UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DOUGLAS MATEUS DE LIMA

Avaliação da variação dimensional do bambu *Dendrocalamus giganteus* em contato com meios aquosos

Caruaru, 2010

DOUGLAS MATEUS DE LIMA

Avaliação da variação dimensional do bambu *Dendrocalamus giganteus* em contato com meios aquosos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Engenharia/Engenharia Civil/Estruturas/Estruturas de Madeira

Orientador: Prof. Dr. Humberto Correia Lima Júnior

Caruaru, dezembro de 2010

Catalogação na fonte
Bibliotecário Elilson Rodrigues Góis, CRB4 -1687

L732a Lima, Douglas Mateus de.
Avaliação da variação dimensional do bambu *Dendrocalamus giganteus* em contato com meios aquosos / Douglas Mateus de Lima – Caruaru: O autor, 2010.
48 p. : il. ; 30 cm.
Inclui bibliografia.

Orientador: Humberto Correia Lima Júnior
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA. Engenharia Civil, 2010.

1. Concreto. 2. Construção civil - bambu. 3. Engenharia. 4. Água - Uso. 5. UFPE/CAA – Graduação. I. Lima Júnior, Humberto Correia (Orientador). II. Título. III. Bambu *Dendrocalamus giganteus*

620 CDD (22.ed.) UFPE (CAA 2010-81)

DOUGLAS MATEUS DE LIMA

AVALIAÇÃO DA MUDANÇA DIMENSIONAL DO BAMBU *DENDROCALAMUS GIGANTEUS* EM CONTATO COM MEIOS AQUOSOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.
Área de concentração: Engenharia/Engenharia Civil/Estruturas/Estruturas de Madeira.

Aprovado em: Caruaru, 13 de dezembro de 2010.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Humberto Correia Lima Júnior

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Flávio Eduardo Gomes Diniz

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof ª. Dr ª. Ana Cecília Vieira da Nóbrega

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliadora)

Prof. Dr. Osmar Veras Araujo

Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

Dedico e agradeço o presente trabalho aos meus pais, a minha noiva Marianny e a DEUS, por ser minha força de salvação.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ser a razão de minha existência, pois sem Ele coisa alguma faria sentido.

Aos meus familiares pelo apoio e compreensão, pois sem eles nada poderia realizar.

A minha noiva Marianny por sua ternura e amor, os quais aliviaram as dificuldades para efetivação deste trabalho.

Ao Professor orientador Humberto pela confiança e por não medir esforços para a execução deste trabalho.

Ao Laboratório de Modelos Reduzidos da Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE) pela doação do bambu utilizado, em especial ao professor Fábio Luiz Willrich.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Aos colegas da primeira turma de formandos da UFPE – CAA do curso de graduação em Engenharia Civil, pela ajuda para realização deste trabalho e pelos momentos inesquecíveis de descontração, que abrandavam a tensão existente.

RESUMO

Uma das deficiências do bambu reforçando vigas de concreto armado está relacionada à baixa aderência do bambu-concreto, resultante da mudança de dimensão do bambu quando em contato com meios aquosos, e da superfície lisa do bambu. A investigação aqui reportada teve como objetivo quantificar experimentalmente a variação dimensional do bambu quando em contato com o meio aquoso. Para tanto, foram realizados: ensaios de absorção de água utilizando gravimentria e ensaios de variação dimensional em imersão em água e em argamassa aplicando extensometria. O bambu utilizado em todas as experiências foi da espécie *Dendrocalamus giganteus*. Os resultados mostram que a região nodal do bambu é cerca de 25% mais absorvente que a região internodal; além disso, as extremidades do bambu são cerca de 8 a 10 vazes mais absorventes que as laterais das varas. Em adição, constatou-se que apesar das deformações higroscópicas do bambu, quando da imersão em argamassa ser menores que as em água, os valores das deformações transversais do bambu quando dentro de argamassa, podem interferir na resistência de aderência bambu-concreto.

Palavras-chave: Bambu. Aderência. Concreto. Água. Variação dimensional.

ABSTRACT

High dimensional variation of the bamboo when in contact with fluids and its smooth surface can be responsible for a low bond between bamboo and concrete, to limit its use in reinforced beams. The research reported in this paper aimed to quantify experimentally the bamboo dimensional variation in watery environment. It was carried out: experiments water absorption and experiments dimensional variation in watery environment and in applying mortar gages. The bamboo used in all experiments was the specie *Dendrocalamus giganteus*. The results show that the nodal region of bamboo is about 25% more absorbent than the internodal region; furthermore, the ends of bamboo are about 8 to 10 times more absorbent than the sides of the sticks. In addition, it was found that although the bamboo hygroscopic deformations, when the immersion in mortar be smaller than in water, the values of the transverse deformations when the bamboo inside the mortar, can interfere with the bond strength of bamboo-concrete.

Keywords: Bamboo. Bond. Concrete. Water. Dimensional variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Área de maior incidência dos bambus. Fonte: Recht e Wetterwald[1] (1994 apud LOPES, 2002). 14

Figura 2 - A. Piso em BLC; B. Design de cadeira em BLC. Fonte: Pereira e Beraldo[2] (2007 apud CARDODO JR. 2008). 15

Figura 3 - A. Ponte Santo Antonio (foto J. Stamm); B. Estruturas de andaimes na China. Fonte: Pereira e Beraldo[2] (2007 apud CARDODO JR. 2008). 15

Figura 4 - A. Coreto em Olivença, Ilhéus-BA; B. Galpão (foto J. Stamm). Fonte: Pereira e Beraldo[2] (2007 apud CARDODO JR. 2008). 16

Figura 5 - Bicicleta de Bambu. Fonte: Da Rosa (2002). 16

Figura 6 - Macroestrutura do bambu. Fonte: Lima Jr. et alii (2000). 21

Figura 7 - Região interna do bambu. Fonte: Sánchez Cruz (2002). 24

Figura 8 - Seqüência do colmo de bambu. Fonte: Dunkelberg (1985). 24

Figura 9 - Esquema da ponte de Wheatstone. Fonte: Takeya (2000). 28

Figura 10 - Detalhe da impermeabilização: A. das extremidades; B. e das laterais da amostras. 31

Figura 11 - Corpos de prova do ensaio de absorção. 31

Figura 12 - A. Imersão das amostras em água; B. Avaliação de sua massa em balança analítica. 32

Figura 13 - A. Extensômetros instalados na ripa de bambu; B. Equipamentos utilizados para excitação e leitura da ponte de Wheatstone dos extensômetros. 33

Figura 14 - Ripas de bambu utilizadas no ensaio de variação dimensional em imersão em água. 33

Figura 15 - Conformação da montagem da ponte de Wheatstone. 33

Figura 16 - Corpo de prova do ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa após a realização do ensaio. 35

Figura 17 - Ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa após argamassa endurecida. 35

Figura 18 - Fôrmas do ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa. 35

Figura 19 - Diagrama taxa de umidade versus tempo: A. bambu sem nó; B. bambu com nó. 37

Figura 20 - Diagrama variação da taxa de umidade por unidade de área versus tempo: A. bambu sem nó e tempo de ensaio de 24 h; B. bambu sem nó e tempo de ensaio de 60 min; C. bambu com nó e tempo de ensaio de 24 h; D. bambu com nó e tempo de ensaio de 60 min. 38

Figura 21 - Penetração de água pela face da extremidade do bambu. 39

Figura 22 - Diagrama deformação vs. tempo: A. valores das deformações nas duas posições de avaliação; B. médias dos valores das deformações nas duas posições de avaliação. 40

Figura 23 - Diagrama deformação vs. tempo: A. deformação longitudinal para argamassa 1; B. deformação longitudinal para argamassa 2. 41

Figura 24 - Diagrama deformação vs. tempo: A. deformação transversal para argamassa 1; B. deformação transversal para argamassa 2. 42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Energia necessária na produção dos materiais. 18

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos constituintes do bambu. Fonte: Pakotiprapha, Pama and Lee [4](1983 apud LIMA JR. et alii, 2000). 22

