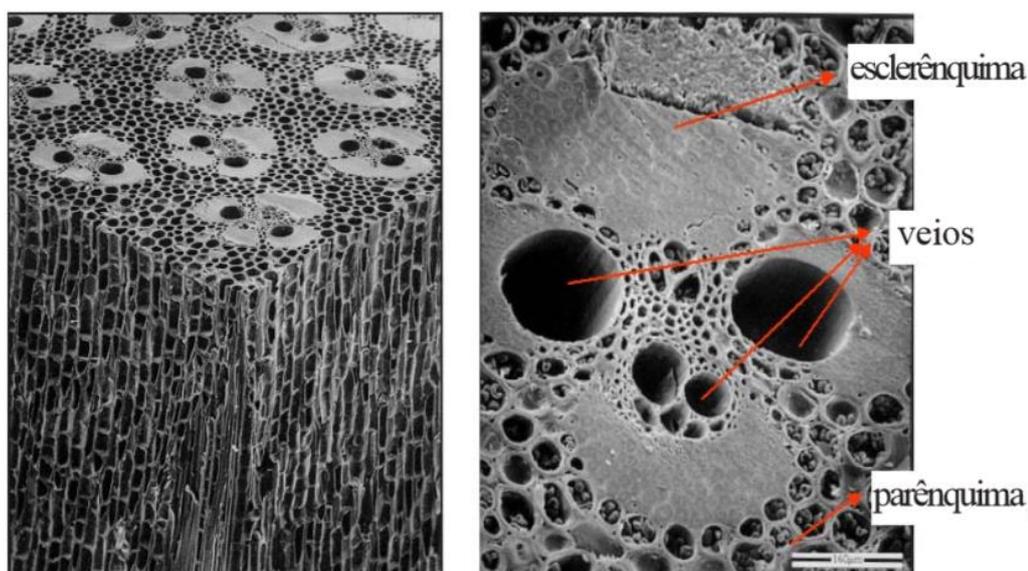


Figura 2.8 - Conjuntos vasculares do bambu obtidas por microscopia eletrônica de varredura.
Fonte: Liese (1980, *apud* GHAVAMI & MARINHO, 2005).

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 a 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 as demais órgãos da planta, e

para 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 a forma, tamanho e distribuição. (LIESE, 1998, *apud* GHAVAMI & MARINHO, 2005).

Ferreira (2007) realizou microscopia eletrônica de varredura em amostras de bambu na direção longitudinal e identificou os seus principais componentes e células parenquimáticas preenchidas com grãos de amido, que são nutrientes do bambu, conforme a Figura 2.9 e 2.10, respectivamente.

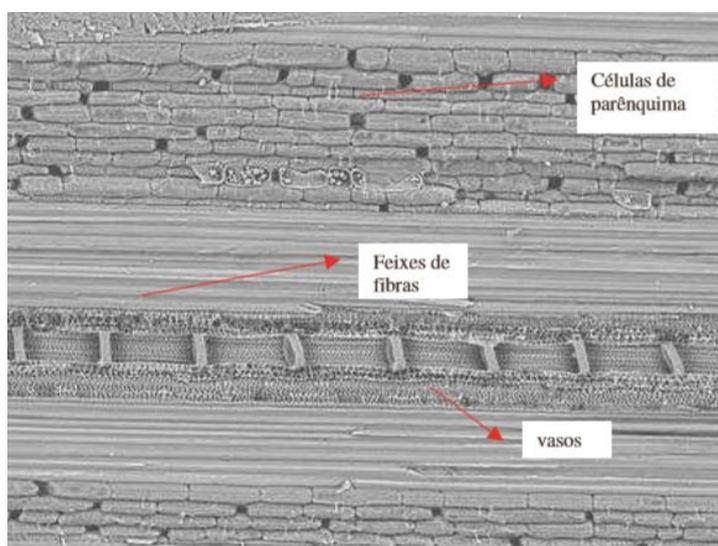


Figura 2.9 - Micrografia eletrônica de varredura do bambu na direção longitudinal.
Fonte: Ferreira (2007).

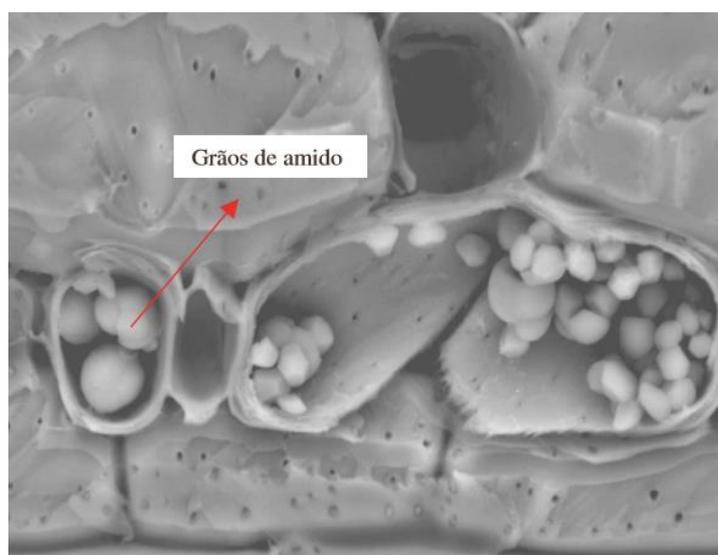


Figura 2.10 - Micrografia de células parenquimáticas preenchidas com amido.
Fonte: Ferreira (2007).

Krause *et al.* (2016) estudaram a influência da microestrutura do bambu (*Dendrocalamus giganteus*) sobre as suas propriedades mecânicas. Para tal, os autores realizaram ensaios de microscopia óptica, microscopia eletrônica de varredura e microtomografia de raio X em lâminas extraídas da região central do colmo e de posições específicas (camada interna e externa) juntamente com ensaios mecânicos, sob as mesmas configurações propostas. Os autores obtiveram por meio de microtomografia de raio X uma imagem 3D da microestrutura da camada interna do colmo, conforme ilustrado na Figura 2.11

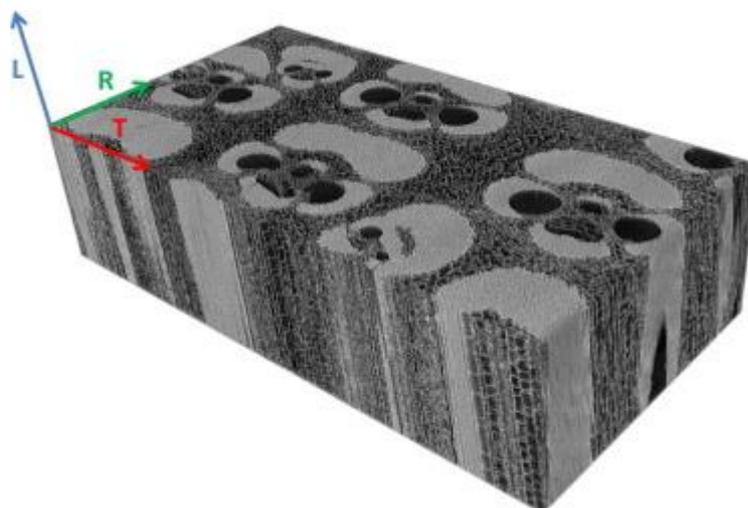


Figura 2.11 - Imagem 3D da microestrutura de bambu (amostra região interna).

(T) eixo tangencial; (R) eixo radial; (L) eixo longitudinal.

Fonte: Krause *et al.* (2016).

Krause *et al.* (2016), por meio de um software, realizaram um processamento de imagem e segmentação de fase. Esse processamento torna a tarefa de segmentação mais fácil e permite sua automação. No entanto, a segmentação das fases de bambu (esclerênquima, parênquima, vasos e poros) não pode ser realizada por meio de um simples limiar de nível de cinza. Esclerênquima e parênquima, bem como vasos e poros, apresentam níveis de cinza semelhantes. Portanto, outras características como textura e tamanho de regiões foram exploradas, levando ao uso de pré-processamento de operações de filtragem para preparar imagens para limiar e pós-processamento de operações lógicas e morfológicas para melhorar os resultados de segmentação. A Figura 2.12 ilustra imagens segmentadas de uma amostra da camada central do colmo.

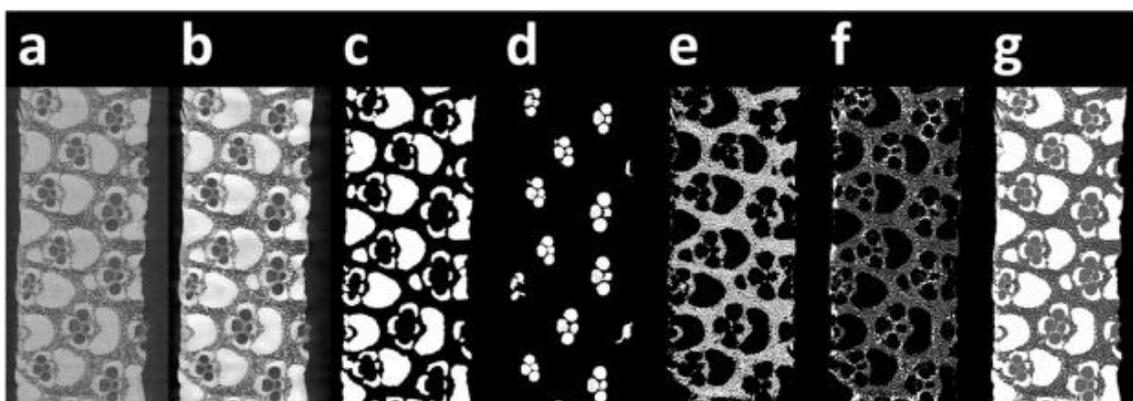


Figura 2.12 - Análise de imagem de microtomografia de raios X.

(a) imagem de fatia típica da amostra da camada medial; (b) imagem filtrada; (c) esclerênquima; (d) vasos; (e) poros; (f) parênquima; (g) uma composição de pseudo-cor mostrando fases segmentadas: poros (cinza escuro), vasos (cinza), parênquima (cinza claro), esclerênquima (branco).

Fonte: Krause *et al.* (2016).

Krause *et al.* (2016) explicam que por meio de microscopia de luz transmitida foi possível realizar uma análise morfológica detalhada e a inspeção de diversas escalas de poros no bambu. Segundo os autores relatam que os maiores vazios correspondem aos tubos condutores, com diâmetros variando de cerca de 50 μm a 200 μm . Já, os vazios menores, com diâmetros de cerca de algumas dezenas de microns, são poros na matriz (parênquima). Além disso, os tubos condutores estão rodeados por feixes de fibras (esclerênquima), nos quais um poro ainda mais pequeno (lúmen) pode ser identificado no centro de cada fibra. Estudos específicos mostraram que as fibras individuais são estruturadas por camadas de fibrilas com várias orientações, conforme a Figura 2.13b (RAY *et al.*, 2005, *apud* KRAUSE *et al.*, 2016).

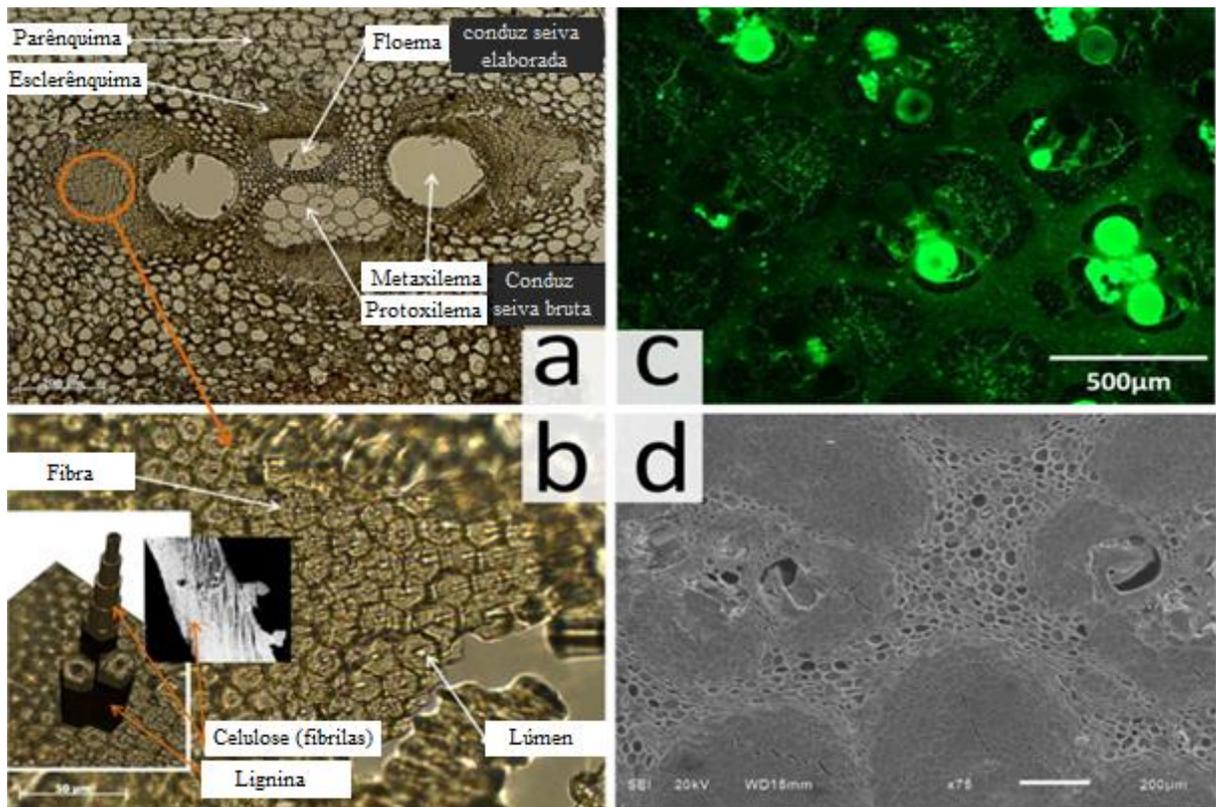


Figura 2.13 - Morfologia dos elementos do bambu obtida por mecanismos de microscopia. (a) imagem de microscopia óptica de transmissão de um corte transversal de *Dendrocalamus giganteus*; (b) detalhe do feixe de fibras, ilustração em 3D de três fibras únicas e camadas das fibrilas e microestrutura da fibra, mostrando a organização das fibrilas; (c) imagem de microscopia de luz refletida realizada no modo de contraste de fluorescência; (d) imagem de elétrons de varredura. Fonte: Adaptado Krause *et al.* (2016).

Krause *et al.* (2016) ainda relatam que o procedimento de microtomografia permitiu observar a microestrutura de bambu com um contraste e resolução adequados (Figura 2.14), fornecendo dados tridimensionais quantificáveis em geral, que tendem a ser mais representativos do que os bidimensionais, conforme a Tabela 2.3.

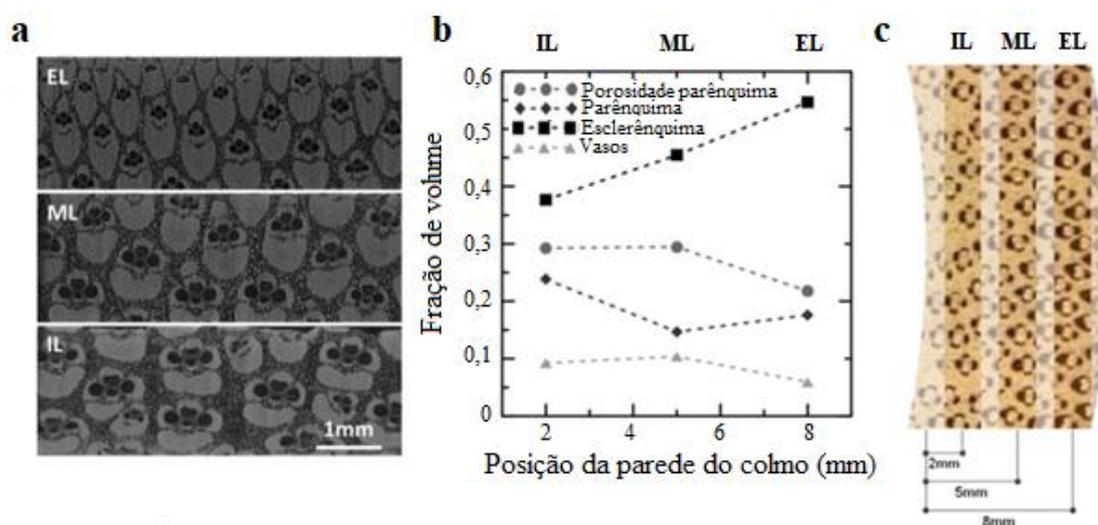
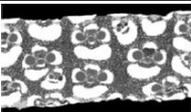
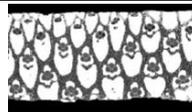


Figura 2.14 - Composição do bambu (*Dendrocalamus giganteus*) ao longo da espessura do colmo. (a) Imagens de microtomografia de raios X das camadas externa (EL), medial (ML) e interna (IL); (b) frações volumétricas de fibras, matrizes e categorias de vazios em relação à posição do eixo da lâmina na espessura da parede do colmo, começando na sua face interna; (c) Diagrama mostrando a posição das lâminas na parede do colmo.

Fonte: Adaptado Krause *et al.* (2016).

Tabela 2.3 - Índice percentual da composição do bambu por camada.

Amostras	Camada interna (IL)	Camada Medial (ML)	Camada Externa (EL)
Micro tomografias segmentadas			
Esclerênquima (%)	37,66	45,44	54,69
Parênquima (%)	23,83	14,68	17,61
Porosidade do parênquima (%)	29,27	29,47	21,76
Tubos de condução (%)	9,23	10,40	5,94
Σ vazios (%)	38,50	39,87	27,70

Fonte: Adaptado Krause *et al.* (2016).

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) manteve-se quase constante da camada interna para medial e então decai para a camada externa (KRAUSE *et al.*, 2016).

Os autores ainda correlacionam as propriedades mecânicas do bambu em função da fração volumétrica de cada componente da microestrutura do bambu (Figura 2.15), afirmando que o comportamento à tração e as propriedades mecânicas são ditados pela fração de volume da fibra. A Tabela 2.4 resume os valores médios dos resultados das propriedades mecânicas do bambu.

Tabela 2.4 - Propriedades mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus* por camada.

Amostra	σ_t - Sd (MPa)	E - Sd (GPa)	σ_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: σ_t : resistência à tração; E: módulo de elasticidade; σ_c : resistência à compressão; Sd: desvio padrão. Fonte: Adaptado Krause *et al.* (2016).

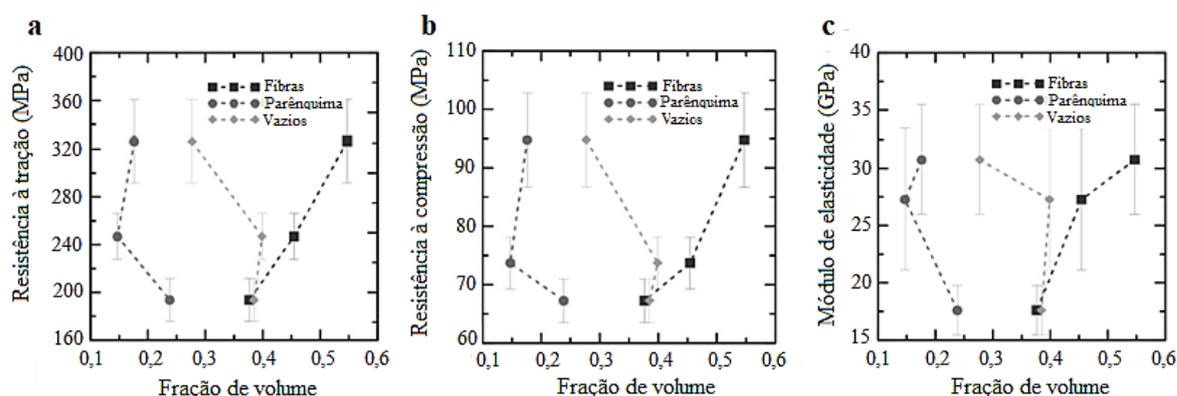


Figura 2.15 - Comparação entre as frações volumétricas e o resultados médios dos ensaios.

(a) resistência à tração; (b) resistência à compressão; (c) módulo de elasticidade.

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. Sozinho, 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).

2.6 COMPLEXIDADES DA ASSOCIAÇÃO DO BAMBU COM CONCRETO

2.6.1 Absorção de água e variação dimensional do bambu

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 2.16.