Tabela 3 - *Gage factor* para diverdos materiais. Fonte: Takeya (2000). 28

Tabela 4 - Dimensões das amostras do ensaio de absorção. 39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnicas
BLC	Bambu Laminado Colado
CAA	Centro Acadêmico do Agreste
CN	amostra com a presença da região nodal (com nó)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP II F - 32	Cimento Portland composto com Fíler – com resistência mínima à compressão de 32 MPa aos 28 dias
LONG_EXTR_IMPER	extensômetro da extremidade impermeável na direção longitudinal
LONG_EXTR_PER	extensômetro da extremidade permeável na direção longitudinal
SN	amostra sem a presença da região nodal (sem nó)
TRANS_EXTR_IMPER	extensômetro da extremidade impermeável na direção transversal
TRANS_EXTR_PER	extensômetro da extremidade permeável na direção transversal
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UNIOESTE	Universidade Estadual do Oeste do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

kN/m^3	quilo newton por metro cúbico
m	metro
MJ	mega joule
m^3	metro cúbico
MPa	mega pascal
CO_2	gás carbônico
GPa	giga pascal
A	área da seção uniforme
l	comprimento
ρ	resistividade do material
ε	deformação
Δl	variação de comprimento
ΔR	variação de resistência elétrica
R	resistência elétrica
dR	diferencial da resistência elétrica
dl	diferencial do comprimento
$d\rho$	diferencial da resistividade
dA	diferencial da área
V	volume
dV	diferencial do volume
ν	coeficiente de Poisson
k	*gage factor*
R_1	resistência do resistor 1
R_2	resistência do resistor 2
R_3	resistência do resistor 3
R_4	resistência do resistor 4

R_5	resistência do resistor 5
R_6	resistência do resistor 6
R_{2e}	resistência equivalente entre R_2 e R_5
R_{3e}	resistência equivalente entre R_3 e R_6
$R_{1,0}$	resistência do resistor 1 antes da deformação
$R_{1,\varepsilon}$	resistência do resistor 1 após a deformação
Ni	níquel
Cu	cobre
Cr	cromo
Mo	molibdênio
Fe	ferro
Al	alumínio
Pt	platina
W	tungstênio
ΔE	variação de tensão
V_{AC}	tensão entre os pontos A e C
mm	milímetro
kg dm^{-3}	quilograma por decímetro cúbico
min	minuto
cm	centímetro
° C	grau Celsius
h	hora
mg	miligrama
L	litro
mm^2	milímetro quadrado
s	segundo
Ω	ohm

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Justificativa 16
1.2 Motivação 18
1.3 Objetivos Geral e Específicos 19
1.3.1 Objetivo Geral 19
1.3.2 Objetivos secundários 20
2 REFERENCIAL TEÓRICO 21
2.1 Morfologia do bambu 21
2.2 Crescimento do bambu 23
2.3 Características dos colmos de bambu 24
2.4 Extensometria 25
2.4.1 Introdução 25
2.4.2 Princípio de funcionamento 26
2.4.3 Montagem dos extensômetros em ponte de Wheatstone 28
3 METODOLOGIA DO TRABALHO 30
3.1 Material utilizado 30
3.2 Ensaio de absorção de água 30
3.3 Ensaio de variação dimensional em imersão em água 32
3.4 Ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa 34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 37
4.1 Ensaio de absorção de água 37
4.2 Ensaio de variação dimensional em imersão em água 39
4.3 Ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa 41
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 43
REFERÊNCIAS 44

1 INTRODUÇÃO

Em vários países a utilização do bambu tem tradição de milhares de anos. Na Ásia, têm-se exemplos claros, de arquitetura e engenharia com bambu, como também em templos japoneses, chineses e indianos. O *Taj Mahal* teve sua abóboda estruturada por metal recentemente, quando substituíram a antiga estrutura de bambu. As pontes de bambu na China são fabulosas, com vãos enormes e tracionadas com cordas de bambu. Na África, assim como na Colômbia, encontram-se muitas edificações populares construídas com bambu. Sítios arqueológicos no Equador mostram que o bambu é utilizado há cerca de 5000 anos na América do Sul (NAVARRO, 2002).

O bambu é um material vegetal, cujas propriedades mecânicas indicam grande potencial a ser explorado pela engenharia. A planta apresenta longos colmos, ocos no interior, os quais são fechados a intervalos mais ou menos regulares, por um diafragma nas regiões dos nós; suas paredes têm excelente resistência à tração e à compressão, comparáveis às mais nobres madeiras ressaltando-se, ainda, seu baixo peso específico, da ordem de 8,5 kN/m^3 (LIMA JR. et alii, 2000).

O bambu está disseminado em quase todos os continentes, principalmente em florestas tropicais na larga faixa equatorial de 40º S a 40º N em até 3.000 m de altitude (Figura 1).

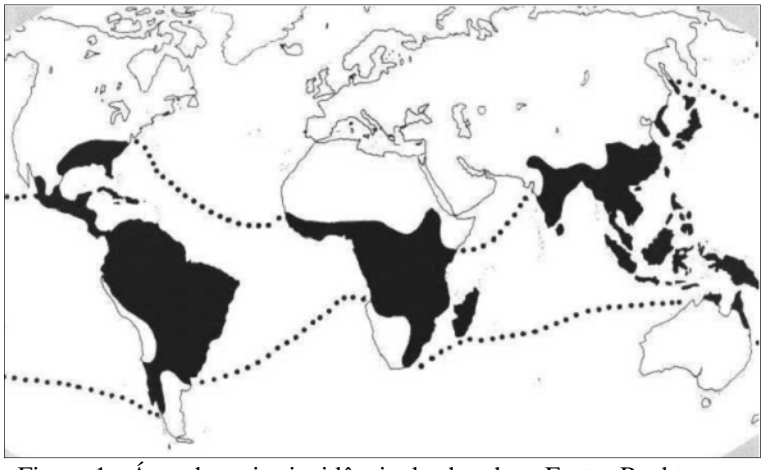


Figura 1 - Área de maior incidência dos bambus. Fonte: Recht e Wetterwald[1] (1994 apud LOPES, 2002).

Percebe-se que as diversas espécies de bambu têm abundantes aplicações na atividade humana. Em países orientais, os bambus são aplicados **na construção de casas, móveis** (Figura 2B)**, cercas, pontes** (Figura 3A)**, utensílios domésticos, vasos para armazenamento**

[1] RECHT, C.; WETTERWALD, M. F. **Bamboos**. London: B.T. Batsford Ltd, 1994.

de água, ladrilhos para piso (Figura 2A)**, galpões** (Figura 4B)**, brinquedos** (Figura 5)**, instrumentos musicais, produção de papel (celulose) etc**. A eficiência deste material para a construção civil é evidenciada considerando a durabilidade das obras construídas pelos asiáticos (exemplo do *Taj Mahal* anteriormente citado). Em alguns países da América do Sul com fartura do material, como Colômbia, Peru e Equador, várias aplicações têm sido exploradas, principalmente na construção de paredes, muros e andaimes. A Colômbia é o país da América Latina que mais utiliza o bambu na construção popular de habitações. A fim de solucionar os problemas habitacionais na Colômbia, vem se desenvolvendo programas governamentais que incentivam o uso deste material. O Brasil possui registros que mostram a eficiência do bambu. Nos últimos anos, seu emprego vem ganhando importância econômica e espaço na construção civil. No meio rural está sendo usado em cercas, paredes de pau a pique, tubulações para irrigação, etc (SÁNCHEZ CRUZ, 2002, grifo nosso).

Construções de grande porte como casas, pousadas e lojas que contribuem acima de tudo, para melhorar a qualidade de vida das pessoas, afirmam o predicado e beleza do bambu como material de construção.

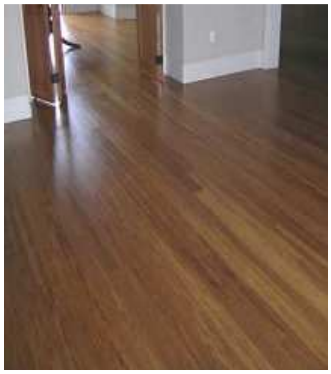
A.  B.