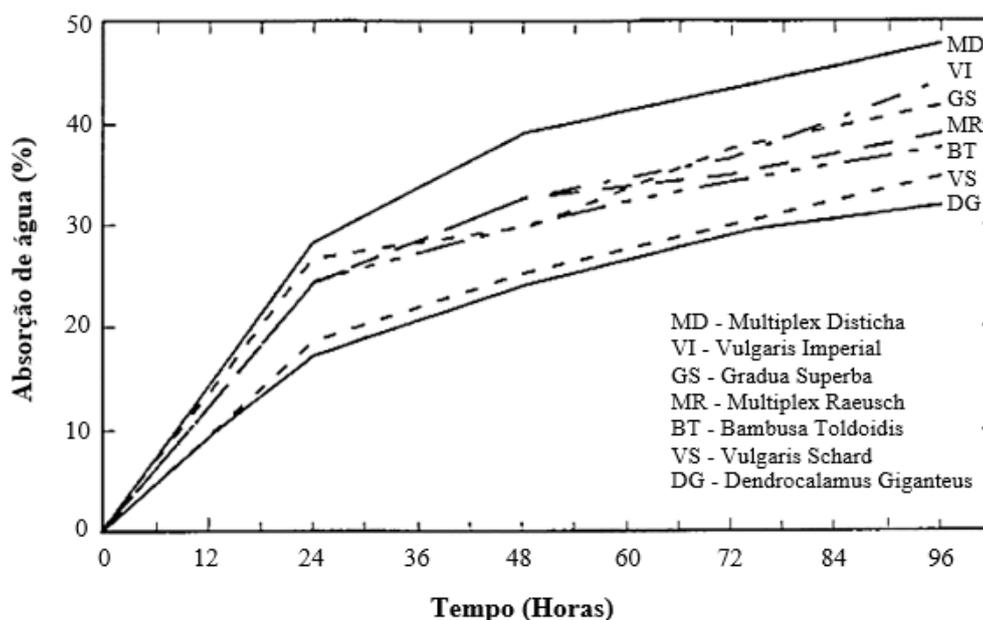


Figura 2.16 - Absorção de água de espécies de bambu.
Fonte: Adaptado Ghavami (2005).

O autor relata que em comparação entre todas as espécies, a menor quantidade de água absorvida é apresentada pelas espécies *Dendrocalamus giganteus* e *Bambusa vulgaris*, respectivamente. O autor ainda explica que tal absorção provocou variações dimensionais da seção transversal nessas duas espécies, atingindo 6% após 7 dias de imersão em água (GHAVAMI, 1988 e CULZONI, 1986, *apud* GHAVAMI, 2005). A variação dimensional de bambu tratado, devido à absorção de água pode provocar fissuras em concreto curado como demonstrado na Figura 2.17.

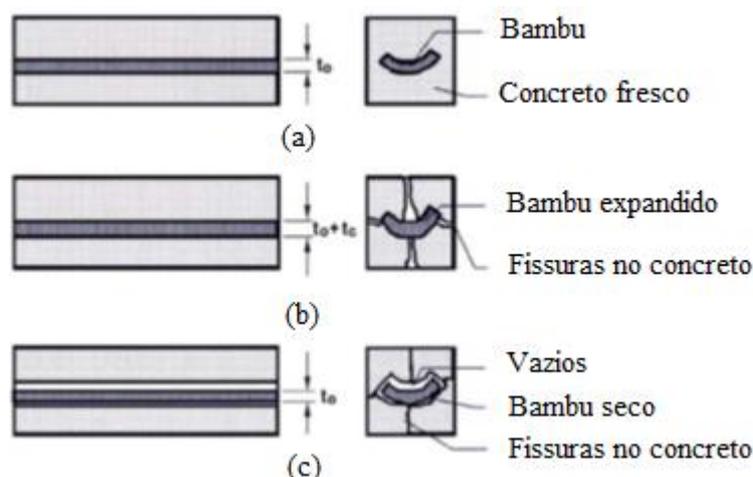


Figura 2.17 - Comportamento de talisca de bambu não tratada como reforço em concreto. (a) bambu em concreto fresco; (b) bambu durante a cura de concreto; (c) bambu após concreto curado. Fonte: Adaptado de Ghavami (2005).

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 2.5.

Tabela 2.5 - Valores médios dos parâmetros de inchamento e de contração do bambu (*Dendrocalamus giganteus*) em função do tempo de saturação e de secagem das amostras.

Direção	Inchamento (%)			
	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
Direção	Contração (%)			
	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 a largura (tangencial) e, principalmente, no sentido da espessura (radial) do bambu quando este absorve água. De forma análoga aconteceu em relação a 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 observado que as variações dimensionais foram maiores na direção radial.

Pereira e Beraldo (2008) citado Brito *et al.* (2015) argumentam que esse fenômeno observado para o bambu ocorre em função da sua ausência de raios e que as células estão dispostas no eixo longitudinal. Morita *et al.* (2010, *apud* BRITO *et al.*, 2015) relatam que a relação largura espessura destaca que a espécie possui coeficiente de anisotropia próximo de 1,0, significando que largura e espessura incham e contraem em iguais proporções oferecendo maior estabilidade dimensional quando comparado a madeira. Uma vez que as maiores contrações e inchamento das taliscas de bambu ocorrem em relação a espessura, menores empenamentos serão observados durante o processo de secagem, a maior estabilidade das lâminas será no sentido da largura, ao contrário do que ocorre com a madeira, tornando essa espécie atrativa para movelaria.

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 4 dias de imersão em água absorveram entre 51% e 55% de umidade e entre 57% e 64% depois de 7 dias de imersão.

Raj (1991, *apud* FERREIRA, 2007) também estudou a utilização de vários impermeabilizantes como mecanismo contra absorção de água do bambu e observou que o seu tratamento com material betuminoso exibiu uma absorção de água de 9%, enquanto que o bambu in natura absorveu cerca de 45%. O autor ainda recomenda que as taliscas de bambu apresentem teor de umidade entre 12% e 20% para minorar o seu inchamento e, posteriormente, sua retração, bem como a utilização de uma espessura máxima de 10 centímetros da camada de impermeabilizante.

Moraes e Melges (2013) ao estudarem o comportamento e a eficiência da impermeabilização de látex natural e de neutrol quando aplicados ao bambu *Bambusa vulgaris* ao longo de 55 horas observaram que neste intervalo o bambu apresentou cerca de 60% de absorção e concluíram que os dois tratamentos exibiram semelhança nos resultados (cerca de 12%) e, portanto, constatou-se o potencial do látex de impermeabilizar o bambu.

2.6.2 Aderência bambu - concreto

A aderência nada mais é que a propriedade que impede que haja escorregamento de uma barra em relação ao concreto que a envolve. O princípio vital para uma estrutura de concreto armado se fundamenta na aptidão do concreto em resistir a esforços de compressão, e aos esforços de tração suportados pelo mecanismo de reforço. Segundo Macgregor (1997), a eficiência deste conjunto está diretamente ligada a transferência de forças entre a matriz e a armadura do compósito. Tal transferência é resultante da aderência entre os dois materiais. Assim, quando há uma aderência satisfatória, assegura-se que os dois materiais trabalhem mutuamente de modo que o concreto continue a resistir esforços após sua fissuração.

Pinheiro e Muzardo (2003) explicam que a aderência pode ser decomposta em três parcelas: adesão, atrito e aderência mecânica, e que tais parcelas decorrem de diferentes fenômenos que intervêm na ligação dos dois materiais.

A aderência por adesão consiste na resistência à separação dos materiais decorrente das ligações físico-químicas, na interface das barras com a pasta, geradas durante as reações de pega do cimento. Para pequenos deslocamentos relativos entre a barra e a massa de concreto que a envolve, essa ligação é destruída.

A aderência por atrito se manifesta quando há tendência a deslocamento relativo entre os materiais, logo depende da rugosidade superficial da barra e da pressão transversal exercida pelo concreto sobre a barra em virtude da retração. Em barras curvas ou em regiões de apoio de vigas em pilares, aparecem acréscimos dessas pressões de contato, que favorecem a aderência por atrito.

A aderência mecânica é devida a conformação superficial devido as nervuras das barras que mobilizam forças localizadas. Segundo os autores, para uma barra imersa em uma peça de concreto a tensão média de aderência τ_b é inversamente proporcional ao comprimento de ancoragem e ao perímetro de contato ($\pi \cdot \emptyset$) entre a barra e o concreto conforme a Equação 2.1.

$$\tau_b = \frac{F}{\pi \cdot \varnothing \cdot l_b} \quad (2.1)$$

Sendo:

F = Força de arrancamento da barra (N);

\varnothing = Diâmetro da barra (mm);

l_b = Comprimento de ancoragem (mm).

Os autores ainda explicam que a tensão de aderência depende de diversos fatores, dentre os quais: rugosidade da barra, resistência do concreto, retração, adensamento e a posição da barra durante a concretagem (altura da camada de concreto sobre a barra, cujo peso favorece o adensamento, melhorando as condições de aderência e o nível da barra em relação ao fundo da forma, pois a exsudação produz porosidade no concreto, que é mais intensa nas camadas mais altas, prejudicando a aderência).

Conforme a FIB (1999), os aços de construção e o concreto exibem os seguintes comportamento tensão de aderência x deslocamento relativo: três estágios de aderência para os aços com superfícies nervuradas e os dois estágios para os aços com superfície lisa nas curvas, conforme exposto na Figura 2.18.

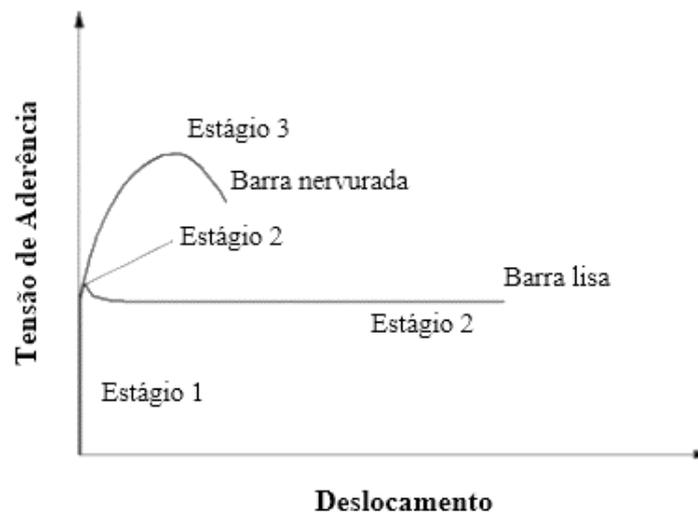


Figura 2.18 - Estágios de aderência aço-concreto.
Fonte: Adaptado de FIB (1999).

O bambu é um material que apresenta propriedades semelhantes às do aço, mas sua utilização como reforço é dificultada pela baixa aderência entre este e o concreto. Ghavami (1995) explica que o bambu absorve água da mistura, aumenta seu volume e após secar retorna

as suas dimensões iniciais, comprometendo a aderência entre os dois materiais. Conforme a seção 2.6.1. Alguns autores tentaram aplicar a impermeabilização do bambu (RAJ, 1991; GHAVAMI, 1995; GHAVAMI, 2005), no entanto, isso pode prejudicar a sua utilização como reforço em peças de concreto, pois pode comprometer a aderência entre os dois materiais devido a propriedade de aderência entre o bambu e o produto aplicado e, bem como deste com o concreto.

Ghavami (2005) analisou a aderência de concreto com taliscas de bambu tratadas com adesivo estrutural fluído à base de resina epóxi e impermeabilizante asfáltico disperso em água, com uma camada de areia na superfície, e outra com areia e arame. O autor observou que os tratamentos aumentaram a força de ligação entre o bambu e o concreto, sendo o tratamento com adesivo estrutural fluído à base de resina epóxi apresentou melhores resultados, 5,29 vezes maior que as taliscas não tratadas. O autor ainda afirma que os principais fatores que afetam a ligação entre a barra de reforço e o concreto são: propriedades adesivas da matriz de cimento, as forças de fricção de compressão que aparecem na superfície da barra de reforço devido à contração do concreto e a resistência ao cisalhamento do concreto devido à forma superficial e rugosidade da barra de reforço.

Mesquita *et al.* (2006) explicam que a maioria dos tratamentos utilizados para melhorar o mecanismo de aderência bambu-concreto, em geral consistiam na aplicação, por meio de pintura, de resinas impermeabilizantes à superfície do bambu, entretanto, a grande maioria das resinas estudadas possuía baixa resistência ao cisalhamento e funcionava como lubrificante entre o bambu e o concreto, ou eram materiais termoplásticos que se fluidificam com a elevação da temperatura, como é o caso do asfalto. Porém, a maioria dos resultados obtidos foram desfavoráveis comparados ao bambu sem tratamento e, nos casos que houveram aumento da tensão de aderência, as resinas utilizadas foram epoxídicas, cujo custo financeiro é muito elevado, inviabilizando a utilização do bambu.

Os mesmos autores em sua pesquisa estudaram a aderência entre o bambu *Dendrocalamus giganteus* e o concreto em duas etapas: a primeira investigando a influência das dimensões da seção transversal das taliscas de bambu juntamente com a resistência à compressão do concreto e a segunda avaliando o efeito da colocação de pinos nas taliscas analisando o tipo de pino (pino de aço e pino de bambu) e quantidade de pinos (um e dois). Os autores concluíram que as dimensões da seção transversal do bambu não têm influência na aderência bambu-concreto e que esta é diretamente proporcional a resistência à compressão do

concreto de maneira linear. Em geral, a tensão de aderência de cálculo entre o bambu e o concreto foi apenas 20% inferior a tensão de aderência entre o aço liso e o concreto. Além disso, a cravação de dois pinos de aço ou dois pinos de bambu nas varetas elevou a tensão de aderência em 80 e 50%, respectivamente. No entanto, observou-se que houve esmagamento da parede do furo pelo pino de aço, e esmagamento do pino de bambu e a parede do furo.

Segundo Ferreira (2002), optar pela utilização de taliscas ao invés do colmo melhora a aderência, no entanto, traz consigo a incompatibilidade química do amido contido na região interna do bambu com o concreto, pois este inibe a reação de hidratação do cimento acarretando na redução de resistência à compressão do concreto. A autora comenta que a dificuldade de aderência entre os dois materiais depende principalmente do grau de saturação do colmo depois de endurecido o concreto, da extensão e proporção da retração dos colmos, bem como sua aspereza ou saliência. Em sua pesquisa, a autora testou três tipos de tratamento buscando impermeabilização e aumento de aderência: piche e areia, verniz e areia e verniz e arame farpado.

Em ensaio de arrancamento, o bambu sem tratamento atingiu um valor médio de 0,70 MPa, tensão considera baixa. Dentre os tratamentos aplicados o que exibiu melhores resultados foi o de verniz com anéis de arame farpado, cujo valor de tensão de arrancamento de 1,25 MPa, cerca de 80% maior do que sem tratamento. É importante ressaltar que o tratamento com piche e areia apresentaram desempenho piores do que o bambu sem tratamento, exibindo um valor médio de tensão de aderência de 0,45 MPa.

Braga filho *et al.* (2010) explicam que uma das deficiências do bambu reforçando vigas de concreto armado está relacionada com os deslocamentos relativos entre os dois materiais. Assim, o objetivo de sua pesquisa era avaliar experimentalmente a possibilidade de se melhorar o trabalho conjunto bambu-concreto, por meio do cravejamento de pinos nas taliscas de bambu *Dendrocalamus giganteus* Munro usadas como reforço. Os autores usaram pinos do tipo aço ou de bambu, em número de dois, três ou quatro pinos entre nós e concluíram que o comportamento estrutural das vigas armadas com ripas de bambu cravadas com pinos de aço e bambu foi praticamente similar e que tal cravação produziu um aumento de rigidez das vigas. No entanto, o furo feito para colocação do pino reduziu localmente a seção transversal da ripa de bambu e, conseqüentemente, a resistência última das vigas.

2.6.2.1 Resistência de Aderência

Conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), a resistência de aderência de cálculo (f_{bd}) entre armadura e concreto é dada pela Equação 2.2.

$$f_{bd} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot f_{ctd} \quad (2.2)$$

Sendo:

$$\eta_1 \begin{cases} 1,0 \text{ para barras lisas;} \\ 1,4 \text{ para barras entalhadas;} \\ 2,25 \text{ para barras nervuradas.} \end{cases}$$

$$\eta_2 \begin{cases} 1,0 \text{ para situações de boa aderência;} \\ 0,7 \text{ para situações de má aderência.} \end{cases}$$

$$\eta_3 \begin{cases} 1,0 \text{ para } \varnothing \leq 32 \text{ mm;} \\ (132 - \varnothing)/100 \text{ para } \varnothing > 32 \text{ mm.} \end{cases}$$

f_{ctd} é a resistência à tração de cálculo determinado pela Equação 2.3.

$$f_{ctd} = \frac{0,21}{\gamma_c} f_{ck}^{2/3} \quad (2.3)$$

Sendo:

γ_c = Coeficiente de minoração do concreto;

f_{ck} = Resistência característica do concreto aos 28 dias.

Conforme a Model Code 2010 (CEB-FIP, 2011), a resistência de aderência de cálculo ($f_{bd,0}$) entre armadura e concreto é dada pela Equação 2.4.

$$f_{bd,0} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 (f_{ck}/25)^{0,5/\gamma_c} \quad (2.4)$$

Sendo:

$$\eta_1 \begin{cases} 1,75 \text{ para barras nervuradas;} \\ 1,4 \text{ para barras nervuras com epóxi;} \\ 0,9 \text{ para barras lisas.} \end{cases}$$

$$\begin{array}{l}
 \eta_2 \left\{ \begin{array}{l}
 - \text{ para todas a barras com inclinação de } 45^\circ \text{ a } 90^\circ; \\
 1,0 \\
 - \text{ para todas as barras com inclinação menor que } 45^\circ; \\
 0,7 \text{ para todos os outros casos com barra nervurada;} \\
 0,5 \text{ para todos os outros casos com barra lisa.}
 \end{array} \right. \\
 \eta_3 \left\{ \begin{array}{l}
 1,0 \text{ para } \varnothing \leq 25 \text{ mm;} \\
 (25/\varnothing)0,3 \text{ para } \varnothing > 25 \text{ mm.}
 \end{array} \right. \\
 \eta_4 \left\{ \begin{array}{l}
 1,0 \text{ para } f_{yk} = 500 \text{ MPa;} \\
 1,2 \text{ para } f_{yk} = 400 \text{ MPa;} \\
 0,85 \text{ para } f_{yk} = 600 \text{ MPa;} \\
 0,75 \text{ para } f_{yk} = 700 \text{ MPa;} \\
 0,68 \text{ para } f_{yk} = 800 \text{ MPa.}
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

2.7 RECOMENDAÇÕES PARA A UTILIZAÇÃO DE BAMBU

Em virtude de sua elevada resistência à tração, Ghavami (1995) recomendou o uso do bambu como um material alternativo, substituindo o aço, como reforço em peças de concreto. Para o pesquisador, as melhores espécies para esta finalidade são *Bambusa vulgaris* e *Dendrocalamus giganteus*, respectivamente, com 135 MPa e 170 MPa de resistência à tração.

Para investigar o comportamento da fratura e as propriedades mecânicas dos membros de concreto armado de bambu, Terai e Minami (2011) confeccionaram seis vigas e 16 espécimes de coluna de concreto treliçadas com bambu e aço para serem ensaiados à compressão uniaxial e a flexão de 3 pontos e concluíram que os padrões de fissuras das peças de bambu são semelhantes as amostras de referência recomendando a validade do bambu para a barra longitudinal.

Segundo Ferrão (1992), a resistência à tração do bambu é fornecida pelas fibras, logo o autor sugere o uso de taliscas cortadas longitudinalmente de modo que a camada mais externa seja melhor aproveitada. O autor ainda explica que peças de concreto armadas com taliscas de bambu mostraram melhor capacidade de carga em relação aquelas armadas com colmos roliços.

De acordo Raj (1991) para o melhor desempenho do bambu deve-se utilizar somente bambus maduros e secos; taxa de saturação entre 12% e 20% para minimizar o inchamento e a retração do bambu e a utilização de coeficientes de segurança no dimensionamento.

Segundo McCLURE (1966), uma peça de concreto armada com bambu consegue resistir a uma carga 5 vezes maior do que a aplicada em uma viga se esta estiver desprovida de reforço longitudinal.

Ferreira (2007) recomenda que se devam utilizar colmos de bambu com idade média de 3 a 6 anos, idade em que o bambu apresenta maturação suficiente que garanta boas propriedades para fins estruturais. Além disso, é imprescindível realizar a caracterização das espécies de bambu que será empregada, pois se trata de um material heterogêneo tanto para espécies diferentes quanto para a mesma espécie ocasionando variabilidade nas suas propriedades.

Em relação à durabilidade do bambu, de acordo com Janssen (2000), é bastante reduzida logo após a colheita e que a principal solução é o tratamento deste vegetal. O autor ainda explica que se o bambu não passar por nenhum tratamento pode durar de 1 a 3 anos se este estiver em contato com o solo e descoberto, de 4 a 6 anos sem contato com solo e coberto, de 10 a 15 anos caso esteja em condições bastante favoráveis. Portanto, é de suma importância o emprego de tratamento adequado que garantam a vida útil deste material para que se possa aplica-lo na construção, principalmente quando se refere a um elemento estrutural.

Ghavami (2005) relata que o bambu, assim como a madeira é vulnerável à degradação ambiental e ataques por insetos. Além disso, sua durabilidade varia com o tipo de espécie, idade, condição de conservação, tratamento e cura. A cura deve ser iniciada quando o bambu está sendo cortado no bambuzal. Existe uma forte relação entre os ataques de insetos e os níveis de amido e umidade do caule de bambu.

O mesmo autor ainda explica que o processo de secagem do bambu é fundamental para a sua conservação por várias razões. Bambus com baixa umidade são menos propensos a ataques de mofo, especialmente quando o teor de umidade é inferior a 15%, e as propriedades físicas e mecânicas do bambu aumentam com a diminuição desse teor. Bambus secos facilitam a penetração de conservantes e reduzem os custos de transporte. O bambu pode ser seco ao ar, na estufa, no forno ou no fogo. As propriedades do bambu quando tratado com conservantes dependem, principalmente, da composição química do material utilizado, que não deve ter qualquer efeito sobre a fibra.

Em relação a sua utilização em compósitos cimentícios, como o concreto, este apresenta um caráter tipicamente alcalino, ou seja, pH em torno de 13, sendo considerado alto para o bambu, pois com o decorrer do tempo essa alcalinidade tende a destruir a camada de fibras onde

se concentra a celulose deste vegetal, especificamente a lignina, principal componente que confere as propriedades de resistência do bambu.