Figura 2 – A. Piso em BLC; B. *Design* de cadeira em BLC. Fonte: Pereira e Beraldo[2] (2007 apud CARDODO JR. 2008).

A. B.

Figura 3 – A. Ponte Santo Antonio (foto J. Stamm); B. Estruturas de andaimes na China. Fonte: Pereira e Beraldo[2] (2007 apud CARDODO JR. 2008).

[2] PEREIRA, M. A. dos R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma.** Bauru: Ed. Canal 6, 2007. 239p.

A. B.

Figura 4 – A. Coreto em Olivença, Ilhéus-BA; B. Galpão (foto J. Stamm). Fonte: Pereira e Beraldo[2] (2007 apud CARDODO JR. 2008).

Figura 5 – Bicicleta de Bambu. Fonte: Da Rosa (2002).

1.1 Justificativa

O princípio básico do concreto armado consiste no aproveitamento da capacidade do concreto resistir aos esforços de compressão, e o reforço aos esforços de tração. De acordo com Lima Jr. et alii (2000) o bambu apresenta resistência à tração suficiente para trabalhar como reforço em estruturas de concreto armado, motivo pelo qual a possibilidade da sua utilização para esta finalidade vem sendo estudada desde o início do século passado (GEYMAYER; COX, 1970). Apesar desse fato, a utilização do bambu como reforço tem sido limitada devido a problemas intrínsecos e esse material, entre os quais se destacam: a baixa aderência bambu-concreto, a dificuldade no dobramento das varas de bambu para formação de ganchos de ancoragem, a variação da resistência à tração e do módulo de elasticidade nas

regiões nodal e internodal do bambu e a vulnerabilidade desse material a ataques de fungos e insetos (KURIAN; KALAM, 1977; GHAVAMI, 1995).

Para que uma estrutura de concreto armado responda adequadamente às solicitações impostas, a transferência de forças entre o concreto e o reforço deve ser eficiente (MACGREGOR, 1997). O elemento responsável por essa transferência é a aderência concreto-reforço, que é ativada após a fissuração do concreto. Este mecanismo garante a compatibilidade de deformações entre os dois materiais e, consequentemente, que a estrutura continue a resistir aos esforços solicitantes, mesmo para estágios avançados de fissuração do elemento estrutural (PARK; PAULAY, 1975). Diversos pesquisadores vêm estudando o problema da baixa aderência bambu-concreto (GHAVAMI; HOMBECK, 1981; BERALDO, 1987; FERRÃO; FREIRE, 1995; LIMA JR. et alii, 1996; DA ROSA, 2002); entretanto, Czarnieski et alii (2004) verificaram que a maioria desses trabalhos apresenta problemas em suas metodologias experimentais e mostra que a tensão de aderência de dimensionamento entre o bambu e o concreto é cerca de 20% inferior àquela entre o aço liso e o concreto, ou seja, a tensão de aderência de dimensionamento bambu-concreto é igual a 80% desta tensão entre o aço liso e o concreto. Além disso, segundo Ghavami (1995), Lopes et alii (2002), o bambu, quando utilizado como reforço no concreto, absorve a água da mistura, aumentando de volume e voltando às dimensões originais, após secagem; isto faz com que, a aderência entre os dois materiais seja prejudicada. Apesar deste último fato, não foram encontrados, na literatura nacional nem na internacional, trabalhos que quantifiquem a taxa de variação dimensional do bambu imerso no concreto nem, tampouco, o valor da perda de aderência devido a esse efeito higroscópico.

Uma solução que pesquisadores têm dado ao problema é a utilização de tratamentos que consistem 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 é o uso de materiais termoplásticos que se fluidificam com a elevação da temperatura, como é o caso do asfalto. Com base nisto, nota-se que, em sua grande totalidade, os resultados obtidos foram piores que aqueles com o bambu sem tratamento; em outros casos, as resinas utilizadas foram epoxídicas, casos em que se observam elevações acentuadas na tensão de aderência bambu-concreto, porém o custo financeiro dessas resinas é elevado e torna a utilização do bambu mais cara que a do aço (GHAVANI; HOMBECK, 1981; BERALDO, 1987; FERRÃO;

FREIRE, 1995; GHAVANI, 1995; LIMA JR. et alii, 1996; LOPES et alii, 2002; DA ROSA, 2002).

Com base no exposto, verifica-se que a questão da aderência bambu-concreto é complexa e que se tornam necessários maiores estudos para tentar solucionar as questões levantadas. Assim, este Trabalho de Conclusão de Curso visa à quantificação das taxas de variação dimensionais do bambu na presença de ambientes aquosos.

1.2 Motivação

O pico de crescimento da população mundial ocasiona um aumento no consumo de madeira: o desmatamento das florestas tropicais já ocorre à taxa de 16 milhões de hectares por ano, hoje, tais florestas representam menos de 900 milhões de hectares, o que equivale a uma redução de 40% da área original (DA ROSA, 2002). A larga utilização do bambu é uma medida para redução do consumo excessivo dos recursos, tais como: ferro, alumínio e madeira escassa. Segundo Da Rosa (2002) as três grandes vantagens do bambu sobre os outros materiais são:

a) o colmo do bambu morre em torno dos sete anos de idade, a colheita estimula o nascimento de novos colmos. Depois de retirado do bambuzal pode durar até 40 anos se for tratado com preservativos;
b) adquire resistência estrutural rapidamente, após três anos de idade;
c) o gasto energético na produção do bambu é bem inferior aos demais materiais, como demonstra a Tabela 1.

Tabela 1 - Energia necessária na produção dos materiais.
Fonte: Da Rosa (2002).

MATERIAL	MJ/m³ MPa
Aço	1500
Concreto	240
Madeira	80
Bambu	30

Para Moreira[3] (1991 apud DA ROSA, 2002) as indústrias de aço não só poluem a atmosfera com CO_2, como também reduzem as reservas de minério de ferro e carvão, além de

[3] MOREIRA, L. E. **Desenvolvimento de estruturas treliçadas espaciais de bambu**. Rio de Janeiro, 1991. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

utilizarem petróleo para produção e transporte, ou seja, estas indústrias são algumas das principais responsáveis pela escassez dos materiais não-renováveis.

Desta forma, a utilização do bambu visa atingir níveis de desenvolvimento sustentável, os quais são conseguidos por poucos materiais. Reduzindo a poluição através da diminuição do consumo de energia e da conservação dos recursos naturais, mantendo um ambiente salubre.

Além disso, a utilização do bambu traz uma série de outras vantagens listadas a seguir:

- é econômico: sua produção é realizada por processos fotossintéticos, não precisa de reflorestamento;
- material leve, fácil de ser transportado e armazenado;
- pode ser cortado com ferramentas simples e manuais;
- altamente produtivo e de fácil disponibilidade;
- adquire resistência mecânica em aproximadamente três anos;
- é encontrado em quase todo o mundo de forma abundante.

Para realização deste trabalho foi escolhida a espécie *Dendrocalamus giganteus* (Bambu gigante), em função de suas propriedades físico-mecânicas e facilidade de obtenção. E apresenta as seguintes características que indicam o seu potencial para ser utilizado como material de construção a ser explorado pela engenharia:

- colmos com grandes dimensões, podendo alcançar até 20 m;
- grande espessura da parede dos colmos em relação as demais espécies, variando de 1 cm a 2 cm;
- grande comprimento dos internós, variando entre 40 cm a 50 cm;
- aproveitamento quase total do colmo.

1.3 Objetivos Geral e Específicos

1.3.1 Objetivo Geral

Quantificar a taxa de variação dimensional de varas de bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus* na presença de ambientes aquosos.

1.3.2 Objetivos secundários

- Estudar as propriedades mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus*;
- Desenvolver um procedimento de avaliação da mudança de dimensões das varas de bambu;
- Publicar os resultados nos meios científicos especializados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Morfologia do bambu

Segundo Lima Jr. et alii (2000) o bambu é por natureza um material compósito, seu colmo é formado por fibras, vasos e condutores de seiva, que estão distribuídos não uniformemente na seção transversal, embebidos em um tecido de preenchimento, uma espécie de matriz, denominado *Parenchyma*.

Cerca de 40% do colmo do bambu é formado por *Parenchyma*, 50% por fibras e 10% por vasos e condutores de seiva conforme apresentado na Figura 6. Estas porcentagens variam de espécie para espécie de bambu, influenciando as propriedades físicas e mecânicas, como por exemplo: densidade, retração, resistência à tração, resistência à compressão, módulo de elasticidade longitudinal e transversal, entre outras.

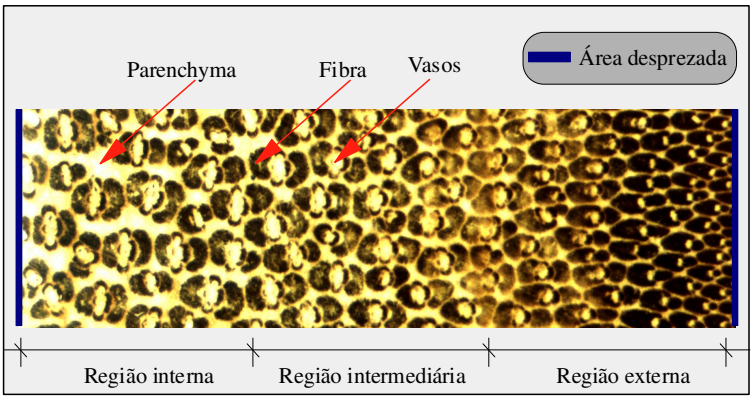


Figura 6 - Macroestrutura do bambu. Fonte: Lima Jr. et alii (2000).

O *Parenchyma* é formado por células pouco rígidas, de paredes muito finas constituídas basicamente de celulose e cheias por Lignina. Suas células são conectadas umas as outras através de cavidades. O *Parenchyma* confere certa plasticidade à planta e é o tecido mais fraco do bambu. Sua função é armazenar reservas nutritivas que o vegetal necessita.

O sistema vascular do bambu é composto de duas partes: o *Pholem*, formado por longas células de paredes finas, constituídas principalmente por Lignina, e responsável pelo transporte de material nutritivo para as partes superiores do bambu; e o *Xylen*, formado por células de paredes espessas, de composição complexa, que está localizado dentro do *Pholen*, e é responsável pelo transporte de água e minerais.

As fibras são formadas por células mortas (*Sclerenchyma*), de grande comprimento, de paredes constituídas principalmente por celulose. Elas são responsáveis pelas propriedades mecânicas da planta. A Tabela 2 apresenta algumas propriedades mecânicas dos elementos descritos acima.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos constituintes do bambu. Fonte: Pakotiprapha, Pama and Lee[4] (1983 apud LIMA JR. et alii, 2000).

Material	**Módulo de elasticidade longitudinal (GPa)**	**Resistência à tração longitudinal (MPa)**	**Coeficiente de Poisson**
Fibra	37,0	442,0	0,24
Vasos	≈ 0,0	≈ 0,0	-
Parenchyma	2,0	20,0	0,35

A palavra "bambu" é a nomenclatura dada às plantas da subfamília *Bambusoideae* pertencente à família das gramíneas (*Poaceae* ou *Gramineae*). É classificado como planta lenhosa, monocotiledônea, pertencente às angiospermas.

Segundo Sánchez Cruz (2002) e Nogueira (2008) a estrutura do bambu incide no sistema subterrâneo de rizomas e raízes (parte subterrânea); os colmos e os galhos (parte aérea). Todos esses constituintes são formados pela mesma lógica: uma série alternada de nós e entrenós. Com o crescimento do bambu, cada novo entrenó é envolto por uma folha caulinar protetora, fixa ao nó anterior no anel caulinar. Os nós são pedaços íntegros de tecido, compreendendo o anel nodular, o anel da bainha e uma gema dormente, que são os locais de aparecimento do novo crescimento segmentado (rizoma, colmo ou galho).

Os rizomas são caules subterrâneos que crescem, reproduzem-se e distanciam-se do bambu permitindo a propagação de novo território. Anualmente novos colmos crescem dos rizomas, para formar os constituintes aéreos das plantas. De acordo com a configuração e hábito de ramificação do rizoma os bambus podem ser classificados em três grupos principais:

a) *Leptomorfos* ou Alastrantes: tem rizomas alongados e finos, com os entrenós longos e espaçados. Os colmos são mais espessos que o rizoma. Algumas vezes a ponta do rizoma pode se tornar um novo colmo. Crescem lateral e radialmente, alastrando-se linearmente uns dos outros. São localizados geralmente nas espécies de climas temperados, como no gênero *Phyllostachys*;

[4] PAKOTIPRAPHA, B.; PAMA, R. P.; LEE, S. L.. Behavior of a bamboo fiber-cement paste composite**.** **Journal of Ferrocement**, 1983, vol. 13, n. 3.

b) *Paquimorfos* ou Torcentes: Com forma de bulbos, possuem entrenós compactos e muito curtos. A ponta é direcionada para cima e dela surge um colmo mais fino que o bulbo. Crescem alastrando-se muito pouco uns dos outros. Crescem lateral e radialmente. Podem ter gargantas curtas, médias ou longas. Encontrados em espécies tropicais, como as do gênero *Bambusa*, espécie *Dendrocalamus*, o qual foi utilizado este trabalho;

c) *Anfipoidal* ou Intermediário: Caracterizam-se por rizomas que apresentam ramificação conjugadas dos dois grupos principais em uma mesma planta. A este grupo pertencem gêneros como o *Chusquea*, ao qual corresponde elevado número de espécies desenvolvidas nas zonas montanhosas da Colômbia (LOPEZ[5], 1978 apud SÁNCHEZ CRUZ, 2002).

2.2 Crescimento do bambu

Ao contrário de outras árvores, cujo tronco cresce simultaneamente radial e verticalmente até alcançar seu completo desenvolvimento entre os 12 e 15 anos e mesmo depois de seus 100 anos, o bambu surge do solo com o diâmetro máximo que terá em sua vida, e este não aumenta com a idade, ao invés disto diminui proporcionalmente ao longo de seu comprimento. O colmo alcança sua máxima altura entre os 30 e 80 dias no grupo *leptomorfo* e entre os 80 e 180 dias no grupo *paquimorfos*. Ao término de seu crescimento começa a formação de seus ramos e folhas, o qual se conclui no primeiro ano.

Dos 4 aos 12 primeiros meses, o bambu é muito flexível, por isso é empregado na confecção de cestos e outros acessórios artesanais. À medida que atinge sua maturidade, as fibras tornam-se cada vez mais duras e resistentes até alcançar sua máxima resistência, dos três aos seis anos, idade adequada para seu uso na construção civil. Após este período, os colmos começam paulatinamente a mudar sua cor até secar completamente.

O crescimento do bambu é tão rápido que não há na natureza planta que consiga igualar-se. Em condições normais e no período de maior desenvolvimento, o crescimento em

[5] LOPEZ, O. H. **Nuevas Técnicas de construcción con Bambú**. Colombia: Estudios Tecnicos Colombianos. Ltda Bogotá, 1978. 95 p.

24 horas pode atingir de 8 a 10 cm, alcançando 40 cm em espécies como o *Dendrocalamus giganteus* (SÁNCHEZ CRUZ, 2002).