Para melhorar o desempenho de durabilidade de fibras vegetais em compósitos à base de cimento, várias abordagens têm sido estudadas, como: impregnação da fibra com agentes de bloqueio e agentes repelentes de água ou de vedação do sistema de poros da matriz, seja de modo isolado ou em conjunto; redução da alcalinidade da matriz; combinações de impregnação de fibra e matriz modificada (GRAM, 1983 e CANOVAS, 1992).

John e Agopyan (1993) listam algumas possíveis soluções para controlar a degradação das fibras vegetais por meio da alcalinidade do cimento, dentre as quais: cimentos com baixa alcalinidade; redução da alcalinidade por carbonatação acelerada da matriz; proteção das fibras com polímeros; hidro-repelentes (resinas, óleos e asfalto) ou agentes bloqueadores da reação de decomposição da fibra, como silicatos e sulfatos de sódio e magnésio; impermeabilização da matriz. No entanto, a maioria destes tratamentos foram testados com intuito de protegê-lo, mas que acabaram prejudicando sua aderência com o concreto.

No entanto, em sua pesquisa, Rosa *et al.* (2006) realizaram ensaios de imersão de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* em solução de hidróxido de cálcio durante um período de 60 ciclos e constatou que o bambu não apresentou perda de resistência e nem redução no módulo de elasticidade.

Savastano Jr. (2000) explica que a presença de substâncias de caráter ácido liberadas por fibras vegetais em solução aquosa podem retardar a pega do cimento e que o mesmo efeito ocorre pela presença de açúcares na estrutura vegetal que são ligeiramente liberadas em solução aquosa, como é o caso da gramínea estudada nesta pesquisa que apresenta amido em suas células parenquimáticas. O autor ainda afirma que em compósitos a base de cimento, a maior aderência fibra-matriz é alcançada por meio do melhor desempenho da zona de transição, fazendo com que as duas fases trabalhem de forma unificada. A melhor adesão é adquirida pela redução da porosidade e pela menor concentração de portlandita, que nada mais é que cristais de hidróxido de cálcio ao redor das fibras. O autor ainda explica que para viabilizar o emprego de fibras vegetais como reforço é interessante utilizar aglomerantes alternativos, como por exemplo à base de escória granulada de alto forno e de cinza de casca de arroz, pois apresentam alcalinidade menor do que o a do cimento Portland comum.

Ghavami (2005) em sua pesquisa conferiu a superfície de dois pilares de concreto, sendo um, uma peça do metrô da cidade do Rio de Janeiro reforçado com aço concebido há 10 anos e

outro com armadura de bambu concebido para efeito de pesquisa no campus da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro o qual ficou sob ação de intempéries durante um período de 15 anos. Fazendo-se analogia dos dois pilares, o pesquisador observou que as duas armaduras estavam expostas e que a de bambu apresentou melhor aparência, logo, maior durabilidade em relação a armadura de aço.

2.8 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DO BAMBU NO CONCRETO

A utilização de bambu como material de construção se apresenta como alternativa em meio a comunidade científica. Uma das principais características do bambu se deve ao seu ciclo de crescimento rápido. Como visto anteriormente esse material possui elevada resistência mecânica estrutural cerca de dois anos e meio de ter eclodido do solo, não havendo assim, neste aspecto, nenhum candidato a altura no reino vegetal. Além disso, tal resistência é considerada alta quando comparada com sua relativa baixa densidade, pois apresenta grande desempenho quando este é submetido ao esforço de tração. Outra vantagem é quanto ao seu cultivo, pois intempéries não prejudicam o seu crescimento e se desenvolve na maioria dos tipos de solo.

No entanto, apesar dessas vantagens, o bambu apresenta desvantagens que restringem sua utilização. Colla *et al.* (2011) apresentam duas grandes desvantagens para este material. A primeira refere-se a baixa durabilidade natural da maioria das espécies, em razão da presença de amido em suas células parenquimáticas necessitando de tratamento preservativo contra ataques de fungos e insetos. A outra, não menos importante, é a tendência apresentada pelo bambu de apresentar variações dimensionais, quando exposto a mudanças ambientais. Além disso, tem-se sua elevada absorção de água, a menor aderência do bambu com o concreto em comparação ao aço, variabilidade de propriedades e por se tratar de um material orgânico apresenta um certo descrédito para a maioria dos técnicos da engenharia. Em termos práticos, no Brasil não se detém de ferramentas desenvolvidas para o manuseio de bambu o que torna a preparação de taliscas relativamente complexa.

3. METODOLOGIA

A pesquisa analisou a interação mecânica e microestrutural entre o bambu e o concreto, aos 28 dias, em formato de taliscas de seção retangular (20 mm x 10 mm) extraídas do colmo de bambus da espécie *Dendrocalamus giganteus*, bem como, dois tipos de envolvimento de arame recozido na superfície do bambu como mecanismo de reforço de aderência: espiral simples e espiral dupla. Desta forma, o presente capítulo é dedicado a apresentação e abordagem experimental do estudo, exibindo os ensaios de caracterização dos materiais, bem como, os ensaios para analisar a interação bambu - concreto, conforme esquematizado na Figura 3.1.

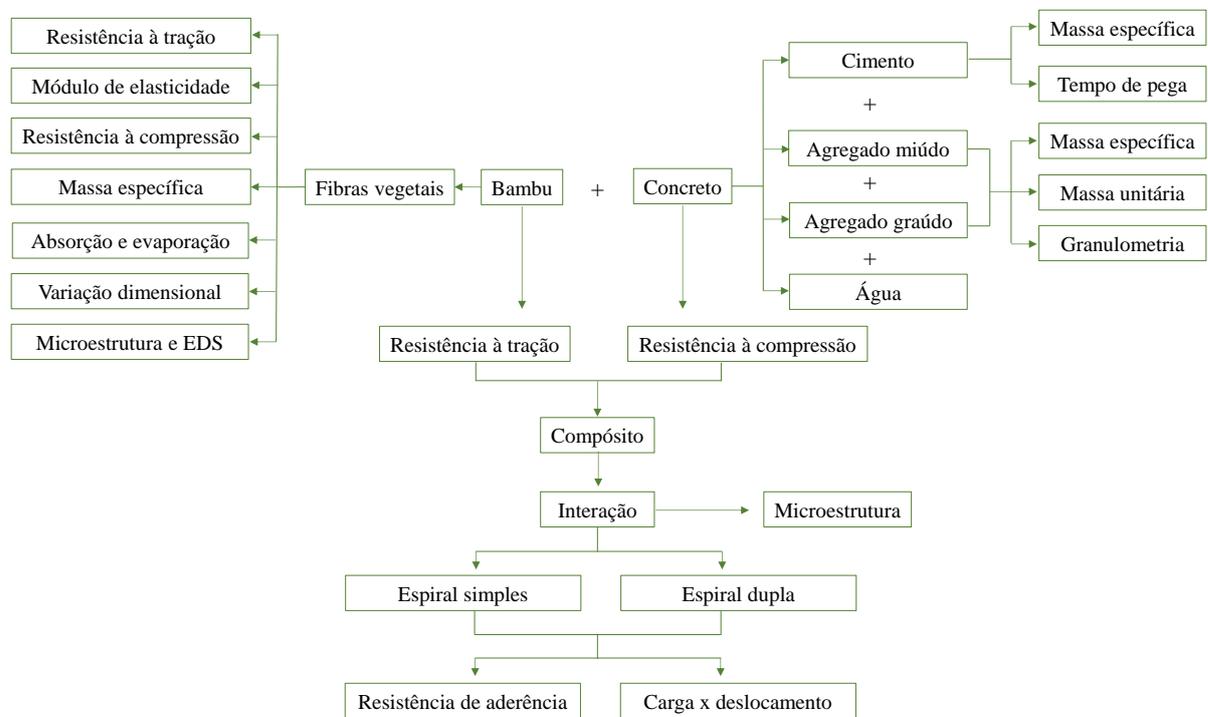


Figura 3.1 - Estrutura do programa experimental.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Cimento

Nesta pesquisa utilizou-se o cimento tipo CP-IV (Cimento Portland Pozolânico), especificado pela NBR 5736 (ABNT, 1999). Optou-se por esse cimento devido ao menor teor de álcalis em sua composição, comparado aos outros disponíveis no mercado, pois estes elementos tendem a atacar a estrutura do bambu.

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).

3.1.2 Agregado miúdo

Para esta pesquisa foi utilizada areia de origem quartzosa típica da região, proveniente dos leitos dos rios próximos à cidade de Belém. 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 e índice de vazios 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).

3.1.3 Agregado graúdo

Para este trabalho foi adotado o seixo rolado, agregado graúdo de origem quartzosa e de maior abundância na região, proveniente de leitos dos rios. 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).

3.1.4 Água

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 própria Cidade Universitária Professor José da Silveira Netto, Campus da UFPA que, atualmente, produz sua água compreendendo desde a captação, tratamento, armazenamento até a distribuição, com captação por meio de aquífero subterrâneo e, em pequena quantidade, também compra da Concessionária Local. Portanto, o abastecimento hídrico da Universidade oferece água válida para a produção de concretos.

3.1.5 Aditivo

O aditivo empregado nas misturas experimentais é um superplastificante livre de cloretos. Sua composição básica provém de uma cadeia de éter policarboxílico modificado que

atua como dispersante do material cimentício sem alterar o tempo de pega. A densidade deste material varia entre 1,067 e 1,107 g/cm³ com pH de $6,0 \pm 1,0$ (dados do fabricante). Este aditivo atende os requisitos (tipo P e SP) da NBR 11768 (ABNT, 2011).

3.1.6 Arame recozido

O arame recozido utilizado nesta pesquisa é oriundo de aço com baixo teor de carbono com elevado grau de maleabilidade e produzido de acordo com a NBR 5589 (ABNT, 2012). Este material apresenta diâmetro nominal de 1,25 mm com resistência à tração de até 40 kgf/mm², conforme o fabricante.

3.1.7 Bambu

O estudo utilizou taliscas de bambu com seção retangular cortadas do colmo da espécie *Dendrocalamus giganteus* extraídas do campus da Embrapa Amazônia Oriental (Belém), nas proximidades do Laboratório de Botânica (Figura 3.2). Tais colmos foram armazenados em sombra na posição vertical e passaram por processo de secagem natural durante cerca de 1 ano. É importante ressaltar que esta coleta foi realizada retirando-se a base até a região intermediária do vegetal, ou seja, até altura de aproximadamente 12 metros, logo esta pesquisa adotará a região basal e intermediária dos colmos para efeito de estudo. Por se tratar de um material não convencional, o seu processo de caracterização foi realizada de maneira adaptada.



Figura 3.2 - Touceira de *Dendrocalamus giganteus*.

É de fundamental importância realizar a caracterização deste material a fim de conhecer suas propriedades, além de possibilitar um maior entendimento do seu comportamento quando

imerso no concreto. Nesta pesquisa foram realizados os seguintes ensaios: microscopia eletrônica de varredura, massa específica, absorção de água e variação dimensional; resistência à tração e compressão paralelas as fibras; módulo de elasticidade. As amostras utilizadas foram extraídas dos colmos de bambu com auxílio de serra mármore (corte transversal as fibras); facão e martelo (corte longitudinal as fibras).

3.1.7.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foram realizados ensaios de MEV com amostras do bambu seco na direção longitudinal (resistência mecânica) de Microscopia Eletrônica no Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Pará (PPGEF-UFPa).

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. As condições de operação para o imageamento foram: corrente de feixe de elétrons de 90 μA , voltagem de aceleração constante de 5 kv e distância de trabalho de 13 mm.

3.1.7.2 Massa específica

Além de ser um material de boas características mecânicas, o bambu apresenta massa específica relativamente baixa quando comparado ao aço. Para esta pesquisa foi determinada a massa específica do bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*, para amostras com nó e sem nó, segundo a norma INBAR ISO/DIS 22157 (Figura 3.3). As amostras desse material (n=4) com dimensões de 30 x 10 x 120 mm³ passaram por processo de secagem em estufa a 100°C por 24 horas para atingir massa constante e seus volumes foram obtidos conforme a Equação 3.1. A massa específica foi calculada a partir da razão entre a massa do bambu seca e a massa de volume deslocado da coluna de água.

$$V = M_B - M_{B+G} + M_G \quad (3.1)$$

Sendo:

V = Volume do corpo de prova de bambu (cm³);

M_B = Massa do corpo de prova de bambu seco (g);

M_{B+G} = Massa do conjunto gaiola/corpo de prova de bambu (g);

M_G = Massa da gaiola (g).

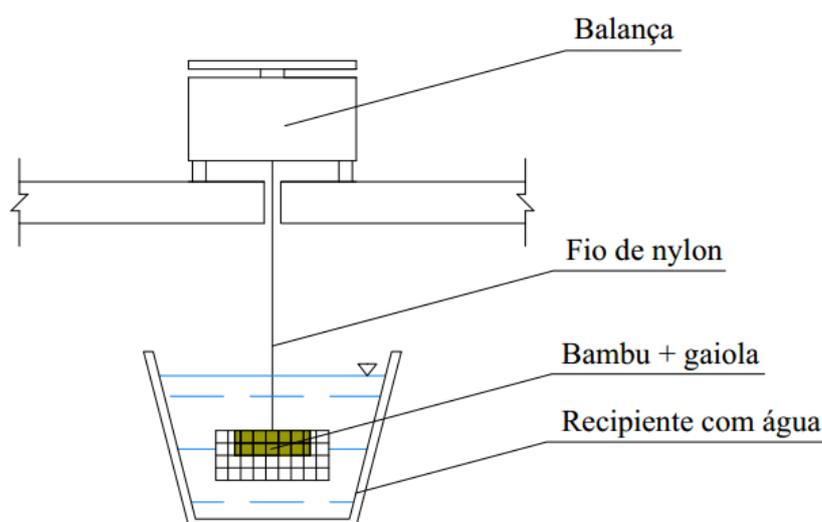


Figura 3.3 - Sistema de ensaio de massa específica.

3.1.7.3 Absorção de água e variação dimensional

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 esta análise, foi adaptada a metodologia da NBR 9778 (ABNT, 2009) com corpos de prova ($n=5$) com 120 mm de comprimento, 35 mm de largura e 10 mm de espessura com variação dimensional medida por meio de paquímetro. Além disso, foi observado o processo de secagem natural para nortear o comportamento da contração das amostras analisadas.

3.1.7.4 Resistência à tração paralela as fibras

Um das características mais marcantes do bambu é sua capacidade de resistência à tração. Em geral, tal resistência varia de acordo com alguns fatores, tais como: espécie, idade, umidade, condições de crescimento, quantidade e disposição dos nós. Em termos de capacidade de carga, é mais vantajoso cortar o colmo do bambu em taliscas de seção retangular na direção longitudinal do que utilizar colmo inteiro. Entretanto, a capacidade de carga de uma talisca de bambu depende de sua largura, ou seja, valores maiores que 20 mm podem atribuir fissuras horizontais, pois as fibras são todas ordenadas. Neste ensaio pode-se determinar a tensão de ruptura por meio da razão entre a carga de ruptura e a área da seção transversal, bem como a curva tensão deformação do material de onde pode se extrair o módulo de elasticidade, sendo que a deformação foi medida por meio de extensômetro analógico.

Este ensaio foi adaptado conforme sugere a NBR ISO 6892 (ABNT, 2015). As amostras utilizadas apresentaram largura de 20 ± 3 mm, com um alongamento nas extremidades para

direcionar a provável ruptura durante o ensaio. O comprimento das taliscas foi de 500 mm e a espessura foi de 10 ± 2 mm, respeitando a natureza do colmo (Figura 3.4). Foram ensaiadas nove amostras com nó e nove sem nó.

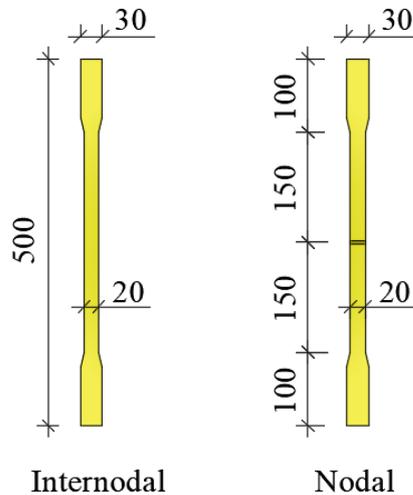


Figura 3.4 - Corpos de prova de bambu para ensaio de tração.

3.1.7.5 Resistência à compressão paralela as fibras

Outra propriedade do bambu *Dendrocalamus giganteus* coletado estudada foi a sua resistência à compressão. A determinação desta tensão de ruptura foi adaptada conforme sugere a NBR 5739 (ABNT, 2007). Neste caso, a norma sugere que haja uma relação de altura/diâmetro de valor igual a 2. Os colmos de bambu são ocos e seu diâmetro externo tende a diminuir da base para o topo, sendo que para esta espécie o diâmetro médio dos colmos é de 100 mm. Portanto, foi adotada uma altura dos corpos de prova dos colmos de 200 mm (Figura 3.5). Ao todo foram ensaiadas oito amostras para resistência à compressão com a presença e ausência de nó, respectivamente.

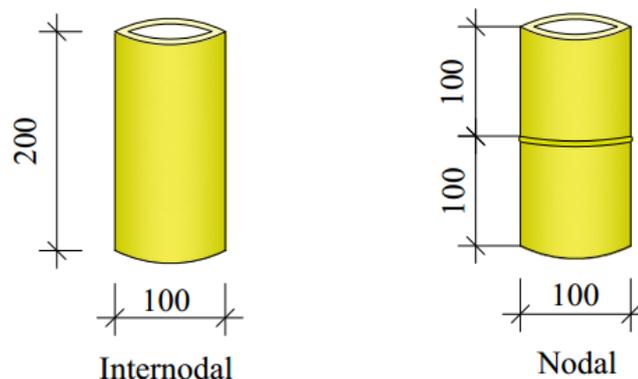


Figura 3.5 - Corpos de prova de bambu para ensaio de compressão.

Para determinação da área de cálculo deste material foram extraídas 3 medidas de circunferência ao longo do eixo longitudinal por meio de fita métrica para determinar o diâmetro médio do colmo (Equação 3.2) e, assim, calcular a área média total da seção transversal (Equação 3.3). Para calcular a área oca (Equação 3.4), foram realizadas 4 medidas de espessura por meio de paquímetro. A área efetiva do bambu foi determinada pela diferença entre a área total e a área oca, conforme a Equação 3.5.

$$D = \frac{C}{\pi} \quad (3.2)$$

$$A_{\text{externa}} = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.3)$$

$$A_{\text{interna}} = \frac{\pi(D - 2e)^2}{4} \quad (3.4)$$

$$A_{\text{efetiva}} = A_{\text{externa}} - A_{\text{interna}} \quad (3.5)$$

Sendo:

C = Comprimento da circunferência (mm);

D = Diâmetro externo médio da circunferência (mm);

e = Espessura média da área efetiva (mm);

A_{maior} = Área externa do corpo de prova de bambu (mm²);

A_{menor} = Área interna correspondente a região oca do bambu (mm²);

A_{efetiva} = Área de cálculo (mm²).

3.2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.2.1 Concreto

O concreto empregado nesta pesquisa foi obtido por meio do método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e 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 100 ± 20 mm (Figura 3.6a). Os concretos foram confeccionados em betoneira de eixo inclinado com a seguinte ordem de mistura: agregado graúdo, cerca de 25% da água, cimento, areia, o restante da água a medida que foi se adicionado finos a mistura, por último

adicionou-se o aditivo para melhorar a trabalhabilidade e atingir o abatimento estabelecido. A Tabela 3.1 resume as propriedades concreto produzido.

Tabela 3.1 - Propriedades do concreto.

α	Traço unitário	a/c	Aditivo	Abatimento tronco de cone	Consumo de cimento	f_{ck}
50%	1 : 2,5 : 3,5	0,56	1,40 %	10 ± 20 mm	313,86 Kg/m ³	28 MPa

Legenda: α : teor de argamassa; a/c: relação água/cimento; f_{ck} : resistência à compressão característica do concreto.

A moldagem dos corpos de prova seguiu as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2016) e o controle tecnológico foi realizado com amostras ensaiadas sob compressão axial aos 28 dias conforme NBR 5739 (ABNT, 2007). Para confecção dos corpos de prova adotou-se um sistema, conforme mostrado na Figura 3.6b, com o objetivo de centralizar o bambu no corpo de prova de concreto e, principalmente, para nivelar a superfície e assim, torna-la plana para não gerar tensões adicionais no ensaio de arrancamento.



(a)

(b)

Figura 3.6 - Produção concreto.

(a) Abatimento tronco de cone (b) Sistema de moldagem.

A pesquisa adotou um concreto com f_{ck} de 28 MPa. O consumo de cimento por metro cúbico foi calculado segundo a Equação 3.6.

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{b}{\rho_b} + a/c} \quad (3.6)$$

Sendo:

a = Quantidade de areia no traço em massa para 1kg de cimento;

b = Quantidade de brita no traço em massa para 1Kg de cimento;

ρ_c = Massa específica do cimento (g/cm^3);

ρ_a = Massa específica da areia (g/cm^3);

ρ_b = Massa específica da brita (g/cm^3);

a/c = Relação água/cimento.

3.2.2 Interação bambu - concreto

3.2.2.1 Arrancamento bambu - concreto

A pesquisa avaliou a tensão de aderência entre taliscas de bambu e o concreto, analisando a influência do nó na interação dos materiais. Além disso, foi estudado o emprego de arame recozido envolvido na superfície das taliscas de bambu. Foram empregados dois tipos de envolvimento: espiral simples e espiral dupla, conforme esquematizado nas Figuras 3.7 e 3.8. Tais configurações foram baseadas nas disposições das nervuras utilizadas no aço.

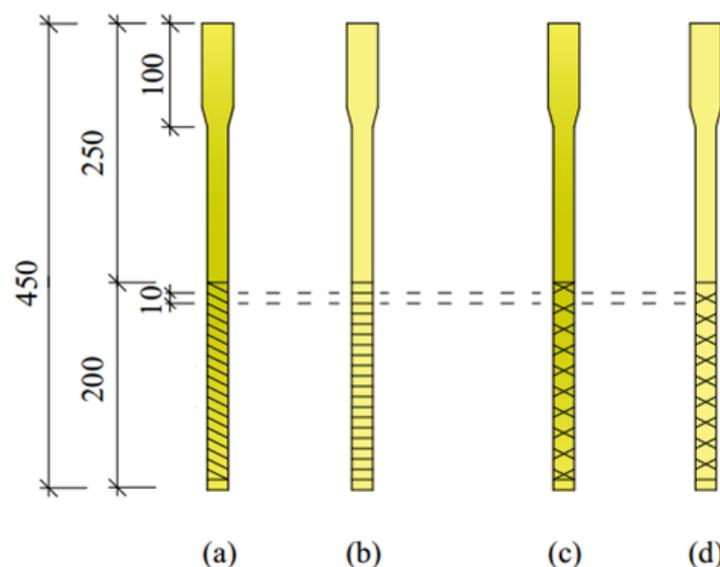


Figura 3.7 - Detalhamento do bambu sem nó para o ensaio de arrancamento.
 (a) Espiral simples (casca); (b) Espiral simples (fibras); (c) Espiral dupla (casca); (d) Espiral dupla (fibras).

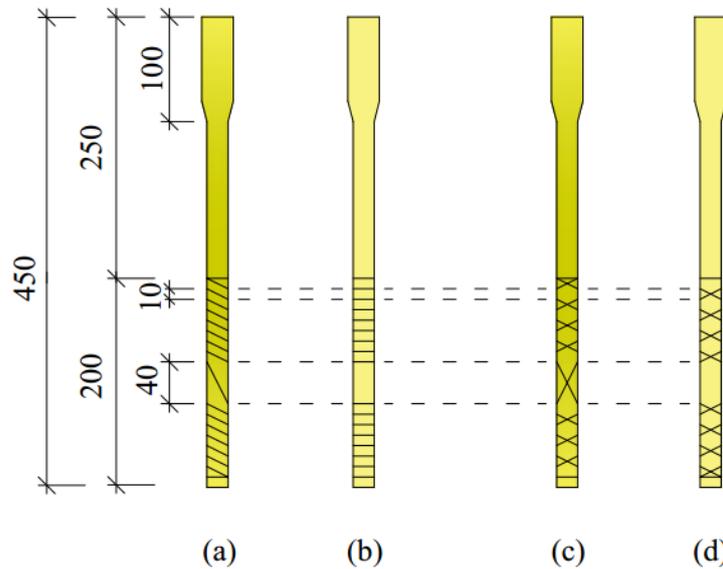


Figura 3.8 - Detalhamento do bambu com nó para o ensaio de arrancamento.
 (a) Espiral simples (casca); (b) Espiral simples (fibras); (c) Espiral dupla (casca); (d) Espiral dupla (fibras).

Para este ensaio, foram confeccionadas 4 amostras para cada família, totalizando 24 amostras, conforme a Tabela 3.2, sendo que para cada família foram extraídos 5 corpos de prova de concreto para o ensaio de resistência à compressão axial.

Tabela 3.2 - Programa experimental ensaio de arrancamento.

Região	Tipo	Quantidade de amostras	Nomenclatura
Internodal	Referência	4	ASN
	Espiral simples	4	ASNES
	Espiral dupla	4	ASNED
Nodal	Referência	4	ACN
	Espiral simples	4	ACNES
	Espiral dupla	4	ACNED

O ensaio foi realizado em corpos de prova de 150 mm x 300 mm com taliscas de comprimento de 450 mm com 200 mm de embutimento. Utilizou-se uma prensa hidráulica universal modelo WAW - 1000C com velocidade de ensaio de 2 mm/minuto. Para aplicação de carga, adaptou-se uma gaiola de reação em aço, conforme sugere Mesquita *et al.* (2006). O

detalhamento dos corpos de prova e o sistema deste ensaio pode ser visualizado nas Figura 3.9 e 3.10, respectivamente.

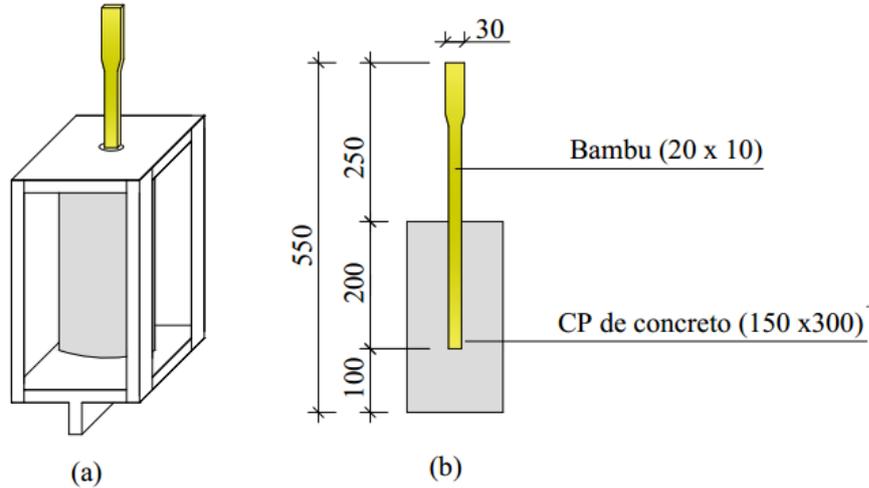


Figura 3.9 - Gaiola de reação para o ensaio de aderência.
 (a) Vista 3D do conjunto; (b) Seção transversal do corpo de prova.
 Fonte: Adaptado Mesquita *et al.* (2006).

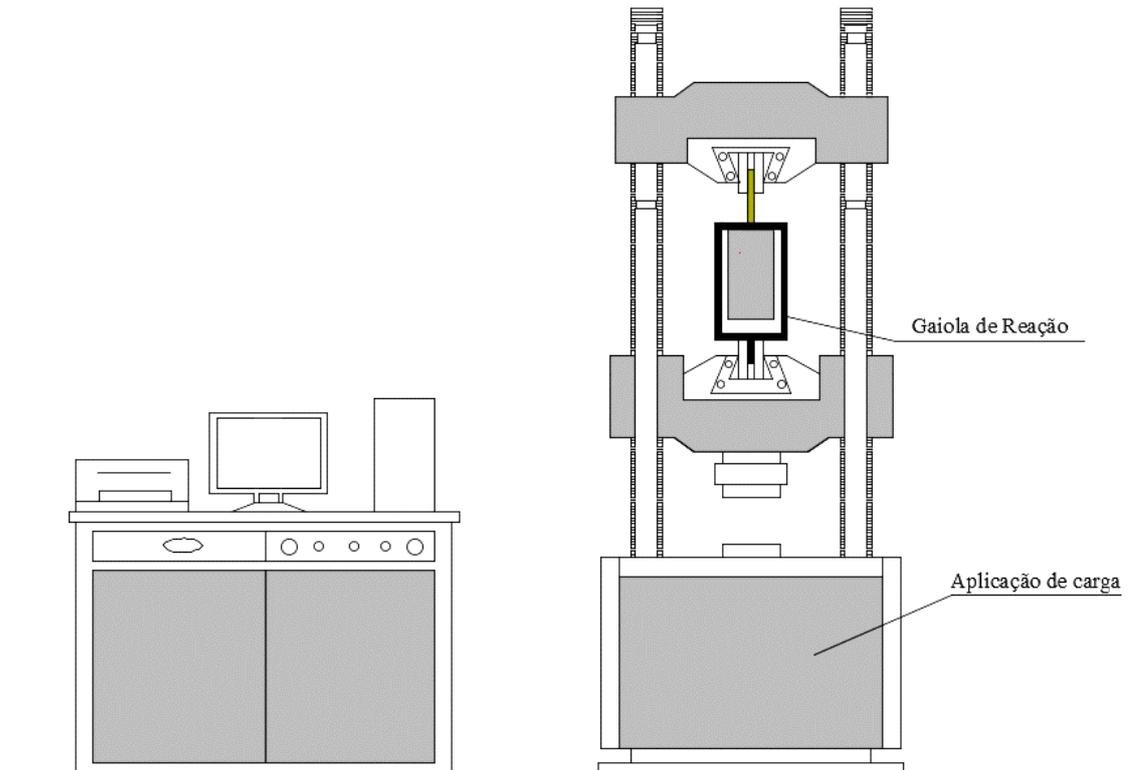


Figura 3.10 - Sistema de ensaio de aderência.

A partir da carga última de arrancamento obtida em cada uma das amostras foi determinada a tensão de aderência média do bambu com o concreto, para cada família, conforme a Equação 2.1. Os resultados foram comparados com os valores de cálculo de

resistência de aderência do aço liso segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014) (Equação 2.2) e a Model Code 2010 (CEB-FIP, 2011) (Equação 2.4).

3.2.2.2 Microscopia eletrônica de varredura bambu - concreto

Concomitantemente a produção dos corpos de prova para o ensaio de arrancamento foram moldados espécimes que não foram ensaiadas com o objetivo de avaliar aos 28 dias a interface entre o bambu concreto que foram comparados a interface com aço. Assim sendo, foram retiradas amostras isoladas da superfície do concreto em contato com o bambu, com o aço e amostras do bambu/concreto analisadas por meio de Microscopia Eletrônica de Varredura no Laboratório do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Pará (PPGEF-UFPa).

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. As condições de operação para o imageamento foram: corrente de feixe de elétrons de 90 μA , voltagem de aceleração constante de 10 kv e distância de trabalho de 15 mm.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados obtidos (Apêndice A) foram analisados quanto a sua normalidade e sua homocedasticidade por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, pois são testes recomendados para número de amostras inferior a 20. Atestando a normalidade e a homocedastidade, estes foram analisados estatisticamente de acordo com os testes de análise de variância de Tukey e T – Student, sendo considerado diferenças significativas quando $p < 0,05$ (Apêndice B).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos nos ensaios realizados e indicados na metodologia desta dissertação, conforme estabelecido no capítulo 3.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Cimento

A Tabela 4.1 resume os resultados da determinação da massa específica do aglomerante e sua curva de tempo de pega esta esquematizada na Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados de massa específica do cimento.

Amostra	Massa (g)	V_i (cm ³)	V_f (cm ³)	ρ (g/cm ³)	$\rho_m - Sd$	Coef. de variação
Nº 1	59,60	0,4	19,5	3,12	3,10 ± 0,03	0,89%
Nº 2	64,40	0,6	21,5	3,08		

Legenda: V_i : volume inicial; V_f : volume final; ρ : massa específica; ρ : massa específica média; Sd: desvio padrão.

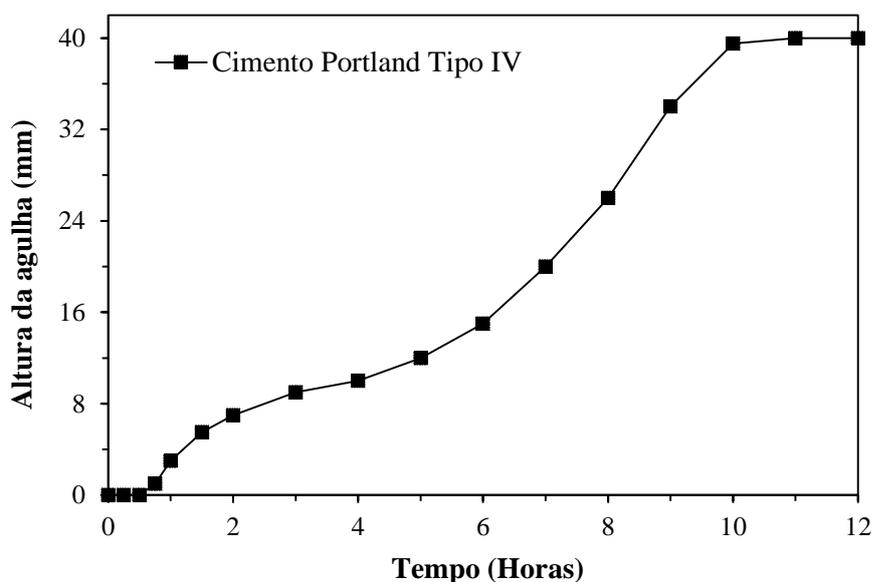


Figura 4.1 - Tempo de pega do Cimento Portland Tipo IV.

A Tabela 4.1 mostra que o cimento utilizado nesta pesquisa possui massa específica de $3,10 \pm 0,03$ g/cm³. Pode-se observar que o início de pega e fim de pega foi em torno de 1,5 e

10 horas, respectivamente, conforme a Figura 4.1. Portanto, este aglomerante encontra-se dentro dos padrões normativos.

4.1.2 Agregado miúdo

A Tabela 4.2 resume os resultados da caracterização do agregado miúdo e sua distribuição granulométrica esta esquematizada na Figura 4.2.

Tabela 4.2 - Caracterização do agregado miúdo

Características físicas		Método de ensaio
Massa específica	2,57 g/cm ³	NBR NM 52 (ABNT, 2009)
Massa unitária	1,61 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Índice de vazios	37,35%	
Módulo de finura	1,95	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

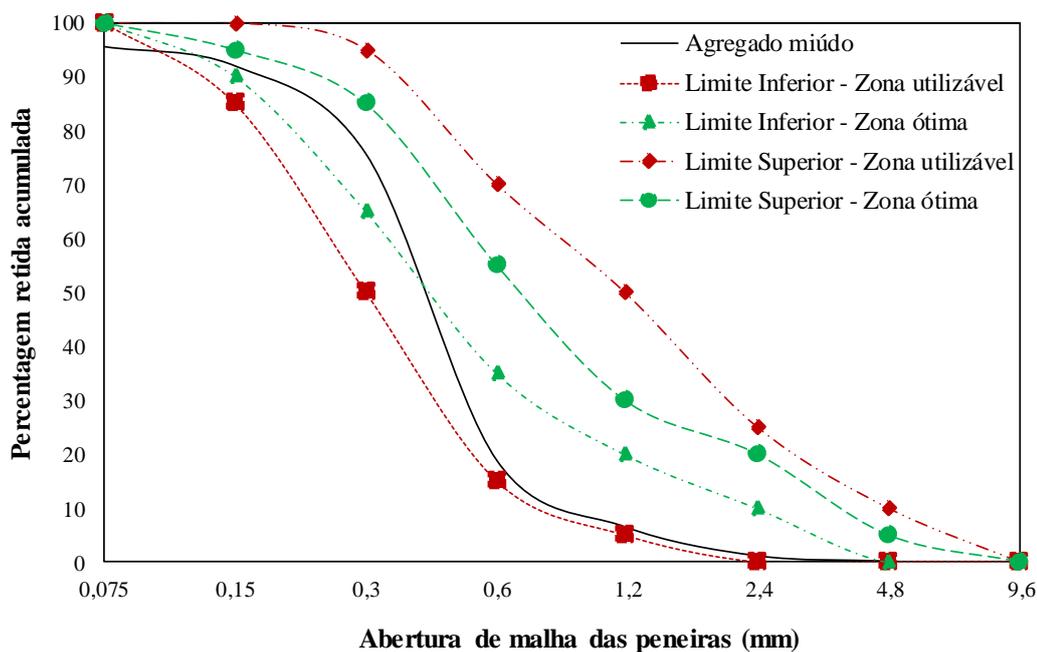


Figura 4.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

Os resultados mostraram que o agregado miúdo utilizado neste estudo se enquadra na zona utilizável inferior, ou seja, um material bastante fino, típico da região amazônica. Para efeito de dosagem, na qual se estabelece 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 um material mais fino produz concreto com microestrutura mais densa e compacta melhorando as propriedades do compósito final.

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.

4.1.3 Agregado graúdo

A Tabela 4.3 resume os resultados da caracterização do agregado graúdo e sua distribuição granulométrica está esquematizada na Figura 4.3.

Tabela 4.3 - Caracterização do agregado graúdo

Características físicas		Método de ensaio
Massa específica	2,63 g/cm ³	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Massa unitária	1,50 g/cm ³	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Índice de vazios	43,0 %	
Diâmetro máximo	19 mm	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

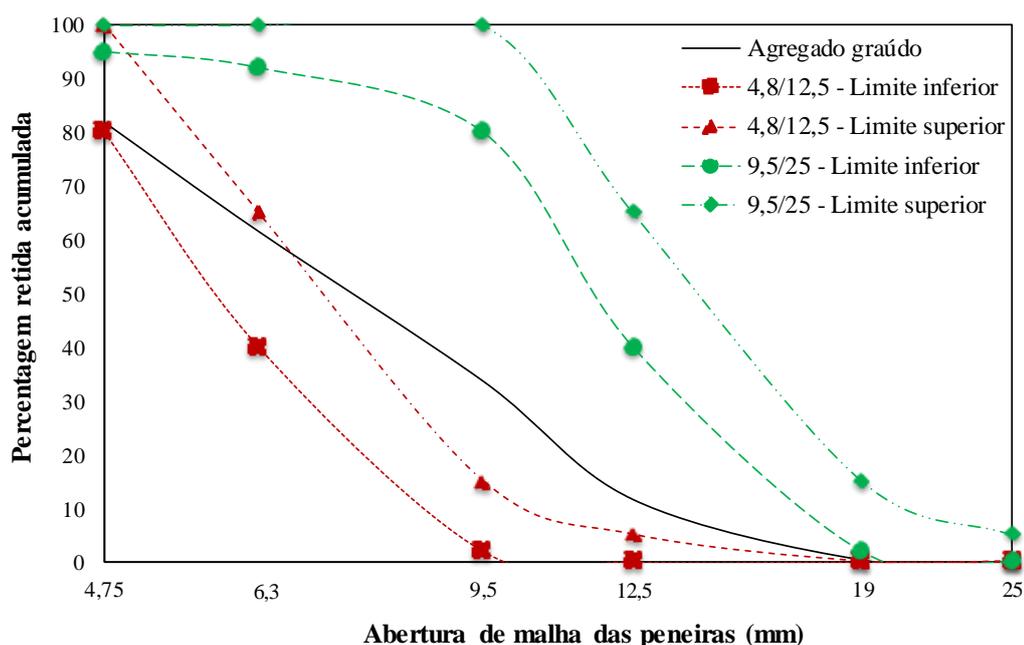


Figura 4.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo.

Os resultados mostraram que o agregado graúdo utilizado neste estudo se enquadra no limite superior da peneiras 4,8/12,5, ou seja, seixo considerado fino. Segundo Mehta e Monteiro (2014) os agregados comumente usados para concreto de peso normal apresentam massa específica entre 2600 e 2700 kg/m³ e massa unitária entre 1300 e 1750 kg/m³. Portanto, os agregados utilizados nesta pesquisa atendem as especificações encontradas na literatura.

4.1.4 Bambu

4.1.4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As imagens obtidas via MEV, observadas na Figura 4.4 e 4.5, apresentam a microestrutura do bambu estudado nesta pesquisa, as quais possibilitaram a visualização dos principais componentes deste material.