2.3 Características dos colmos de bambu

Os colmos normalmente ocos são formados por cascas em geral cilíndricas e esbeltas. O espaço vazio no interior do colmo é denominado cavidade, a qual é separada uma da outra por diafragmas (segundo Dunkelberg (1985) são os responsáveis pela maior flexibilidade e resistência dos colmos) que aparecem externamente como nós, onde surgem os galhos e as folhas (Figura 7 e Figura 8). Os entrenós possuem uma parede de espessura variável. Os colmos diferem segundo a espécie, em comprimento, diâmetro e distância internodal. Alguns colmos possuem poucos centímetros de altura e poucos milímetros de diâmetro, outros, porém, podem alcançar até 40 m de altura e 30 cm diâmetro Ghavami e Marinho[6] (2001 apud SÁNCHEZ CRUZ, 2002).

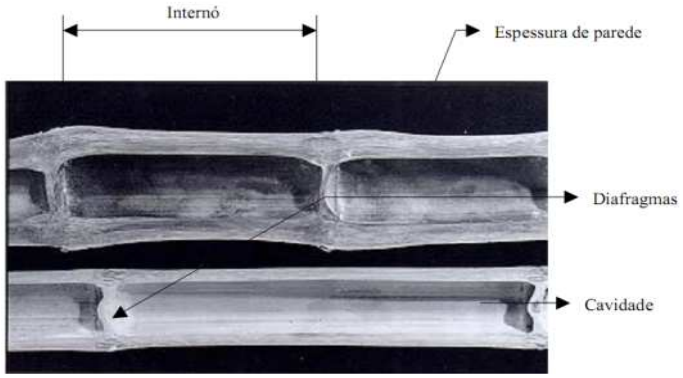


Figura 7 – Região interna do bambu. Fonte: Sánchez Cruz (2002).

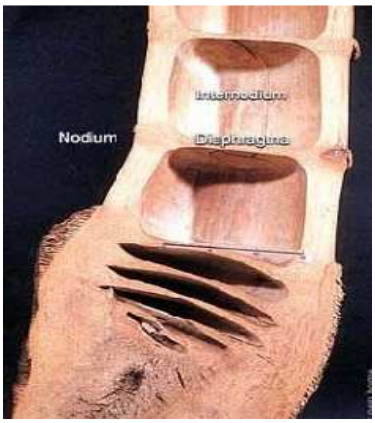


Figura 8 – Seqüência do colmo de bambu. Fonte: Dunkelberg (1985).

[6] GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Propriedades Mecânicas dos Colmos dos Bambus das Espécies**: Mosó e Guadua angustifolia para Utilização na Engenharia. Rio de Janeiro: PUC-Rio. Publicação RMNC-2 Bambu 02/2002, 2002. 90 p.

2.4 Extensometria

2.4.1 Introdução

Os extensômetros são instrumentos de medição de deformação mais versátil para maioria dos casos, por ter tamanho reduzido, base de medida de diversos comprimentos, grande precisão e sensibilidade, possibilitar a leitura à distância e aplicações em medições estáticas e dinâmicas. É também o instrumento de medição mais utilizado na análise experimental de estruturas, pois além dessas vantagens técnicas, o extensômetro elétrico de resistência tem um custo compatível com os demais custos envolvidos nesse trabalho (TAKEYA, 2000).

Segundo Andolfato, Camacho e Brito (2004), diversos métodos de inspeção não destrutivos para medidas de tensão têm sido estudados, mas apenas os extensômetros têm o mais amplo grau de aplicabilidade. Isto se deve à precisão as medidas, facilidade de manipulação e da capacidade do mesmo de monitorar as deformações até as cargas últimas em ensaios destrutivos.

Utilizam-se extensômetros para medir deformações em diferentes tipos de estruturas. Após a colagem de um extensômetro faz-se a medição, convertendo a deformação causada em uma grandeza elétrica (voltagem) e amplifica-a para leitura em um local remoto. Deformações em várias partes de uma estrutura real sob condições de serviço podem ser medidas com boa precisão sem que a estrutura seja destruída. Desta forma, pode-se realizar uma análise quantitativa da distribuição de deformação sob condições reais de operação. As características das medidas com extensômetros são elencadas abaixo:

- alta precisão;
- pequeno tamanho e pouco peso;
- excelentes respostas aos fenômenos dinâmicos;
- fácil utilização desde que conhecida a boa técnica;
- excelente linearidade;
- medições possíveis dentro de uma ampla faixa de temperatura;
- aplicáveis submersos em água ou em atmosfera de gás corrosivo desde que utilizado tratamento apropriado;

- usados como elementos transdutores para medidas de varias grandezas físicas (força, pressão, torque, aceleração, deslocamento).

2.4.2 Princípio de funcionamento

Segundo Takeya (2000), o princípio de trabalho do extensômetro está baseado na relação deformação/resistência do condutor elétrico. Todo condutor elétrico, muda sua resistência elétrica quando submetido a tensões mecânicas, sejam compressivas ou de tração. São duas as causas dessa variação: uma devido à deformação do condutor, e outra pela variação na resistividade do material condutor, resultado de mudanças micro estruturais no condutor.

Considerando um segmento de um fio condutor elétrico com seção uniforme de área representada por A, comprimento representado por l, e feito com material de resistividade representada por ρ.

Solicitando-se esse fio à tração axial (ou à compressão), observa-se que à deformação representada por ε (que é igual à variação de comprimento do fio dada por Δl dividido pelo comprimento do fio que é dado por l), causada pela solicitação, corresponde uma variação de resistência elétrica (ΔR) dividido pela resistência elétrica inicial do fio (R) que, dentro de amplos limites é sensivelmente proporcional à deformação do fio (ε).

Essa relação entre deformação (ε) e a variação da resistência elétrica por resistência elétrica inicial (ΔR/R), comprovada pela primeira vez por Lord Kelvin em suas experiências, pode ser equacionada, desta forma, a resistência elétrica de um segmento de fio é apresentada pela Eq. (1):

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} \tag{1}$$

diferenciando-se a equação Eq.(1) resulta na Eq.(2):

$$dR = \frac{A \cdot (\rho \cdot dl + l \cdot d\rho) - \rho \cdot l \cdot dA}{A^2} \tag{2}$$

e sendo o volume de um fio cilíndrico dado pela Eq.(3):

$$V = A \cdot l \tag{3}$$

diferenciando agora a Eq.(3) obtém-se a Eq.(4):

$$dV = A \cdot dl + l \cdot dA \tag{4}$$

na qual, dV é a variação do volume do fio, que também pode ser escrita em termos da deformação causada pela solicitação do fio conforme Eq.(5):

$$dV = l \cdot (1 + \varepsilon) \cdot A \cdot (1 - \nu \cdot \varepsilon)^2 - A \cdot l \tag{5}$$

na qual, ν é o coeficiente de Poisson do material do fio. Como ε é um número pequeno, pode-se eliminar o termo quadrático de ε da Eq.(5), reescrevendo a mesma com algumas simplificações, tem-se a Eq.(6):

$$dV = A \cdot l \cdot \varepsilon \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \tag{6}$$

igualando as equações (4) e (6) e após algumas simplificações, obtém-se a Eq.(7):

$$l \cdot dA = -2 \cdot \nu \cdot A \cdot dl \tag{7}$$

ao substituir a Eq.(7) na Eq.(2) e após algumas simplificações, resulta-se na Eq.(8):

$$dR = \frac{\rho \cdot dl \cdot (1 + 2 \cdot \nu)}{A} + \frac{l \cdot d\rho}{A} \tag{8}$$

Dividindo membro e membro a Eq. (8) pela Eq. (1) obtém-se a Eq.(9), a qual está em termos finitos (substitui-se o termo de diferencial "d" pelo termo de variação "Δ"):

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(1 + 2 \cdot \nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}\right) \cdot \varepsilon \tag{9}$$

O termo entre parênteses é praticamente uma constante para os valores de deformação que normalmente são medidos. Portanto a Eq. (9) pode ser escrita conforme a Eq.(10):

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \tag{10}$$

na qual, k, dado pela Eq. (11), é denominado fator do extensômetro (*gage factor*), e é composto de três parcelas que exprimem individualmente os três fenômenos físicos que causam a variação da resistência elétrica do fio solicitado: as duas primeiras correspondem ao fenômeno da variação das dimensões do fio (1 para o comprimento e 2ν para área da seção transversal); a terceira parcela corresponde ao fenômeno da variação da resistividade do material também chamado efeito piezoresistivo:

$$k = \left(1 + 2 \cdot \nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\varepsilon}\right) \tag{11}$$

Os extensômetros atualmente fabricados utilizam as ligas metálicas que apresentam o fator k entre os valores 2 e 4, conforme Tabela 3.