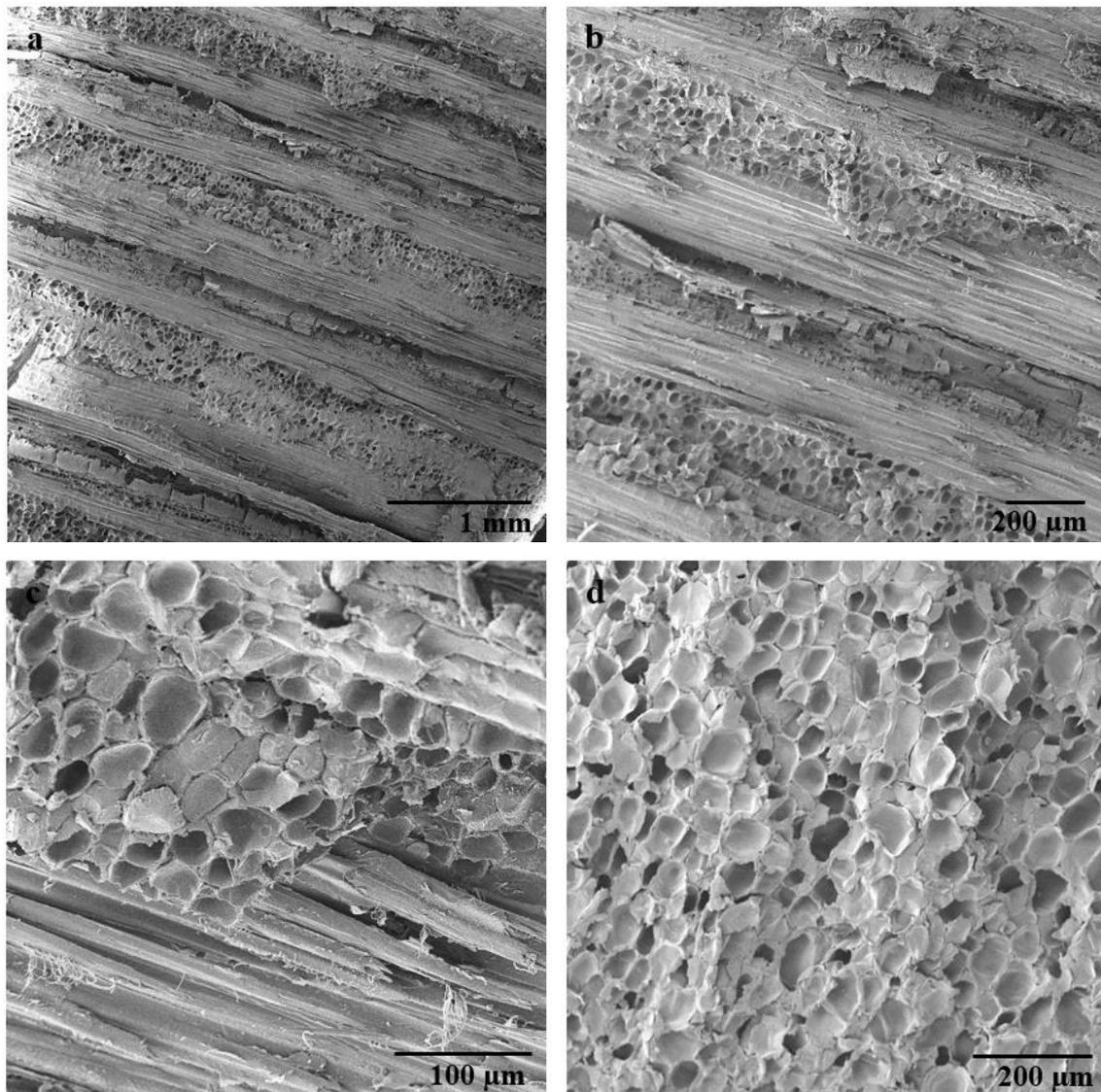


Figura 4.4 - Micrografia eletrônica de varredura do bambu na direção longitudinal.

Nas Figuras 4.4a e 4.4b é possível observar toda a estrutura em formatos de linhas que correspondem aos tecidos fibrosos constituídos por feixes de fibras ricos em celulose (esclerênquima) cercado de células parenquimáticas (formas arredondadas), que por sua vez são ricas em lignina, fornecendo ao bambu as suas propriedades mecânicas. Já a Figura 4.4c contempla a interface entre o feixe de fibras e a matriz parenquimática enquanto que a Figura 4.4d apresenta, de forma ampliada, a estrutura desta matriz.

Por meio de uma ampliação de 2,64 mil vezes foi possível observar inúmeros canalículos denominados de pontoações celulares que são responsáveis pela comunicação entre a células parenquimáticas, conforme ilustrado na Figura 4.5b.

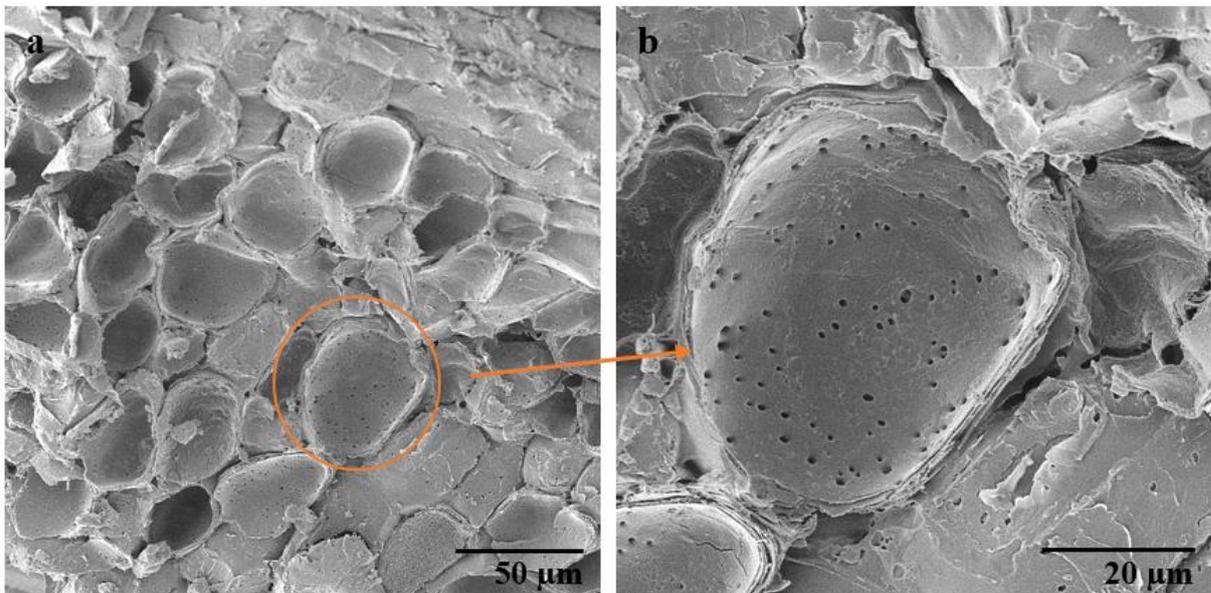


Figura 4.5 - Micrografia de células parenquimáticas do bambu preenchidas com pontoações celulares.

4.1.4.2 Massa específica

Esperava-se que a massa específica do bambu fosse relativamente baixa, especificamente, menor do que a da água, visto que o material flutua quando imergido neste líquido. No entanto, precisava-se determinar o valor e, assim, quantificar tal diferença. A Figura 4.6 resume os resultados do ensaio de massa específica do bambu utilizado nesta pesquisa.

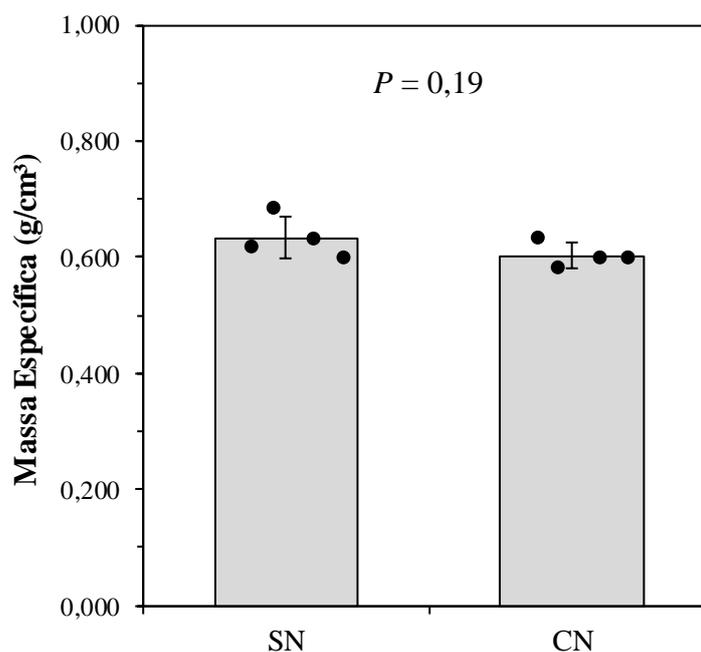


Figura 4.6 - Resultados de massa específica do bambu *Dendrocalamus giganteus*. (SN) sem nó; (CN) com nó; n=4, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste t – Student.

Segundo Liese (2003) e Greco *et al.* (2011) a região dos nós é caracterizada por fibras curtas com paredes espessas, aforquilhadas e distorcidas que contribui para uma maior densidade específica aos nós (*apud* LUIS *et al.*, 2017). Logo, tais resultados tendem a ser a massa específica aparente deste material. Observou-se que as amostras para este ensaio apresentaram reduzido coeficiente de variação, denotando uniformidade nos resultados. A análise estatística mostra que não houve variância significativa nos resultados entre as amostras com e sem nó, isto é, que a presença deste não interfere na massa específica do bambu que possui valor médio de aproximadamente $0,61 \text{ g/cm}^3$. Assim, tais resultados mostram que o bambu apresenta grande índice de vazios.

4.1.4.3 Absorção de água e variação dimensional

Outro tópico importante observado nesta pesquisa foi o comportamento do bambu em contato com a água, tanto no que refere a absorção de água quanto a evaporação desta, bem como suas consequências. A Figura 4.7 mostra os resultados obtidos para este ensaio.

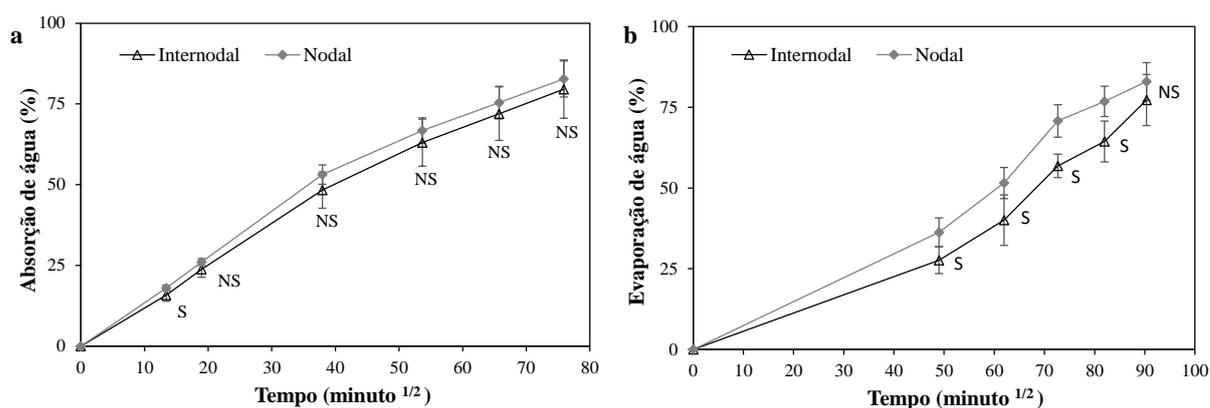


Figura 4.7 - Diagramas de absorção e evaporação de água do bambu. (a) absorção; (b) evaporação. n=5. (S) variância significativa; (NS) variância não significativa. $P < 0,05$. Teste t – Student e Wilcoxon.

As amostras para o ensaio de absorção exibiram coeficiente de variação de incremento mínimo e máximo de 3,96% e 6,75%, para as amostras nodais e 10,34% e 11,62% para as amostras internodais, respectivamente, demonstrando regularidade nos resultados. Já para o ensaio de evaporação, o coeficiente de variação de incremento mínimo e máximo foi de 6,12% e 12,25%, para as amostras nodais e 6,37% e 19,51% para as amostras internodais, respectivamente, denotando um aumento na variação dos resultados para este último ensaio.

Constata-se que as amostras da região com nó ostentam coeficientes angulares superiores aos das amostras sem nó, tanto no processo de absorção de água quanto no de evaporação. Além disso, pode-se verificar que para o ensaio de evaporação a inclinação da reta é menor nas primeiras horas do ensaio, enquanto que para o ensaio de absorção é praticamente uniforme e que o processo de absorção é mais intenso que o de evaporação, fato evidenciado pelas 40 horas a mais que o bambu necessitou para evaporar toda a água absorvida. Portanto, pode-se concluir que a presença do nó determina maior absorção e evaporação de água, levando-se a deduzir que este apresenta maior índice de vazios.

Em consequência disso, a absorção de água provoca um incremento nas dimensões do bambu, ou seja, uma espécie de inchamento no seu volume, conforme mostra a Figura 4.8a. Além disso, a pesquisa avaliou, também, o processo de contração das amostras (Figura 4.8).

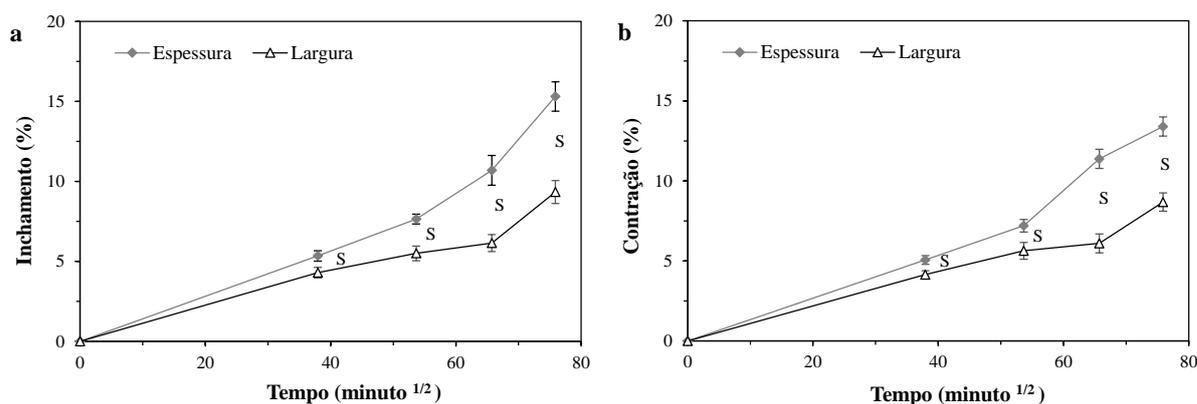


Figura 4.8 - Diagrama de variação dimensional do bambu.

(a) inchamento; (b) contração. n=5. (S) variância significativa; (NS) variância não significativa. $P < 0,05$. Teste t – Student.

O bambu apresentou variação ínfima no seu eixo longitudinal, na ordem de 1%, sendo estes resultados ocultados na pesquisa. Para o ensaio de inchamento a espessura (direção radial) apresentou coeficiente de variação em torno de 3,97% a 8,73% e a largura (direção tangencial) 7,66% a 8,66%. Já para o processo de contração, a espessura exibiu coeficiente de variação na faixa de 4,47% a 5,99% e a largura de 5,75% a 9,68%.

Os resultados mostram que o processo de inchamento exibiu valores maiores que a contração, mas que não ofereceu diferença significativa demonstrando que o bambu incha e contrai de maneira semelhante. Além disso, observou-se que houve uma variação dimensional principalmente em relação a espessura a partir das 48 horas tanto no processo de inchamento quanto na contração. Outro ponto importante foi que o bambu apresentou o mesmo comportamento com a presença do nó, levando a deduzir que este provocou a maior absorção de água, sugerindo uma maior quantidade de vazios nesta região.

Pereira & Beraldo (2008) explicam que na maioria dos casos os valores médios das variações do bambu nas duas direções (radial e tangencial) são menores que os valores encontrados para madeira, sendo tal diferença em torno de 6% na direção radial e 10% na direção tangencial. Para Ghavami (2005), as variações dimensionais da seção transversal provocadas pela absorção de água podem provocar fissuras ou até mesmo micro e macro em concreto curado e, assim, influenciando na aderência entre os dois materiais.

4.1.4.4 Resistência à tração paralela às fibras

A principal propriedade mecânica do bambu é sua capacidade de resistência à tração. A Figura 4.9 resume os resultados do ensaio de resistência à tração do bambu estudado nesta pesquisa.

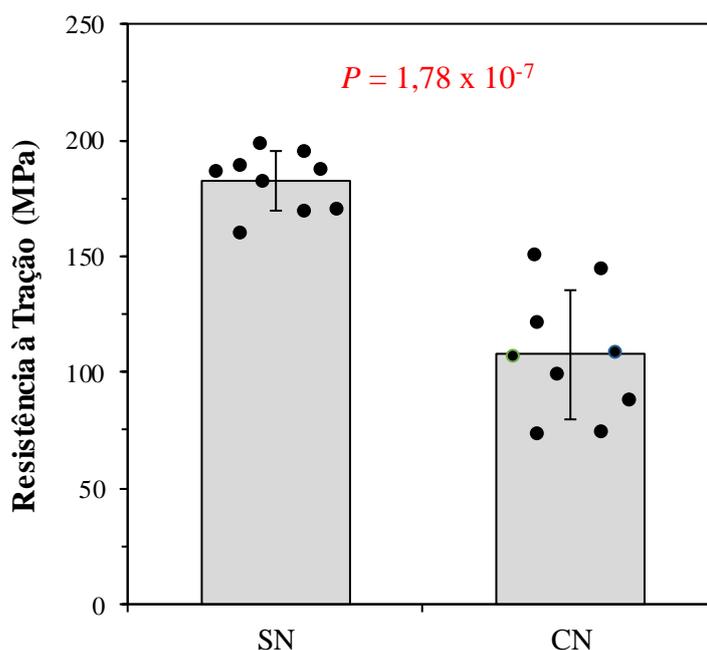


Figura 4.9 - Resultados do ensaio de tração do bambu *Dendrocalamus giganteus*. (SN) sem nó; (CN) com nó; n=9, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste t – Student.

Constatou-se que houve uma dispersão considerável nos resultados de resistência à tração, principalmente nas amostras nodais. Isso pode ser facilmente explicado por se tratar de um material natural. Ghavami e Marinho (2005) explicam que o módulo de resistência varia em função do diâmetro e da espessura da parede, assim sendo, varia no decorrer do colmo.

Outro ponto observado no decorrer da pesquisa foi que taliscas com maior seção transversal, normalmente oriunda da região da base, apresentaram menores resistência à tração. Isso acontece porque a quantidade de fibras e feixes vasculares diferem 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 comparada 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 resultados mostraram que a presença do nó diminuiu significativamente a resistência à tração deste material ($P < 0,05$), sendo que houve uma redução de 69% quando feita a comparação entre as médias das duas regiões. Este fato pode ser evidenciado conforme a Figura 4.10 que demonstra que todas as amostras nodais apresentaram ruptura no nó, enquanto que as amostras internodais exibiram ruptura com o desfibramento das fibras.



Figura 4.10 - Ruptura à tração do bambu. (a) Sem nó; (b) Com nó.

Outro fato importante para este ensaio é que foi possível determinar o módulo de elasticidade deste material, que nada mais é que o coeficiente angular do diagrama tensão deformação (Figura 4.11). Para este ensaio o coeficiente de variação máximo foi de 11,97%.

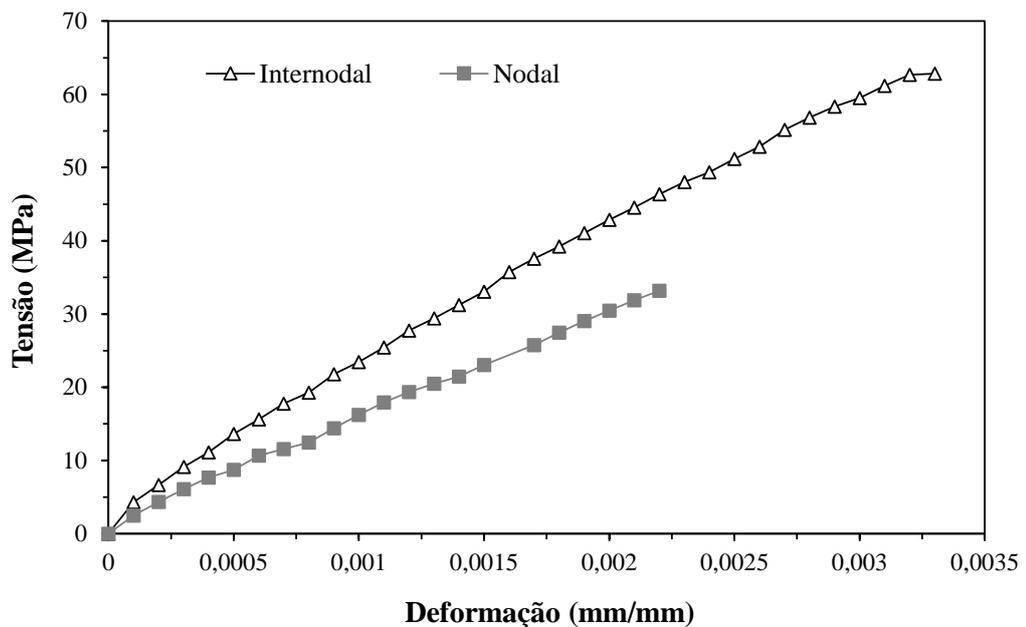


Figura 4.11 - Diagrama Tensão x deformação do bambu.

Nota-se que apesar de apresentar elevada resistência à tração este material apresenta baixo módulo de elasticidade, isto é, baixa rigidez sob a ação de carga no seu eixo paralelo às fibras. Em consequência disso, o bambu se apresenta como um material que deforma bastante

e apresenta ruptura frágil quando é submetido ao esforço de tração. No entanto, é justo salientar que o bambu apresentou comportamento linear elástico, ou seja, tensão proporcional a deformação.

A análise de variância (Figura 4.12) evidencia que a presença do nó reduziu significativamente o módulo de elasticidade do bambu analisado, ou seja, o nó provocou maiores deformações quando submetido as mesmas cargas.

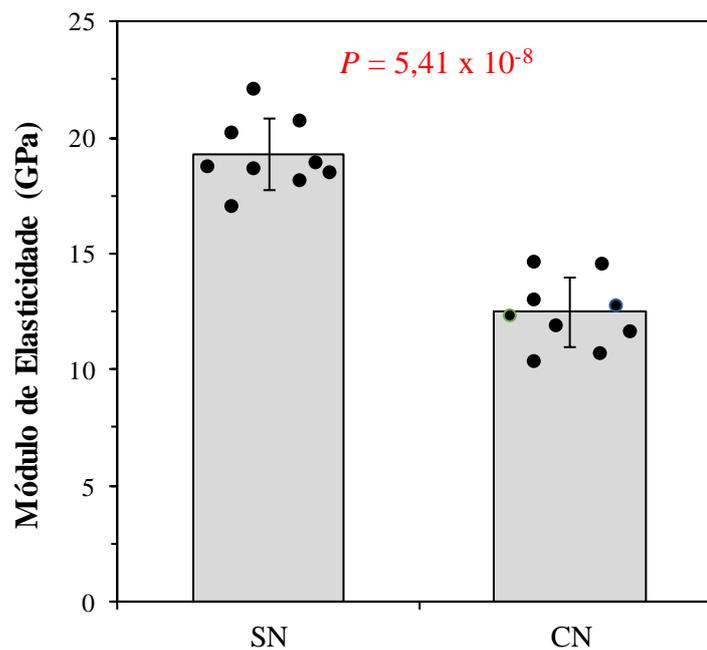


Figura 4.12 - Resultados de módulo de elasticidade do bambu *Dendrocalamus giganteus*. (SN) sem nó; (CN) com nó; n=9, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste t – Student.

Este fato é explicado devido a região dos nós apresentar fibras curtas com paredes espessas, aforquilhadas e distorcidas, influenciando tanto nas propriedades físicas quanto na e de resistência mecânica do colmo (LIESE, 1980; GRECO *et al.*, 2011, *apud* LUIS *et al.*, 2017).

Ghavami e Marinho (2005) estudaram as propriedades mecânicas dos colmos inteiros do bambu, ou seja, base, centro e topo do material. Os autores observaram um comportamento semelhante, isto é, os bambus com a presença de nós apresentam módulo de elasticidade inferiores aos sem nó, principalmente na região central e apical do colmo com valor médio de 15,11 GPa.

Os resultados de propriedades físicas obtidos nesta pesquisa mostram que a região nodal exibe maior quantidade de vazios, que por sua vez implica nas propriedades mecânicas, haja vista que resistência possui correlação inversa com índice de vazios (CALLISTER, 2014).

4.1.4.5 Resistência à compressão paralela às fibras

Outra propriedade do bambu *Dendrocalamus giganteus* determinada nesta pesquisa foi sua capacidade de resistir esforços de compressão. A Figura 4.13 resume os resultados do ensaio de resistência à compressão para este material.

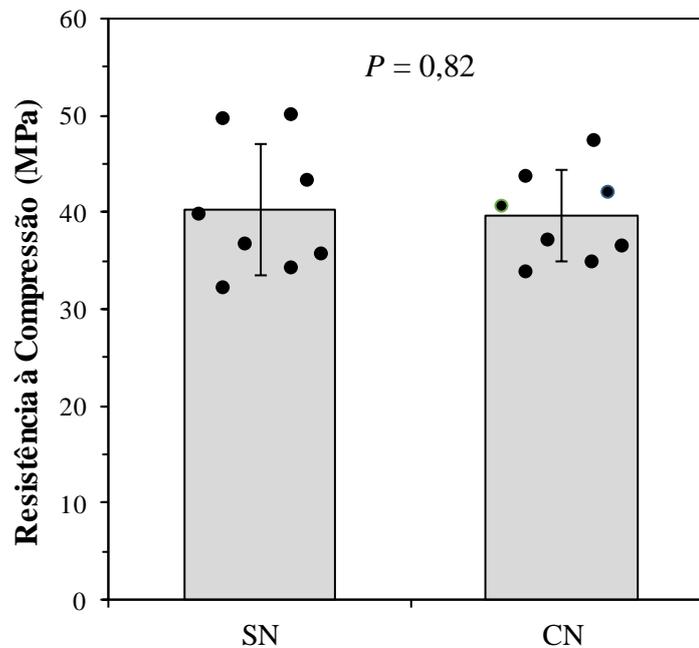


Figura 4.13 - Resultados de resistência à compressão do bambu *Dendrocalamus giganteus*. (SN) sem nó; (CN) com nó; n=8, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste t – Student.

Os resultados mostram que o bambu estudado nesta pesquisa exibiu tensão de ruptura à compressão de aproximadamente de 40 MPa e que esta propriedade pode apresentar dispersão na ordem dos 16%. Krause *et al.* (2016) explica que os feixes de fibras, sozinhos, consistem numa geometria exclusivamente resistente à tração, 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 à compressão, ocorre um rearranjo antes do reforço ter efeito.

Observou-se que a presença do nó não ofereceu diferença significativa nos resultados ($P > 0,05$). Apesar disso, constatou-se que houve distinção no modo de ruptura (Figura 4.14). Todas as amostras exibiram esmagamento nas extremidades, entretanto, as amostras com nó apresentaram propagação de aberturas no eixo longitudinal, podendo este elemento ser considerado como um ponto de fragilidade neste eixo. No entanto, a distribuição dos nós ao

longo do colmo exerce papel importante no eixo transversal, na medida que divide o comprimento de flambagem do colmo conferindo uma maior rigidez à momentos fletores.



(a)

(b)

Figura 4.14 - Ruptura à compressão bambu. (a) Sem nó; (b) Com nó.

4.1.5 Concreto

A pesquisa adotou um concreto com consumo de cimento relativamente baixo adequando-se a uma menor relação água/cimento possível, pois o bambu é suscetível ataque dos álcalis presente no cimento e a abosrão de água. Além disso, buscou-se uma resistência à compressão conforme sugerido na literatura.

A Figura 4.15 apresenta a tensão máxima média de ruptura à compressão das amostras de concreto extraídas de cada família. Nota-se que o resultado de análise de variância mostrou que não houve variação significativa entre as amostras denotando, assim, uniformidade na resistência à compressão deste material.

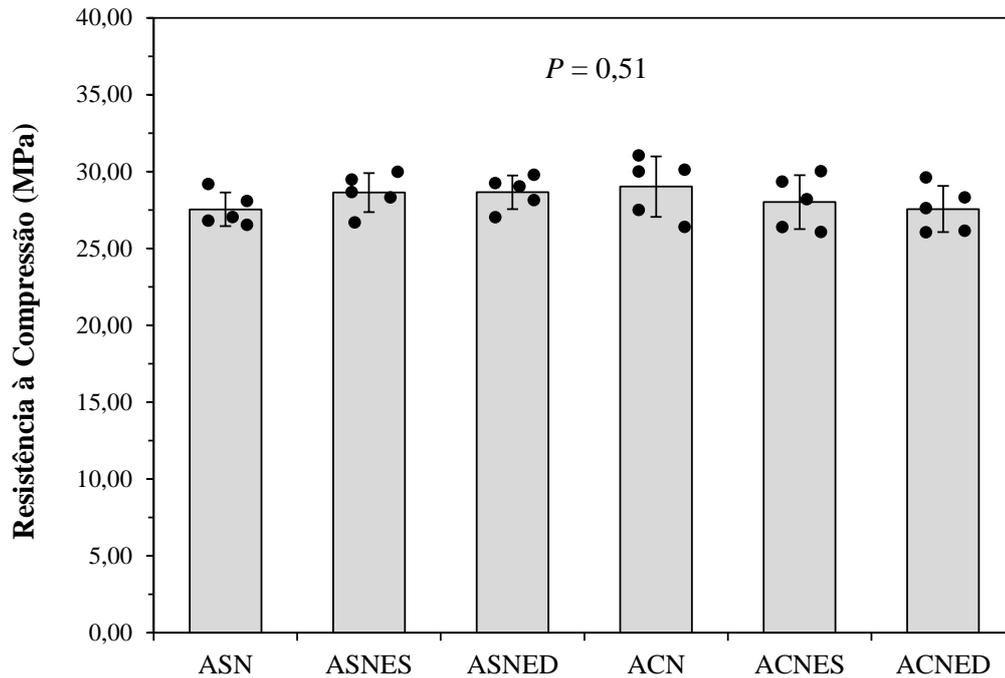


Figura 4.15 - Resultados de resistência à compressão do concreto aos 28 dias. n=5, variância significativa quando $P < 0,05$. ANOVA, Tukey.

4.2 INTERAÇÃO BAMBU CONCRETO

4.2.1 Arrancamento bambu - concreto

A utilização de bambu como material de construção se apresenta como alternativa em meio a comunidade científica. Como visto nos primeiros resultados deste capítulo, este material possui elevada resistência à tração quando comparada com sua relativa baixa densidade. Entretanto, no que se refere a sua utilização em meio ao concreto há uma reduzida aderência com este material.

A maioria dos tratamentos utilizados para melhorar o mecanismo de aderência bambu-concreto, em geral, consistem na aplicação de produtos na superfície do bambu. No entanto, em sua predominância os resultados obtidos foram desfavoráveis comparados ao bambu sem tratamento e, nos casos que houveram aumento da tensão de aderência, as resinas utilizadas foram epoxídicas, cujo custo financeiro é muito elevado, inviabilizando a utilização do bambu (MESQUITA *et al.*, 2006).

A Tabela 4.4 mostra que a tensão de aderência média entre o bambu e o concreto é de 0,6 MPa no trecho sem nó e que a presença do nó acarreta um aumento de 42% em tal valor,

atingindo 44% e 74% do valor teórico previsto pela NBR 6118 (ABNT, 2014) e Model Code 2010 (CEB-FIP, 2011), respectivamente. De maneira geral, os tratamentos utilizados nesta pesquisa apresentaram resultados positivos em relação as referências, com incremento mínimo de aproximadamente 25%, sendo encontrados maiores incrementos para família internodal.

Tabela 4.4 - Tensões de aderência experimentais e de cálculo.

Amostra	$\tau_{b,m}$ (MPa)	f_{bd} (MPa)	$f_{bd,0}$ (MPa)	$\tau_{b,m}/f_{bd}$	$\tau_{b,m}/f_{bd,0}$	$\tau_{b,m} / \tau_{b,m}(ASN)$
ASN	0,60	1,94	1,14	0,31	0,52	-
ASNE	0,83	1,94	1,14	0,43	0,73	1,38
ASNES	0,97	1,94	1,14	0,50	0,85	1,62
ACN	0,85	1,94	1,14	0,44	0,74	1,42
ACNE	1,06	1,94	1,14	0,55	0,93	1,77
ACNES	1,11	1,94	1,14	0,57	0,97	1,85

Legenda: $\tau_{b,m}$: tensão de aderência média; f_{bd} : resistência de aderência (ABNT NBR 6118, 2014); $f_{bd,0}$: resistência de aderência (CEB-FIP Model Code 2010, 2011).

Entretanto, por meio de análise estatística acerca dos resultados constatou-se que apenas o tratamento do tipo espiral simples exibiu variação significativa em comparação com as referências, conforme ilustrado na Figura 4.16. Já, a análise dos subgrupos mostrou que o aumento de aderência observada devido a presença do nó foi significativo enquanto que para o mesmo tipo de tratamento, houve apenas variação significativa devido a presença do nó no tipo espiral dupla. Contudo, observou se que o tratamento que mais se aproximou dos valores normativos foi o do tipo espiral simples.

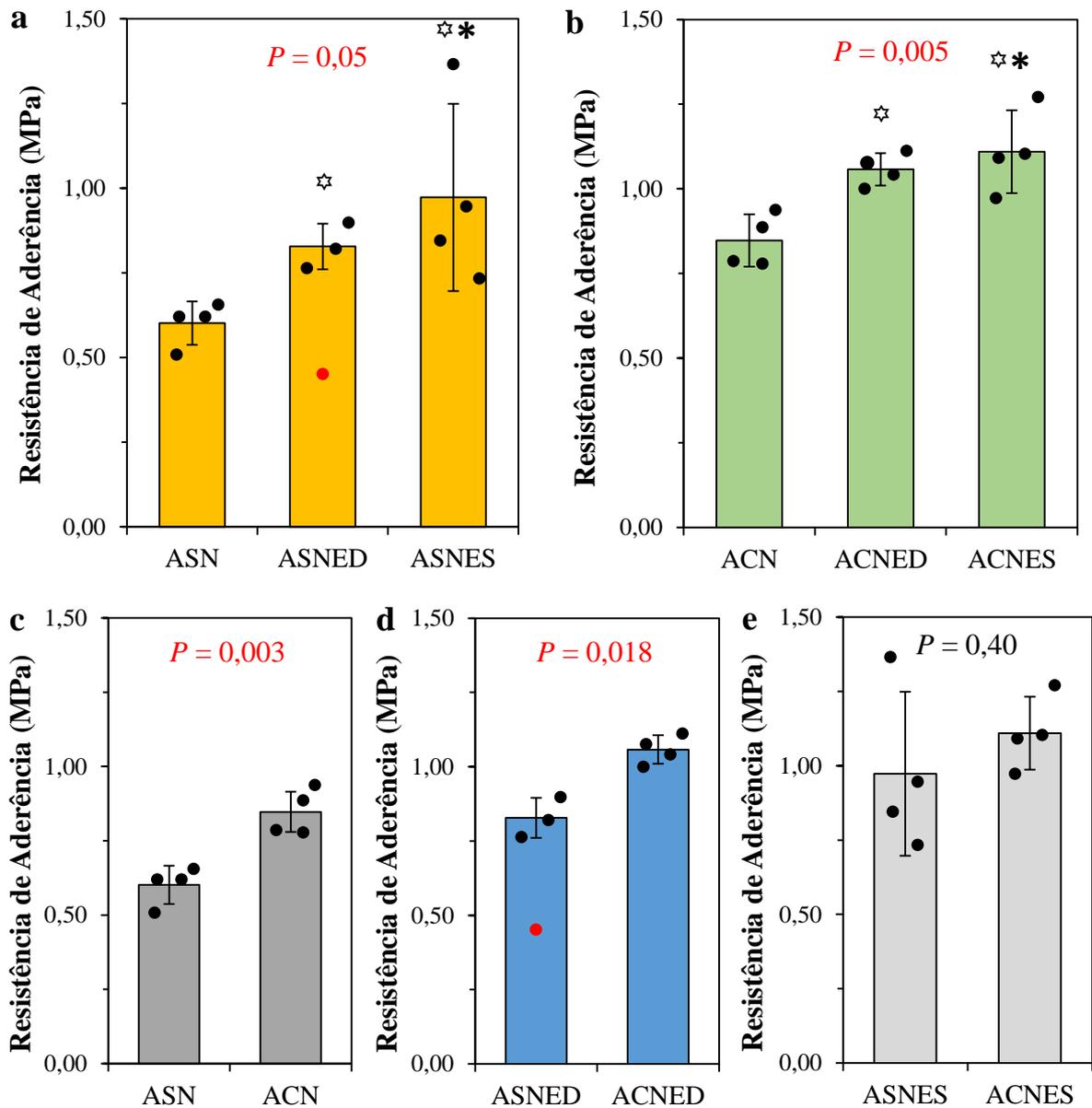


Figura 4.16 - Resultados de resistência de aderência bambu concreto aos 28 dias. (a) famílias sem nó; (b) famílias com nó; (c) famílias de referência; (d) famílias com espiral dupla; (e) famílias com espiral simples. ● valor discrepante. * $P < 0,05$ em relação à referência. * $P > 0,05$ entre si. $n=4$, variância significativa quando $P < 0,05$. Teste t – Student e ANOVA, Tukey.

A Tabela 4.5 mostra os resultados obtidos nesta pesquisa em comparação com alguns tratamentos estudados por outros autores como mecanismo de aumento da aderência entre o bambu e concreto, apontando o seu índice de eficácia de acordo com a configuração de cada ensaio.

Tabela 4.5 - Influência dos diferentes tratamentos empregados no estudo de aderência bambu concreto.

Tratamento	Autor	F_{ck} (MPa)	L x e (mm)	P (mm)	l_b (mm)	$\tau_{b,m}$ (MPa)	I_{inc}
Piche + areia	FERREIRA (2002)	37	22 x 13	70	150	0,45	0,64
Verniz com arame farpado		35	20 x 10	60	150	1,25	1,78
Negrolin + areia	GHAVAMI (2005)	20 - 40	30 x 10	80	100	0,73	1,40
Negrolin + areia + arame		20 - 40	30 x 10	80	100	0,97	1,86
Sikadur 32-gel		20 - 40	30 x 10	80	100	2,75	5,28
1 pino de bambu	MESQUITA <i>et al.</i> (2006)	25	20 x 13	66	100	1,31	1,29
2 pino de bambu		25	20 x 13	66	100	2,03	1,50
1 pino de aço		25	20 x 13	66	100	1,57	1,54
2 pinos de aço		25	20 x 13	66	100	2,43	1,80
Sikadur 32-gel	FERREIRA (2007)	17,5	20 x 10	60	100	1,10	1,35
1 pino de bambu		17,5	20 x 10	60	100	0,82	1,01
1 pino de aço		17,5	20 x 10	60	100	0,69	0,85
Araldite	AGARWAL <i>et al.</i> (2014)	20	41 x 4	90	100	0,232	1,83
Araldite + arame		20	26 x 4	60	100	0,539	4,24
Tapecrete P 151		20	38 x 4	84	100	0,315	2,48
Anti Corr RC		20	35 x 4	78	100	0,159	1,25
Sikadur 32-gel		20	35 x 4	78	100	0,588	4,63
Arame recozido	SALGADO NETO (2018)	28	20 x 10	60	200	0,83	1,38
		28	20 x 10	60	200	0,97	1,62

Legenda: F_{ck} : resistência à compressão do concreto; L: largura média do bambu; e: espessura média do bambu; P: perímetro médio do bambu; l_b : comprimento de ancoragem; $\tau_{b,m}$: tensão de aderência média; I_{inc} : índice de incremento em relação a referência nas respectivas pesquisas.

Constata-se que os tratamentos empregados nesta pesquisa exibiram resultados satisfatórios quando, também, comparados com os mecanismos utilizados por outros autores. Nota-se que os resultados que apresentaram maior incremento na tensão de aderência foram

aqueles que utilizaram materiais com elevado custo ou que funcionavam como ganchos de ancoragem que, por sua vez, provocaram o cisalhamento da seção transversal do bambu. Além disso, outro ponto favorável aos tipos de tratamento adotados nesta pesquisa refere-se ao comportamento carga x deslocamento, conforme evidenciado na Figura 4.17.

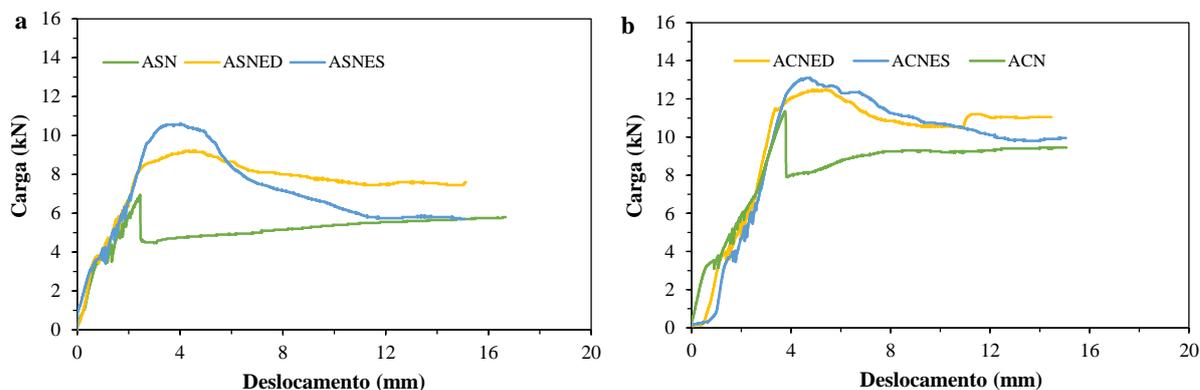


Figura 4.17 - Diagrama carga x deslocamento do ensaio de arrancamento bambu concreto. (a) famílias sem nó; (b) famílias com nó.

Observa-se que tanto o modelo espiral dupla quanto o espiral simples modificaram o comportamento do bambu submetido ao ensaio de arrancamento. Nota-se que a presença do nó interferiu apenas no aumento de aderência. A Figura 4.17 mostra que após a carga máxima de ensaio há uma queda brusca que provoca uma espécie de rearranjo interfacial que confere uma aderência residual que proporciona um gradual aumento de carga concomitantemente com o deslizamento do bambu. Já para os outros dois modelos há uma maior ductilidade de ensaio com diminuição gradual de carga simultaneamente com o deslizamento do bambu, principalmente para as amostras do tipo espiral dupla.

4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As propriedades dos materiais estão diretamente ligadas com microestrutura. Partindo, deste princípio, o desempenho observado no ensaio de arrancamento pode ser compreendido analisando de maneira amplificada a ligação entre o bambu e o concreto. As imagens obtidas via MEV apresentam a microestrutura do concreto, bem como a ligação com o bambu (Figura 4.18). Na Figura 4.18a é possível observar os feixes de fibras e o tecido parenquimático enquanto que na Figura 4.18b permite visualizar os produtos de hidratação do concreto.