Tabela 3 – *Gage factor* para diverdos materiais. Fonte: Takeya (2000).

Liga metálica	Composição	Fator k
Advance ou constantã	45% Ni, 55% Cu	2,1
Nichrome V	80% Ni, 20% Cr	2,1
Isoelastic	36% Ni; 8% Cr; 0,5% Mo; 55,5% Fe	3,6
Karma	74%i Ni, 20% Cr, 3% Al, 3% Fe	2,0
Armour D	70% Fe, 20% Cr, 10% Al	2,0
Plantium tungsten	92% Pt, 8% W	4,0

2.4.3 Montagem dos extensômetros em ponte de Wheatstone

A maioria dos aparelhos utilizados para o registro das deformações indicadas por extensômetros elétricos de resistência realiza a medição das variações de resistência elétrica correspondentes, através da ponte de Wheatstone, pois este método permite medir variações muito pequenas, com precisão, além de possibilitar a correção das variações causadas pela variação de temperatura.

A ponte de Wheatstone é um circuito elétrico com quatro resistores interligados conforme a Figura 9A, no qual é aplicada uma tensão elétrica entre os pontos A e C; nesse circuito, se o produto das resistências R_1 e R_3 for igual ao produto das resistências R_2 e R_4, a tensão elétrica entre os pontos B e D será igual a zero.

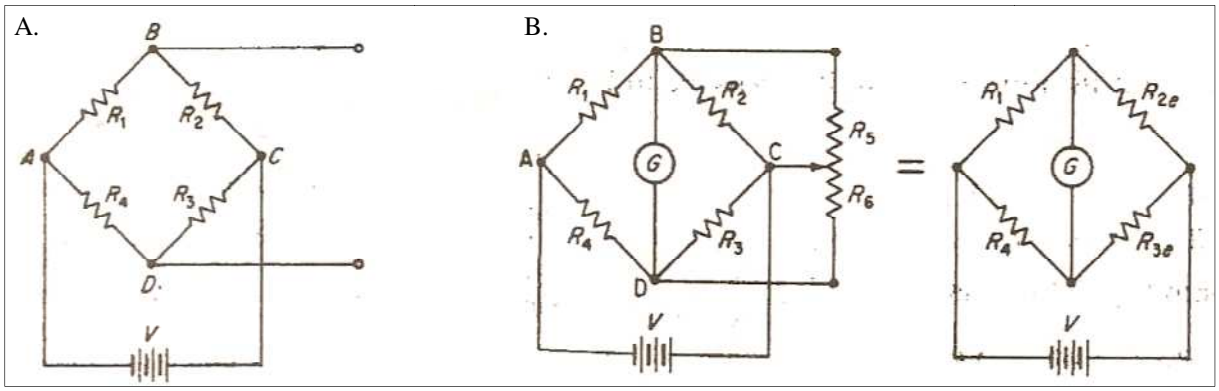


Figura 9 – Esquema da ponte de Wheatstone. Fonte: Takeya (2000).

Uma forma de realizar a medição do valor da resistência utilizando a ponte de Wheatstone é através da montagem apresentada na Figura 9B, na qual: R_1 é a resistência desconhecida que se pretende medir; R_2, R_3, e R_4 são resistências conhecidas; R_5 e R_6 são

resistências variáveis, também conhecidas, de um potenciômetro (resistor de resistência variável) conectado aos pontos B e D, o cursor móvel que faz a variação das resistências do potenciômetro é conectado ao ponto C.

Entre os pontos B e D está ligado um galvanômetro, que é um instrumento que permite detectar pequenas tensões ou correntes elétricas. Para realizar a medição, o potenciômetro é acionado movimentando-se o cursor para um sentido ou outro, até que o galvanômetro indique tensão (ou corrente) elétrica nula; nessa situação diz-se que a ponte de Wheatstone está balanceada, e então, obtém-se a Eq. (12):

$$R_1 \cdot R_{3e} = R_{2e} \cdot R_4 \tag{12}$$

na qual, R_{2e} e R_{3e} são as resistências equivalentes às associações em paralelo de R_2 com R_5 e de R_3 com R_6, respectivamente, as quais estão representadas no circuito equivalente da Figura 9B.

Sendo o resistor R_1 um extensômetro, a deformação indicada por ele seria obtida medindo-se a sua resistência antes ($R_{1,0}$) e após ($R_{1,\varepsilon}$) a deformação, e em seguida calcula-se a deformação (ε) utilizando a Eq.(10) obtendo a Eq.(13):

$$\varepsilon = \frac{R_{1,\varepsilon} - R_{1,0}}{R_{1,0}} \cdot \frac{1}{k} \tag{13}$$

No entanto, esse procedimento de medição não é prático; desta forma, os aparelhos que registram deformações indicadas por extensômetros empregam outro procedimento, mais prático, aplicando a mesma montagem ilustrada na Figura 9B, no qual mede-se a variação de tensão indicada pelo galvanômetro, que é proporcional à variação de resistência elétrica dada pelo numerador da Eq.(13). Portanto, Takeya (2000) deduz a Eq.(14) para o cálculo da deformação (ε) por meio da variação de tensão, considerando que apenas um dos resistores da ponte de Wheatstone é um extensômetro, e que os demais resistores não sofram variação de resistência, caracterizando a montagem de ¼ de ponte de Wheatstone:

$$\varepsilon = \frac{\Delta E}{V_{AC}} \cdot \frac{4}{k} \tag{14}$$

na qual, ΔE é a variação de tensão e V_{AC} é a tensão entre os pontos A e C do circuito da ponte Wheatstone (Figura 9A).

3 METODOLOGIA DO TRABALHO

3.1 Material utilizado

Para a produção das argamassas, utilizaram-se: areia quartzosa com módulo de finura de 3,76 (ABNT 248, 2003), diâmetro máximo de 2,4 mm e massa especifica aparente de 1,37 kg dm^{-3} (ABNT 52, 2009); e Cimento Portland (CP II F - 32), tendo a pasta de consistência normal (ABNT 42, 2003) apresentando tempos de início e fim de pega de 125 e 234 min, respectivamente (ABNT 65, 2003). Duas proporções em massa de materiais foram utilizadas: 1:3 (cimento:agregado miúdo) e relação água/cimento de 0,55 (argamassa 1) e 1:3 (cimento:agregado miúdo) e relação água/cimento de 0,60 (argamassa 2), para verificar se tal relação influencia na absorção de água pelas amostras de bambu. Sendo a água utilizada nos ensaios, proveniente da rede pública de abastecimento.

O bambu utilizado foi da espécie *Dendrocalamus giganteus*, cujos colmos foram cortados com idade entre dois e três anos e deixados secar a sombra, em temperatura ambiente, durante três meses. Os colmos apresentavam comprimento médio de 20 m e foram divididos em três trechos de igual comprimento, denominados: basal, intermediário e topo. Após secagem, os colmos foram serrados em comprimento longitudinal de 150 cm e, em seguida, foram extraídas lâminas de bambu com dimensões de 150 cm de comprimento; 0,82 cm de espessura e 3,11 cm de largura.

O bambu foi ensaiado por Lima Jr. et alii (2000) apresentando comportamento elástico-linear a tração até a ruptura, tanto para a região nodal como para a internodal. As resistências a tração das regiões nodal e internodal foram 97 e 277 MPa, respectivamente, e os módulos de elasticidade de 13 e 23 GPa, respectivamente.