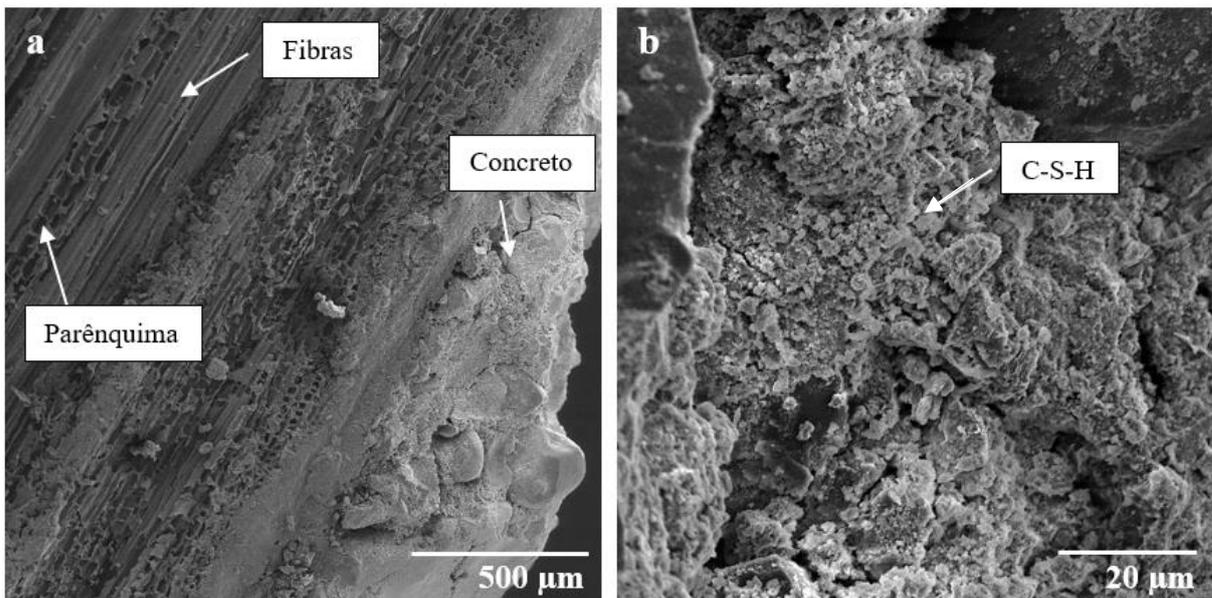


Figura 4.18 - Micrografias do ensaio de arrancamento.
(a) ligação bambu concreto; (b) Ampliação do concreto.

Os principais constituintes sólidos na pasta de cimento hidratada que podem ser identificados por um microscópio eletrônico de varredura e em ordem de formação são: trissulfato hidratado ($C_2AS_3H_32$), também chamado de etringita; hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) ou portlandita e silicato de cálcio hidratado (C-S-H). Este, por sua vez, apresenta considerável resistência mecânica e química, com estrutura fibrilar e na forma de cristais que apresentam grande superfície específica, tornando-o principal contribuinte para a resistência dos concretos. A portlandita apresenta-se na forma de cristais com morfologia prismática hexagonal distinta e, ao contrário do (C-S-H), possui contribuição a resistência limitada, devido à área superficial consideravelmente mais baixa. Seus cristais são porosos e com baixa resistência mecânica. Já a etringita é um produto da reação dos aluminatos e gessos hidratados e apresenta-se como cristais grandes e volumosos, de morfologia acicular - agulha (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

A seguir serão apresentadas algumas imagens do concreto capturadas da região de contato com bambu, tanto para a região correspondente as fibras quanto para face da casca, sendo comparadas com micrografias de amostras de concreto em contato com o aço.

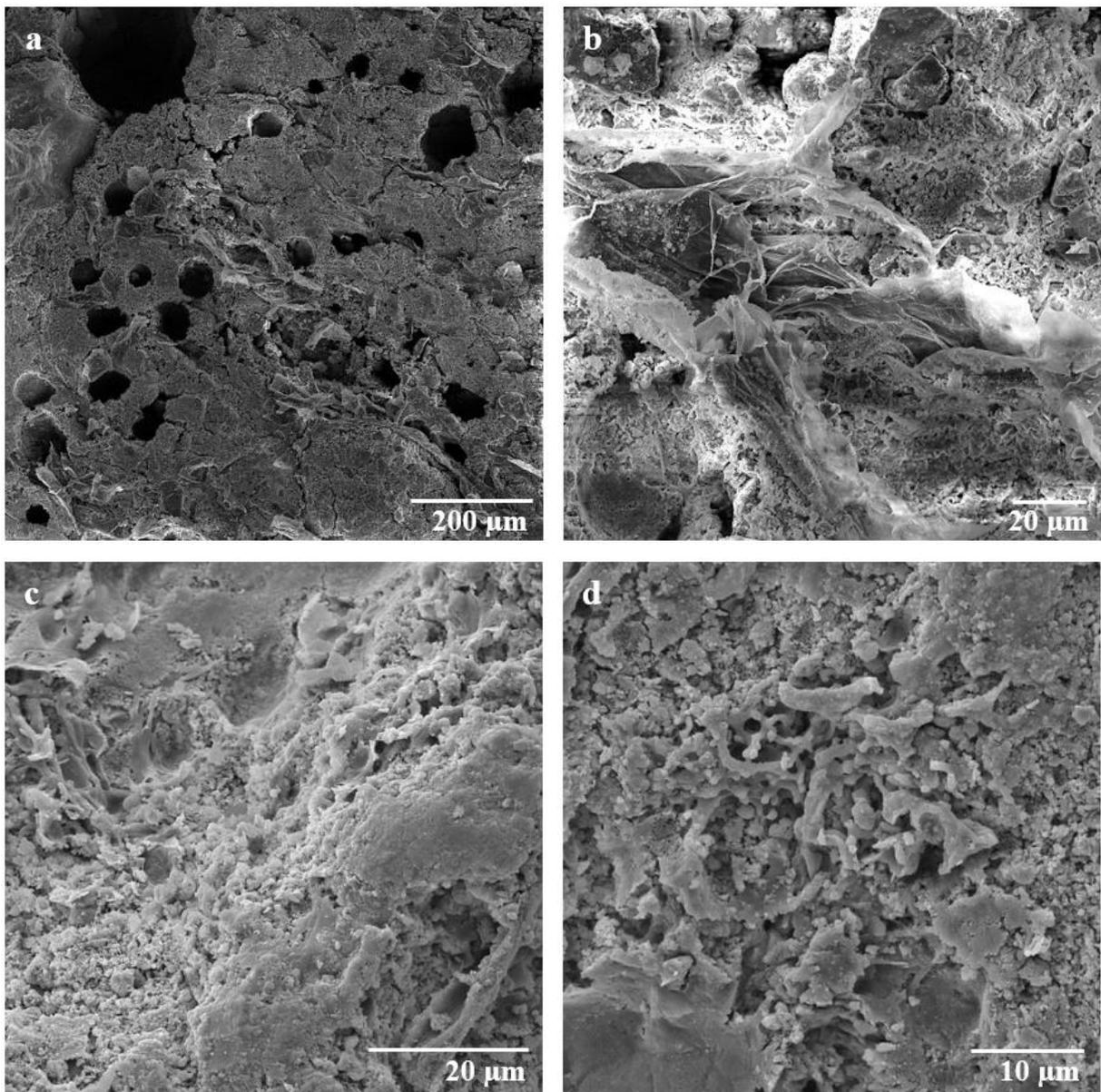


Figura 4.19 - Micrografias do concreto da região de contato com o bambu. (a) e (b) concreto em contato com a fibra; (c) e (d) concreto em contato com a casca.

A Figura 4.19 evidencia que o concreto em contato com o bambu exibiu características distintas quando comparados a face correspondente a fibra e casca. O concreto em contato com a parte interna da talisca de bambu apresentou considerável quantidade de vazios, conforme mostra a Figura 4.19a. Nota-se que a matriz cimentícia em contato com a casca exibiu uma microestrutura mais densa e compacta, com maior quantidade de silicatos de cálcio hidratado.

Luis *et al.* (2017) explicam que a camada mais externa do colmo é composta por células epidérmicas comuns com paredes espessadas, altamente lignificadas, cobertas externamente por uma camada de cutina e cera epicuticular, que age como um impermeabilizante que dificulta

a perda de água, além de grandes quantidades de células silificadas. Já na região mais interna, encontra-se o parênquima e os feixes vasculares, local onde se encontra os nutrientes do vegetal.

Savastano Jr. (2000) explica que a presença de substâncias de caráter ácido liberadas por fibras vegetais em solução aquosa podem retardar a pega do cimento e que o mesmo efeito ocorre pela presença de açúcares na estrutura vegetal que são ligeiramente liberadas em solução aquosa.

Os resultados de absorção e variação dimensional obtidos nesta pesquisa mostram que o maior inchamento do bambu ocorre no eixo da espessura. Krause *et al.* (2016) explicam que o bambu de *Dendrocalamus giganteus* tem uma considerável fração de volume de vazios variando de cerca de 0,27 na camada interna e aproximadamente 0,40 na camada externa, respectivamente. Estes vazios são divididos principalmente em vasos e poros, mas há também a lúmen (vazios do esclerênquima), considerado o principal elemento de absorção de água das fibras vegetais.

Ghavami (2005) relata que em comparação entre todas as espécies, a menor quantidade de água absorvida é apresentada pelas espécies *Dendrocalamus giganteus*. Para ele a variação dimensional do bambu, devido à absorção de água pode provocar fissuras nas duas faces em contato com o concreto.

Entretanto, esta pesquisa vem mostrar que a dificuldade de aderência bambu concreto provém, principalmente, da região das fibras, pois esta apresenta menos produtos de hidratação em comparação com as micrografias oriundas do concreto em contato com aço (Figura 4.20).

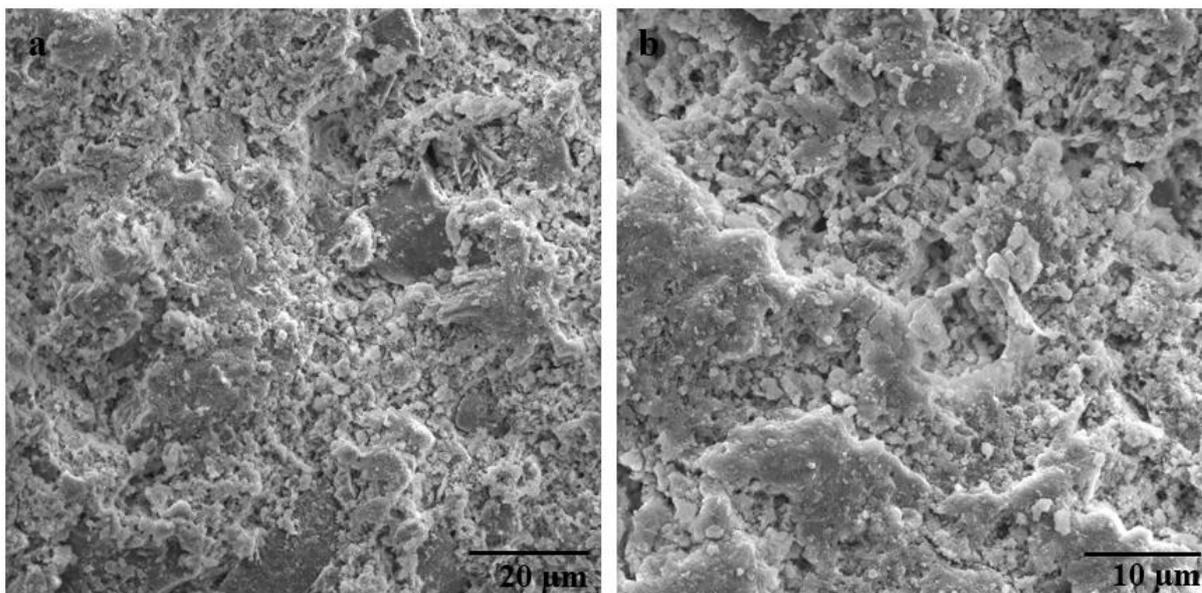


Figura 4.20 - Micrografias do concreto da região de contato com o aço.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Segundo os resultados deste estudo e em consonância com a literatura pode-se extrair as seguintes conclusões do presente trabalho sobre a Análise Mecânica e Microestrutural da Interação Bambu Concreto:

- Constatou-se que o emprego de arame recozido aumenta a resistência de aderência entre o bambu e o concreto com incremento mínimo de aproximadamente 25%, sendo observado diferença significativa para o envolvimento do tipo espiral simples e para a presença do nó.
- Verificou-se que a presença do nó diminui a resistência à tração e módulo de elasticidade do bambu.
- O bambu configura-se como um material bastante heterogêneo, exibindo melhores propriedades mecânicas em direção a região apical com resistência à compressão média em torno de 40 MPa; resistência à tração média de 182,5 MPa na região internodal e 107,9 MPa para região nodal; módulo de elasticidade médio de 19,3 GPa e 12,5 GPa em sequência, respectivamente. Tais valores são considerados altos quando relacionados com sua massa específica aparente de 0,61 g/cm³.
- O bambu é considerado um material poroso, principalmente na região nodal, visto que apresentou cerca de 82,73% de água em 4 dias de imersão em água, acarretando no aumento em suas dimensões, principalmente no eixo radial.
- Conclui-se que a dificuldade de aderência entre o bambu e o concreto provém, principalmente, da região das fibras. Isso pode ser evidenciado quando se compara as microestruturas do concreto em contato com as faces do bambu em relação ao do aço.

SUGESTÕES DE PESQUISAS

É importante que se dê continuidade nos estudos a cerca do 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 tipo de tratamentos que não interfira no processo de hidratação.
- Avaliar a durabilidade do bambu ao longo do tempo quando imerso em concreto
- Analisar outros variáveis de resposta como por exemplo: embutimento; relação água/cimento e fck do concreto.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos. NBR 11768. Rio de Janeiro. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. NBR NM 53. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa aparente. NBR NM 52. Rio de Janeiro. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da massa unitária e volume de vazios. NBR NM 45. Rio de Janeiro. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Agregados - Determinação da composição granulométrica. NBR NM 248. Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Arame de aço de baixo teor de carbono - Requisitos. NBR 5589. Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. NBR 9778. Rio de Janeiro. 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. NBR NM 23. Rio de Janeiro. 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Cimento Portland pozolânico. NBR 5736. Rio de Janeiro. 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Determinação do módulo de deformação estático e diagrama tensão-deformação – Método de ensaio. NBR 8522. Rio de Janeiro. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos - Método de ensaio. NBR 5739. Rio de Janeiro. 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. NBR 5738. Rio de Janeiro. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Materiais metálicos — Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente. NBR ISO 6892. Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro. 2014.

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.

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.

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.

COLLA, W. A.; BERALDO, A. L.; BRITO, J. O. Effects of thermal treatment on the physicochemical characteristics of giant bamboo. Cerne. Vol. 17, n. 3, (2011) p. 361-367.

ENGENHARIA E CONSTRUÇÃO. Disponível em: <<http://www.engenhariaeconstrucao.com/2012/02/andaiques-de-bambu.html>>. Acesso em 28 de janeiro de 2017.

ENGENHARIAeCONSTRUÇÃO. Disponível em: <<http://www.engenhariaeconstrucao.com/2012/02/andaiques-de-bambu.html>>. Acesso em 28 de janeiro de 2017.

FERRÃO, A. M. de A Taliscas de bambu em matrizes de concreto: características físico-mecânicas. Tese de Mestrado. UNICAMP- Campinas, 1992.

FERREIRA, G. C. S. Vigas de concreto armadas com bambu. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, 2002.

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: 3º Congresso Internacional de pesquisa em design. Rio de Janeiro. 2005.

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

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.

HIDALGO LOPEZ, O. Bambu: su cultivo y aplicaciones em: fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía. Boletim técnico. Cali: SNT, 1974, 318 p.

INSTITUTO AÇO BRASIL. Disponível em: <<http://www.aconrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp>> Acesso em: 24 de janeiro de 2017.

JANSSEN, J. J. A. Designing and building with bamboo. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR). Beijing, China, 2000.

JOHN, V. N.; AGOPYAN, V. Materiais reforçados com fibras para construção civil. Simpósio Internacional sobre Materiais Reforçados com Fibras para Construção Civil. São Paulo, Anais. São Paulo, EP-USP, 1993. p.29-38.

KRAUSE, J. Q.; DE ANDRADE SILVA, F.; GHAVAMI, K.; GOMES, O. F. M.; TOLEDO FILHO, R. D. On the influence of *Dendrocalamus giganteus* bamboo microstructure on its mechanical behavior. Construction & Building Materials, v. 127, p. 199-209, 2016.

LEVY, J. S. Fundamental records in wood preservation (Lectures delivered to the thirty-sixth session of the timber committee), 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 Paraíba 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 muro) 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. 2ª 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.

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.

MICHAELIS, UOL Dicionário; Moderno Dicionário da Língua Portuguesa, © 2017 Editora Melhoramentos Ltda.; UOL 2017. Disponível em <<http://michaelis.uol.com.br/>>. Acesso em 16 jun. de 2017.

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 APPLICATIONS - 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. 2º 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.

PORTAL ECOEFICIENTES. Disponível em: <<http://www.ecoeficientes.com.br/simon-velez-bambu/>>. Acesso em 28 de janeiro de 2018.

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 Paraíba 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.

UNESCO WORLD HERITAGE CENTRE. Disponível em: < <http://whc.unesco.org/>>. Acesso em 17 de fevereiro de 2018.

WEBBWORKS U.S., LLC. Disponível em: < <http://www.bamboobikemaker.com/bikes.html>>. Acesso em 28 de janeiro de 2017.

WORLD COMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT. Our common future. United Nations, 1987. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/N8718467.pdf>>. Acesso em: 30 de dezembro de 2016.

YAMAGUCHI, M.; MURAKAMI, K.; TAKEDA. K. Flexural Performance of Bamboo-Reinforced-Concrete Beams using Bamboo as Main Rebars and Stirrups. In: Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Session M4-8 number 273. August 18 – August 21 2013, Kyoto Research Park, Kyoto, Japan.

APÊNDICE

APÊNDICE A: Resultados individuais dos ensaios realizados.

Tabela A.1 - Resultados do ensaio de massa específica do bambu.

Amostra	M _G (g)	M _B (g)	M _{B+G} (g)	V (cm ³)	ρ (g/cm ³)	ρ _m - Sd	Coef. de Variação
SN1	259,00	13,03	250,93	21,10	0,62		
SN2	259,00	14,12	250,74	22,38	0,63	0,63 ± 0,04	5,78%
SN3	259,00	14,58	249,30	24,28	0,60		
SN4	259,00	15,32	251,96	22,36	0,69		
CN1	259,00	19,62	247,63	30,99	0,63		
CN2	259,00	19,77	245,66	33,11	0,60	0,60 ± 0,02	3,58%
CN3	259,00	18,74	246,36	31,38	0,60		
CN4	259,00	18,43	245,79	31,64	0,58		

Legenda: SN: sem nó; CN: com nó; M_G: massa da gaiola; M_b: massa do bambu; M_{B+G}: massa gaiola+bambu V: volume; ρ: massa específica; ρ_m: massa específica média; Sd: desvio padrão.

Tabela A.2 - Resultados do ensaio de absorção de água do bambu com nó.

Tempo (horas)	CN1 (%)	CN2 (%)	CN3 (%)	CN4 (%)	CN5 (%)	i _m - Sd	Coef. de variação
3	16,67	17,95	18,25	18,01	19,04	17,99 ± 0,85	4,74%
6	24,77	25,35	26,62	25,99	27,39	26,02 ± 1,03	3,96%
24	50,24	51,42	55,03	51,51	57,47	53,13 ± 3,01	5,67%
48	62,06	64,95	70,39	64,97	71,33	66,74 ± 3,96	5,93%
72	70,24	72,54	80,31	72,71	81,34	75,43 ± 5,04	6,68%
96	76,94	80,06	88,78	79,23	88,66	82,73 ± 5,59	6,75%

Legenda: CN: amostra com nó; i_m: taxa de absorção de água média do bambu; Sd: desvio padrão.

Tabela A.3 - Resultados do ensaio de absorção de água do bambu sem nó.

Tempo (horas)	SN1 (%)	SN2 (%)	SN3 (%)	SN4 (%)	SN5 (%)	$i_m - Sd$	Coef. de variação
3	17,62	13,09	14,46	16,66	17,08	$15,78 \pm 1,93$	12,20%
6	26,80	20,72	21,87	24,68	24,89	$23,79 \pm 2,46$	10,34%
24	55,18	40,21	45,84	49,92	50,45	$48,32 \pm 5,62$	11,62%
48	71,96	52,41	60,19	64,43	66,12	$63,02 \pm 7,28$	11,55%
72	81,87	59,69	68,96	73,50	75,79	$71,96 \pm 8,29$	11,51%
96	90,32	66,04	76,71	81,09	83,71	$79,57 \pm 9,03$	11,35%

Legenda: SN: amostra com nó; i_m : taxa de absorção de água média do bambu; Sd: desvio padrão.

Tabela A.4 - Resultados do ensaio de evaporação de água do bambu sem nó.

Tempo (horas)	SN1 (%)	SN2 (%)	SN3 (%)	SN4 (%)	SN5 (%)	$i_m - Sd$	Coef. de variação
40	29,75	24,55	32,72	28,77	22,34	$27,63 \pm 4,16$	15,06%
64	39,15	43,82	40,09	49,18	27,97	$40,04 \pm 7,81$	19,51%
88	60,88	54,42	54,15	60,76	54,08	$56,86 \pm 3,62$	6,37%
112	68,08	55,48	59,95	69,79	68,64	$64,39 \pm 6,32$	9,82%
136	87,15	67,61	70,78	80,49	80,24	$77,26 \pm 7,94$	10,28%

Legenda: SN: amostra sem nó; i_m : taxa de evaporação de água média do bambu; Sd: desvio padrão.

Tabela A.5 - Resultados do ensaio de evaporação de água do bambu com nó.

Tempo (horas)	CN1 (%)	CN2 (%)	CN3 (%)	CN4 (%)	CN5 (%)	$i_m - Sd$	Coef. de variação
40	39,51	30,08	36,57	41,27	34,01	$36,29 \pm 4,45$	12,25%
64	58,36	45,68	51,74	48,68	53,25	$51,54 \pm 4,80$	9,31%
88	71,31	67,16	71,60	65,46	78,43	$70,79 \pm 5,02$	7,09%
112	74,27	73,44	81,28	72,55	82,49	$76,80 \pm 4,70$	6,12%
136	77,25	79,98	89,51	79,09	89,07	$82,98 \pm 5,85$	7,04%

Legenda: CN: amostra com nó; i_m : taxa de evaporação de água média do bambu; Sd: desvio padrão.