3.2 Ensaio de absorção de água

Para o ensaio de absorção de água, foram extraídas por serragem 30 amostras das lâminas de bambu, das quais eram mensuradas as três dimensões por três vezes (utilizando um

paquímetro de 0,01 mm de sensibilidade) obtendo-se as seguintes dimensões médias de 0,78 cm de espessura; 3,09 cm de largura e 5,59 cm de comprimento e seus respectivos desvios-padrão 0,05 cm (espessura); 0,04 cm (largura), e 1,12 cm (comprimento). Sendo 15 da região nodal e 15 da região internodal. O ensaio de absorção foi dividido em três fases, sendo utilizadas 5 amostras de cada região para cada fase. Na fase 1, foram utilizadas 10 amostras sem qualquer tratamento de impermeabilização; na fase 2, as extremidades (faces perpendiculares a direção das fibras, Figura 10A) das 10 amostras foram impermeabilizadas com silicone; e por fim, na fase 3, as 10 amostras tiveram suas laterais impermeabilizadas também com silicone (faces paralelas a direção das fibras, Figura 10B). Com o estabelecimento destas 3 fases do ensaio, pôde-se verificar qual face realmente absorve mais água. Na Figura 11A são apresentados dois corpos de prova utilizados neste ensaio, sendo um da região nodal (nomeado de CN3, que significa: com nó, amostra número 3) e um da região internodal (nomeado de SN4, que significa: sem nó, amostra número 4).

A. B.

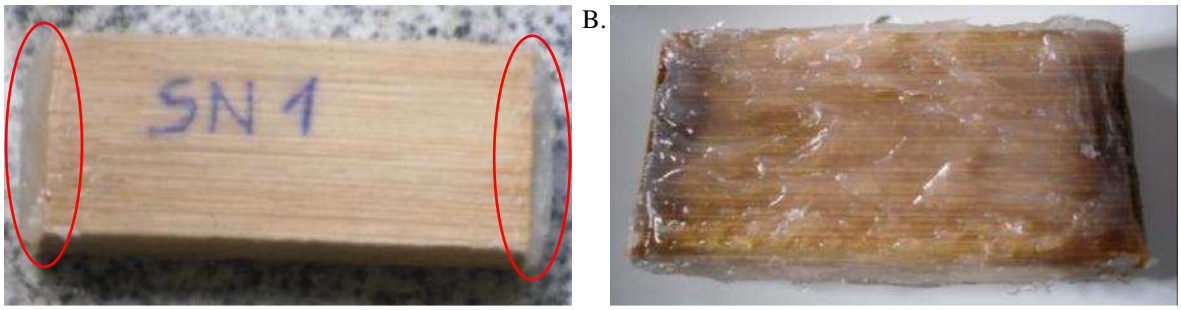


Figura 10 – Detalhe da impermeabilização: A. das extremidades; B. e das laterais da amostras.

Figura 11 - Corpos de prova do ensaio de absorção.

Para realização dos ensaios, as amostra eram secas em estufa a uma temperatura média de 70 ºC por um período de 48 h. Em seguida, suas massas foram avaliadas em uma balança analítica com precisão de 1 mg e sensibilidade de 0,1 mg.

Após medição da massa seca, as amostras com faces impermeabilizadas (fases 2 e 3 do ensaio) receberam o silicone industrial nas referidas faces e foram mantidas em local seco, com baixa umidade, até completa secagem do silicone e estabilização da temperatura das amostras, que ocorria em cerca de 30 min. Então as amostras eram imersas em água (Figura

12A) e leituras de massas eram realizadas (Figura 12B) em intervalos de 1 min durante os primeiros 5 min; em intervalos de 5 min entre o quinto e o trigésimo minuto; e em 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 e 24 h.

A. B.

Figura 12 – A. Imersão das amostras em água; B. Avaliação de sua massa em balança analítica.

3.3 Ensaio de variação dimensional em imersão em água

Para preparação dos corpos de prova para o ensaio de variação dimensional de imersão em água, quatro lâminas de bambu selecionadas, serradas, escovadas e limpas tiveram suas seções transversais medidas com paquímetro de 0,01 mm de sensibilidade a cada 25 cm ao longo do comprimento das lâminas. Os corpos de prova apresentaram dimensões de 0,82 cm de espessura; 3,11 cm de largura e 105 cm de comprimento. Foram preparados 4 corpos de prova. Uma extremidade de cada lâmina foi impermeabilizada com silicone industrial, com o objetivo de simular o comportamento de uma ripa de bambu com o dobro do comprimento de percolação a partir da extremidade da lâmina. Após secagem do silicone, foram instalados 4 extensômetros elétricos (*gage factor* = 2,12 e $R = 350\ \Omega$) em cada ripa; sendo dispostos um paralelo e outro perpendicular a direção das fibras do bambu (Figura 13A), distantes 10 cm de cada extremidade. Na Figura 14 são apresentadas as ripas de bambu prontas para serem ensaiadas.

Após a colagem dos extensômetros, toda a região instrumentada foi impermeabilizada cuidadosamente com silicone e, em seguida, protegida com uma camada de fita isolante de alta fusão e mais uma camada de fita isolante comum. Os extensômetros foram ligados a um sistema de aquisição de dados digital que se encontrava interligado a uma caixa seletora de

canais de forma a medir a leitura de um extensômetro por vez, e ambos (sistema de aquisição de dados e caixa seletora) conectados a um microcomputador (Figura 13B). O método utilizado para leitura dos extensômetros consistia em um sistema de ponte de Wheatstone completa, o qual apresenta a configuração de instalação ilustrada na Figura 15.

A. B.

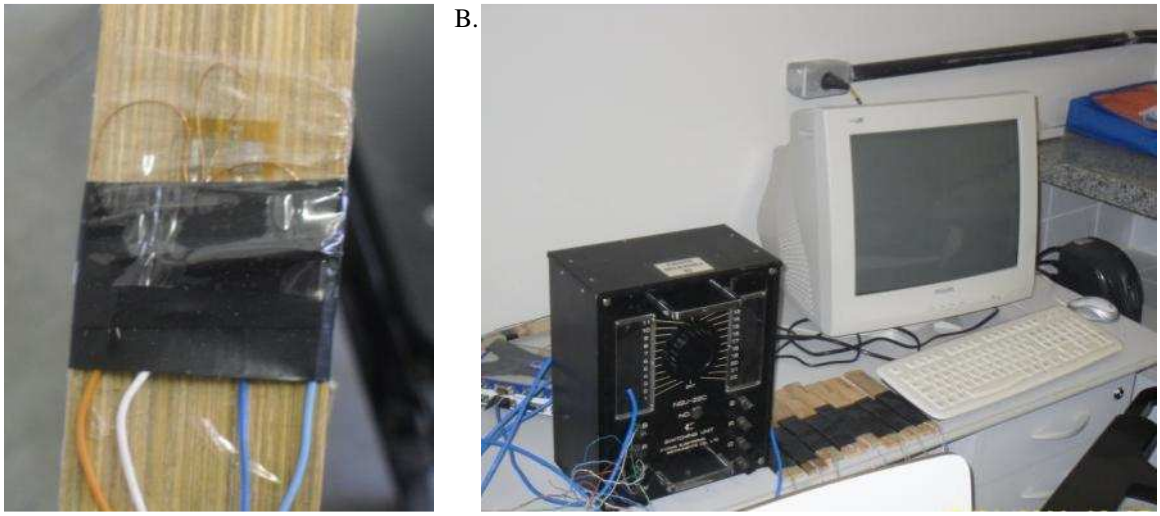


Figura 13 – A. Extensômetros instalados na ripa de bambu; B. Equipamentos utilizados para excitação e leitura da ponte de Wheatstone dos extensômetros.

Figura 14 - Ripas de bambu utilizadas no ensaio de variação dimensional em imersão em água.