Tabela A.6 - Resultados do ensaio de inchamento (espessura do bambu).

Tempo (horas)	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	CP4 (%)	CP5 (%)	$i_m - Sd$	Coef. de variação
24	5,04	5,42	5,08	5,85	5,34	$5,34 \pm 0,33$	6,10%
48	7,77	7,91	7,85	7,16	7,54	$7,64 \pm 0,30$	3,97%
72	11,94	9,96	11,23	9,65	10,68	$10,69 \pm 0,93$	8,73%
96	14,68	14,93	16,92	14,91	15,07	$15,30 \pm 0,92$	5,99%

Legenda: CP: corpo de prova; i_m : taxa de inchamento média da largura do bambu; Sd: desvio padrão.

Tabela A.7 - Resultados do ensaio de contração (espessura do bambu).

Tempo (horas)	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	CP4 (%)	CP5 (%)	$i_m - Sd$	Coef. de variação
24	4,87%	5,09%	5,41%	5,22%	4,71%	$5,06 \pm 0,28$	5,45%
48	6,98%	6,80%	7,04%	7,38%	7,79%	$7,20 \pm 0,39$	5,45%
72	10,69%	11,35%	12,26%	11,02%	11,57%	$11,38 \pm 0,59$	5,22%
96	13,37%	13,28%	14,29%	12,61%	13,47%	$13,40 \pm 0,60$	4,47%

Legenda: CP: corpo de prova; i_m : taxa de contração média da largura do bambu; Sd: desvio padrão.

Tabela A.8 - Resultados do ensaio de inchamento (largura do bambu).

Tempo (horas)	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	CP4 (%)	CP5 (%)	$i_m - Sd$	Coef. de variação
24	4,60%	4,48%	3,76%	4,24%	4,40%	$4,30 \pm 0,33$	7,66%
48	5,82%	4,83%	5,28%	5,61%	5,97%	$5,50 \pm 0,45$	8,27%
72	6,34%	5,76%	5,51%	6,87%	6,27%	$6,15 \pm 0,53$	8,66%
96	10,60%	8,82%	9,07%	9,01%	9,18%	$9,33 \pm 0,72$	7,69%

Legenda: CP: corpo de prova; i_m : taxa de inchamento média da largura do bambu; Sd: desvio padrão.

Tabela A.9 - Resultados do ensaio de contração (largura do bambu).

Tempo (horas)	CP1 (%)	CP2 (%)	CP3 (%)	CP4 (%)	CP5 (%)	$i_m - Sd$	Coef. de variação
24	4,37%	4,10%	3,90%	4,43%	3,95%	$4,15 \pm 0,24$	5,75%
48	6,48%	5,42%	5,58%	5,61%	5,05%	$5,63 \pm 0,53$	9,34%
72	7,13%	5,65%	5,88%	5,83%	6,00%	$6,10 \pm 0,59$	9,68%
96	9,66%	8,29%	8,48%	8,28%	8,68%	$8,68 \pm 0,57$	6,62%

Legenda: CP: corpo de prova; i_m : taxa de contração média da largura do bambu; Sd: desvio padrão.

Tabela A.10 - Resultados do ensaio de resistência à compressão do bambu.

Amostra	$A_{efetiva}$ (mm ²)	P_u (kN)	σ_c (MPa)	$\sigma_{c,m} - Sd$	Coef. de variação
SN1	4373,16	150,54	34,42	$40,32 \pm 6,81$	16,89%
SN2	2949,39	117,38	39,80		
SN3	3067,64	152,48	49,71		
SN4	3975,30	146,80	36,93		
SN5	4232,29	151,82	35,87		
SN6	5654,59	245,89	43,48		
SN7	4805,95	155,07	32,27		
SN8	4556,77	228,27	50,10		
CN1	4054,57	141,59	34,92	$39,63 \pm 4,74$	11,97%
CN2	4651,49	157,82	33,93		
CN3	3885,10	141,98	36,55		
CN4	3588,86	134,21	37,40		
CN5	3287,76	144,15	43,84		
CN6	3157,09	128,50	40,70		
CN7	4718,29	224,44	47,57		
CN8	5818,40	245,30	42,16		

Legenda: SN: sem nó; CN: com nó. ; $A_{efetiva}$: Seção transversal efetiva; P_u : carga última; σ_c : resistência à compressão; $\sigma_{c,m}$: resistência à compressão média; Sd: desvio padrão.

Tabela A.11 - Resultados do ensaio de resistência à tração do bambu.

Amostra	A (mm ²)	P _u (kN)	σ_t (MPa)	E (GPa)	$\sigma_{t,m} - Sd$	Coef. de variação*	E _m - Sd	Coef. de variação**
SN1	173,94	33,90	194,90	20,20				
SN2	198,15	36,25	182,94	18,69				
SN3	188,25	35,70	189,64	18,77				
SN4	174,87	27,95	159,83	17,03				
SN5	177,52	30,35	170,96	20,74	182,42 ± 12,86	7,05%	19,25 ± 1,53	7,95%
SN6	130,75	24,45	187,00	18,59				
SN7	178,55	35,45	198,55	22,14				
SN8	148,84	28,00	188,12	18,13				
SN9	180,49	30,65	169,81	19,01				
CN1	215,21	32,45	150,78	14,59				
CN2	199,90	20,00	100,05	11,98				
CN3	205,77	29,95	145,55	14,67				
CN4	157,89	19,25	121,92	13,06				
CN5	150,18	16,10	107,21	12,33	107,90 ± 27,79	25,75%	12,47 ± 1,49	11,97%
CN6	156,33	13,75	87,95	11,66				
CN7	381,12	28,20	73,99	10,44				
CN8	390,45	42,60	109,10	12,79				
CN9	334,74	24,95	74,54	10,73				

Legenda: SN: sem nó; CN: com nó; A: Seção transversal do bambu; P_u: carga última; σ : resistência à tração; E módulo de elasticidade; $\sigma_{t,m}$: resistência à tração média; E_m: módulo de elasticidade médio; *referente à resistência; **referente ao módulo; Sd: desvio padrão.

Tabela A.12 - Resultados do ensaio de arrancamento das amostras sem nó.

Amostra	e (mm)	L (mm)	l _b (mm)	P _u (kN)	τ _b (MPa)	τ _{b,m} - Sd	Coef. de variação
ASN 1	9,0	19,0	200,0	5,70	0,51		
ASN 2	9,0	19,0	200,0	6,95	0,62	0,60 ± 0,06	10,64%
ASN 3	9,0	19,0	200,0	7,35	0,66		
ASN4	8,0	20,0	200,0	6,95	0,62		
ASNED 1	8,0	19,0	200,0	8,25	0,76		
ASNED 2	8,0	20,0	200,0	9,20	0,82	0,83 ± 0,20	23,67%
ASNED 3	8,0	19,0	200,0	9,70	0,90		
ASNED 4	8,0	23,0	200,0	5,60	0,45*		
ASNES 1	8,0	20,0	200,0	10,60	0,95		
ASNES 2	8,0	21,0	200,0	15,85	1,37	0,97 ± 0,28	28,40%
ASNES 3	9,0	21,0	200,0	8,80	0,73		
ASNES 4	8,0	22,0	200,0	10,15	0,85		

Legenda: e: espessura; L: largura; P_u: carga última; τ_b: tensão de aderência; τ_{b,m}: tensão de aderência média; Sd: desvio padrão.

Tabela A.13 - Resultados do ensaio de arrancamento das amostras com nó.

Amostra	e (mm)	L (mm)	l _b (mm)	P _u (kN)	τ _b (MPa)	τ _{b,m} - Sd	Coef. de variação
ACN 1	9,0	22,0	200,0	9,75	0,79		
ACN 2	9,0	23,0	200,0	11,35	0,89	0,85 ± 0,08	9,15%
ACN 3	10,0	22,0	200,0	12,00	0,94		
ACN 4	10,0	20,0	200,0	9,35	0,78		
ACNED 1	10,0	23,0	200,0	13,20	1,00		
ACNED 2	10,0	20,0	200,0	12,50	1,04	1,06 ± 0,05	4,53%
ACNED 3	9,0	20,0	200,0	12,90	1,11		
ACNED 4	10,0	21,0	200,0	13,35	1,08		
ACNES 1	9,0	23,0	200,0	12,45	0,97		
ACNES 2	10,0	19,0	200,0	12,80	1,10	1,11 ± 0,12	11,05%
ACNES 3	9,0	21,0	200,0	15,25	1,27		
ACNES 4	9,0	21,0	200,0	13,10	1,09		

Legenda: e: espessura; L: largura; P_u: carga última; τ_b: tensão de aderência; τ_{b,m}: tensão de aderência média; Sd: desvio padrão.

Tabela A.14 - Resultados do ensaio resistência à compressão do concreto aos 28 dias.

Família	Resistência à compressão (MPa)					σ _{ck,m} - Sd	Coef. de variação
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5		
ASN	26,82	28,11	29,20	26,56	27,05		
ASNES	29,50	30,00	26,70	28,33	28,68		
ASNED	29,26	27,02	29,05	28,15	29,28	28,24 ± 1,44	5,12%
ACN	30,02	31,07	30,13	26,41	27,52		
ACNES	29,37	26,39	26,08	30,04	28,21		
ACNED	27,63	26,17	28,34	29,63	26,06		

Legenda: CP: corpo de prova; f_{ck,m}: resistência à compressão característica média do concreto; Sd: desvio padrão.

APÊNDICE B - Análise estatística dos resultados

B.1 Testes de Normalidade dos resultados

Tabela B.1.1 - Teste de normalidade dos resultados de massa específica do bambu.

Família	Shapiro - Wilk	
	Estatística	P - valor
Internodal	0,908	0,472
Nodal	0,869	0,292

Tabela B.1.2 - Teste de normalidade dos resultados de absorção de água do bambu com nó.

Tempo (horas)	Shapiro - Wilk	
	Estatística	P - valor
3	0,931	0,602
6	0,986	0,965
24	0,887	0,342
48	0,892	0,367
72	0,844	0,177
96	0,825	0,129

Tabela B.1.3 - Teste de normalidade dos resultados de absorção de água do bambu sem nó.

Tempo (horas)	Shapiro - Wilk	
	Estatística	P - valor
3	0,896	0,388
6	0,941	0,672
24	0,970	0,880
48	0,981	0,940
72	0,977	0,921
96	0,974	0,901

Tabela B.1.4 - Teste de normalidade dos resultados de evaporação do bambu sem nó.

Tempo (horas)	Shapiro – Wilk	
	Estatística	P - valor
40	0,961	0,816
64	0,949	0,728
88	0,713	0,013
112	0,843	0,173
136	0,931	0,608

Tabela B.1.5 - Teste de normalidade dos resultados de evaporação do bambu com nó.

Tempo (horas)	Shapiro – Wilk	
	Estatística	P - valor
40	0,972	0,889
64	0,987	0,970
88	0,931	0,602
112	0,819	0,115
136	0,816	0,108

Tabela B.1.6 - Teste de normalidade dos resultados de inchamento (espessura do bambu).

Tempo (horas)	Shapiro – Wilk	
	Estatística	P - valor
24	0,909	0,459
48	0,879	0,303
72	0,963	0,831
96	0,698	0,009*

Tabela B.1.7 - Teste de normalidade dos resultados de contração (espessura do bambu).

Tempo (horas)	Shapiro – Wilk	
	Estatística	P - valor
24	0,982	0,943
48	0,926	0,567
72	0,975	0,906
96	0,942	0,677

Tabela B.1.8 - Teste de normalidade dos resultados de inchamento (largura do bambu).

Tempo (horas)	Shapiro – Wilk	
	Estatística	P - valor
24	0,889	0,352
48	0,944	0,697
72	0,964	0,838
96	0,726	0,018*

Tabela B.1.9 - Teste de normalidade dos resultados de contração (largura do bambu).

Tempo (horas)	Shapiro – Wilk	
	Estatística	P - valor
24	0,887	0,344
48	0,895	0,385
72	0,756	0,034*
96	0,779	0,054*

Tabela B.1.10 - Teste de normalidade dos resultados de resistência à tração do bambu.

Família	Shapiro - Wilk	
	Estatística	P - valor
Internodal	0,933	0,509
Nodal	0,931	0,488

Tabela B.1.11 - Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão do bambu.

Família	Shapiro - Wilk	
	Estatística	P - valor
Internodal	0,902	0,30
Nodal	0,952	0,732

Tabela B.1.12 - Teste de normalidade dos resultados de módulo de elasticidade do bambu.

Família	Shapiro - Wilk	
	Estatística	P - valor
Internodal	0,945	0,639
Nodal	0,940	0,583

Tabela B.1.13 - Teste de normalidade dos resultados de resistência à compressão do concreto.

Família	Shapiro - Wilk	
	Estatística	P - valor
ASN	0,889	0,354
ASNES	0,950	0,738
ASNED	0,777	0,052
ACN	0,896	0,391
ACNES	0,909	0,460
ACNED	0,924	0,556

Tabela B.1.14 - Teste de normalidade dos resultados de arrancamento bambu concreto.

Família	Shapiro - Wilk	
	Estatística	P - valor
ASN	0,834	0,178
ASNES	0,891	0,388
ASNED	0,869	0,294
ACN	0,873	0,308
ACNES	0,949	0,709
ACNED	0,994	0,979

B.2 Testes de homocedasticidade dos resultados

Tabela B.2.1 - Teste de homocedasticidade dos resultados de massa específica do bambu.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
Internodal x nodal	0,594	0,470

Tabela B.2.2 - Teste de homocedasticidade dos resultados de absorção de água do bambu.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
Internodal x nodal – 3 horas	1,625	0,238
Internodal x nodal – 6 horas	1,691	0,230
Internodal x nodal – 24 horas	0,694	0,429
Internodal x nodal – 48 horas	0,728	0,418
Internodal x nodal – 72 horas	0,443	0,524
Internodal x nodal – 96 horas	0,377	0,556

Tabela B.2.3 - Teste de homocedasticidade dos resultados de evaporação do bambu.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
Internodal x nodal – 40 horas	0,019	0,894
Internodal x nodal – 64 horas	0,416	0,537
Internodal x nodal – 88 horas	0,146	0,713
Internodal x nodal – 112 horas	0,121	0,737
Internodal x nodal – 136 horas	0,189	0,675

Tabela B.2.4 - Teste de homocedasticidade dos resultados de inchamento do bambu.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
Espessura x largura – 24 horas	0,009	0,927
Espessura x largura – 48 horas	0,562	0,475
Espessura x largura – 72 horas	1,527	0,252
Espessura x largura – 96 horas	0,036	0,855

Tabela B.2.5 - Teste de homocedasticidade dos resultados de contração do bambu.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
Espessura x largura – 24 horas	0,059	0,814
Espessura x largura – 48 horas	0,043	0,840
Espessura x largura – 72 horas	0,107	0,752
Espessura x largura – 96 horas	0,005	0,946

Tabela B.2.6 - Teste de homocedasticidade dos resultados de resistência à tração do bambu.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
Internodal x nodal	3,386	0,084

Tabela B.2.7 - Teste de homocedasticidade dos resultados de módulo de elasticidade do bambu.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
Internodal x nodal	0,022	0,883

Tabela B.2.8 - Teste de homocedasticidade dos resultados de resistência à compressão do bambu.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
Internodal x nodal	0,834	0,377

Tabela B.2.9 - Teste de homocedasticidade dos resultados de resistência à compressão do concreto.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
ASN x ASNED x ASNES x ACN x ACNED x ACNES	0,468	0,797

Tabela B.2.10 - Teste de homocedasticidade dos resultados de arrancamento bambu concreto.

Tipo de comparação	Levene	
	Estatística	P - valor
ASN x ASNED x ASNES	1,020	0,398
ACN x ACNED x ACNES	0,630	0,557
ASN x ACN	0,922	0,374
ASNED x ACNED	1,424	0,278
ASNES x ACNES	0,963	0,364

B.3 Análise de variância para comparações até 2 categorias independentes (n= 2).

Tabela B.3.1 - Teste t - Student dos resultados de massa específica do bambu

Tipo de comparação	Teste t - Student				
	Limite inferior	Limite superior	Nível de confiança	Estatística	P - valor
Internodal x nodal	-0,021	0,083	95%	1,462	0,194

Tabela B.3.2 - Teste t - Student dos resultados de absorção de água do bambu.

Tipo de comparação	Teste t - Student				
	Limite inferior	Limite superior	Nível de confiança	Estatística	P - valor
Internodal x nodal – 3 horas	3,111E-04	0,044	95%	2,339	0,047
Internodal x nodal – 6 horas	- 0,005	0,050	95%	1,870	0,098
Internodal x nodal – 24 horas	- 0,018	0,114	95%	1,690	0,130
Internodal x nodal – 48 horas	-0,048	0,123	95%	1,002	0,345
Internodal x nodal – 72 horas	- 0,065	0,135	95%	0,799	0,447
Internodal x nodal – 96 horas	- 0,078	0,141	95%	0,665	0,525

Tabela B.3.3 - Teste t - Student dos resultados de evaporação do bambu.

Tipo de comparação	Teste t - Student				
	Limite inferior	Limite superior	Nível de confiança	Estatística	P - valor
Internodal x nodal – 40 horas	0,02	0,15	95%	3,181	0,013
Internodal x nodal – 64 horas	0,02	0,21	95%	2,804	0,023
Internodal x nodal – 112 horas	0,04	0,21	95%	3,525	0,008
Internodal x nodal – 136 horas	- 0,04	0,16	95%	1,298	0,231

Tabela B.3.4 - Teste de Wilcoxon dos resultados de evaporação do bambu.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Wilcoxon		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
Internodal x nodal – 88 horas	0,063	0,240	95%	25	0,008

Tabela B.3.5 - Teste t - Student dos resultados de inchamento do bambu.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Test t - Student		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
Espessura x largura – 24 horas	0,006	0,015	95%	5,059	9,777E-04
Espessura x largura – 48 horas	0,016	0,027	95%	8,755	2,270E-05
Espessura x largura – 72 horas	0,034	0,056	95%	9,454	1,289E-05

Tabela B.3.6 - Teste Wilcoxon dos resultados de inchamento do bambu.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Test t - Student		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
Espessura x largura – 96 horas	0,043	0,079	95%	25	0,0079

Tabela B.3.7 - Teste t - Student dos resultados de contração do bambu.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Test t - Student		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
Espessura x largura – 24 horas	5,335E-03	1,286E-02	95%	5,576	5,248E-04
Espessura x largura – 48 horas	8,938E-03	2,247E-02	95%	5,353	6,837E-04
Espessura x largura – 96 horas	3,869E-02	5,580E-02	95%	12,736	1,361E-06

Tabela B.3.8 - Teste Wilcoxon dos resultados de contração do bambu.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Test t - Student		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
Espessura x largura – 72 horas	0,042	0,064	95%	25	0,008

Tabela B.3.9 - Teste t - Student dos resultados de resistência à tração do bambu.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Test t - Student		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
Internodal x nodal	52,882	96,153	95%	7,301	1,777E-06

Tabela B.3.10 - Teste t - Student dos resultados de módulo de elasticidade do bambu.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Test t - Student		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
Internodal x nodal	5,273	8,294	95%	9,521	5,410E-08

Tabela B.3.11 - Teste t - Student dos resultados de resistência à compressão do bambu.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Test t - Student		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
Internodal x nodal	- 5,606	6,984	95%	0,235	0,818

Tabela B.3.12 - Teste t - Student dos resultados de arrancamento.

Tipo de comparação	Limite inferior	Limite superior	Test t - Student		
			Nível de confiança	Estatística	P - valor
ASN x ACN	- 0,369	- 0,123	95%	4,889	2,741E-03
ASNE x ACNE	- 0,571	- 0,077	95%	3,210	0,018
ASNES x ACNES	- 0,507	0,233	95%	- 0,904	0,401

B.4 Análise de variância para comparações com mais de duas categorias independentes ($n > 2$).

Tabela B.4.1 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de resistência à compressão do concreto.

ANOVA					
	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística	P-valor
Fator	5	9,706	1,941	0,880	0,509
Resíduos	24	52,947	2,206		

Tabela B.4.2 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de arrancamento (família sem nó).

ANOVA					
	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística	P-valor
Fator	2	0,280	0,140	4,464	0,050
Resíduos	8	0,250	0,031		

Tabela B.4.3 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados de arrancamento (família sem nó).

Comparações múltiplas				
Níveis	Centro	Limite inferior	Limite superior	P-valor
ASNED – ASN	0,226	- 0,160	0,612	0,272
ASNES – ASN	0,371	0,014	0,729	0,042
ASNES - ASNED	0,145	- 0,241	0,531	0,555

Tabela B.4.4 - Teste Tukey (ANOVA) dos resultados de arrancamento (família com nó).

ANOVA					
	Grau de Liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estatística	P-valor
Fator	2	0,154	0,077	9,904	0,005
Resíduos	9	0,070	0,008		

Tabela B.4.5 - Teste Tukey (comparações múltiplas) dos resultados de arrancamento (família com nó).

Comparações múltiplas				
Níveis	Centro	Limite inferior	Limite superior	P-valor
ACNED – ACN	0,210	0,036	0,384	0,020
ASNES – ACN	0,262	0,088	0,436	0,006
ACNES - ACNED	0,052	- 0,122	0,226	0,692