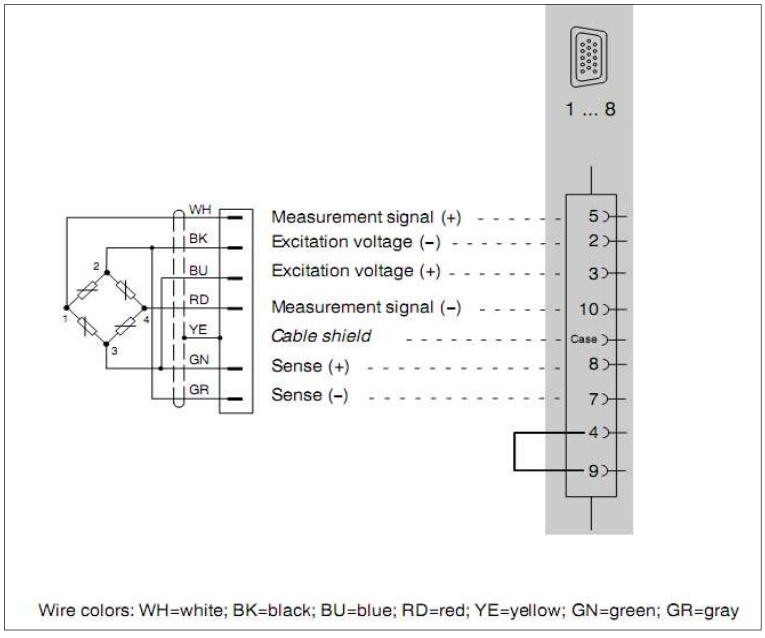


Figura 15 – Conformação da montagem da ponte de Wheatstone.

Então, os corpos de prova eram colocados em uma caixa d'água de 1000 L em um ângulo de aproximadamente 45º devido a limitação do tamanho do reservatório de água, que não permitiu a colocação dos corpos de prova na posição horizontal. A extremidade sem impermeabilização ficou cerca de 5 cm submersa, enquanto a extremidade impermeabilizada ficou cerca de 80 cm submersa. Durante o ensaio leituras das deformações foram realizadas em intervalos de 10 s durante o primeiro minuto; em intervalos de 30 s entre o primeiro e quinto minuto; intervalos de 1 min entre o quinto e o décimo; intervalos de 5 min entre o décimo e o trigésimo minuto; intervalos de 10 min entre o trigésimo minuto e uma hora; e em 1, 2, 3, 4, 5, 6, 12 e 24 h.

3.4 Ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa

Para o ensaio de variação dimensional de imersão em argamassa, seguiram-se os mesmos procedimentos de limpeza e de medição descritos anteriormente. Neste caso, os corpos de prova de bambu apresentaram dimensões de 0,82 cm de espessura; 3,11 cm de largura e 20 cm de comprimento e suas extremidades não foram impermeabilizadas. Para cada tipo de argamassa foram preparados 4 corpos de prova, sendo dois sem a presença da região nodal e dois com a região nodal; neste último caso, essa região ficou localizada no ponto médio ao longo do comprimento do corpo de prova. Todos os corpos de prova foram instrumentados com dois extensômetros elétricos (*gage factor* = 2,12 e $R = 350\ \Omega$): um paralelo e outro perpendicular a direção das fibras do bambu, dispostos no ponto médio de seus comprimentos. Os extensômetros também foram ligados a um sistema de aquisição de dados digital.

Foram confeccionadas fôrmas em compensado de faces impermeáveis que apresentaram dimensões de 5 cm de espessura, 5 cm de largura e 30 cm de comprimento. As argamassas foram preparadas em um misturador planetário de alta rotação (ABNT 13276, 2005); em seguida, foram lançadas e vibradas em mesa vibratória, de modo a preencher metade do volume das fôrmas; então os corpos de prova de bambu foram posicionados na região central das fôrmas e completaram-se os restantes dos volumes dessas com argamassa.

Na Figura 16 apresenta-se o corpo de prova SN1 (que significa: sem nó, amostra número 1) com os extensômetros intactos após a realização do ensaio e, consequente, retirada

da argamassa. Na Figura 17 mostra-se o corpo de prova já argamassado. Na Figura 18 tem-se o aspecto dos corpos de prova durante a realização do ensaio, portanto foram ensaiados 4 corpos de prova por vez.

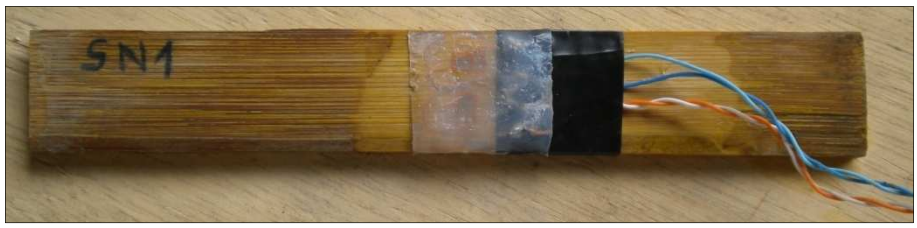


Figura 16 – Corpo de prova do ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa após a realização do ensaio.

Figura 17 - Ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa após argamassa endurecida.

Figura 18 - Fôrmas do ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa.

As leituras dos extensômetros eram realizadas em intervalos de 30 s durante os cinco primeiros minutos após o lançamento da argamassa; em intervalos de 1 min entre o quinto e décimo minuto; intervalos de 5 min entre o décimo e o trigésimo minuto; e em 1, 2, 3 e 4 h. O tempo de ensaio não foi prolongado devido à sensibilidade dos extensômetros, os quais não obtinham leituras coerentes para tempos superiores aos supracitados. Portanto não se obteve

um melhor acompanhamento do período de inchamento do início do ensaio e do período de contração para tempos avançados do ensaio. Com o objetivo de analisar os corpos de prova até, pelo menos, 28 dias de cura da argamassa (utilizada neste trabalho) e/ou (se for o caso) concreto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de absorção de água

O ensaio foi realizado em sala climatizada, com temperatura e umidade médias de 23,3 ºC e 61%, respectivamente. Na Figura 19, apresentam-se as curvas variação da taxa de umidade vs. tempo, dos corpos de prova de bambu com e sem nó, e com as faces sem e com tratamento impermeabilizante, tendo um intervalo de confiabilidade considerando uma probabilidade de 95% e utilizando distribuição t de *Student*.

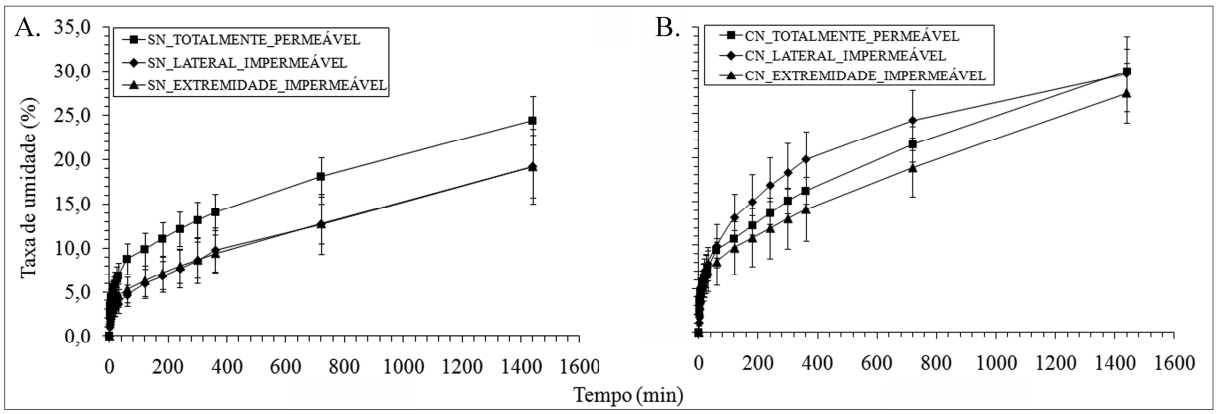


Figura 19 - Diagrama taxa de umidade versus tempo: A. bambu sem nó; B. bambu com nó.

Observa-se que para as amostras sem e com nó a taxa de absorção de água atingiu valores médios de 24,4 e 30%, respectivamente, aos 1440 min (24 h); valores estes que concordam com os encontrados na literatura (GHAVAMI, 2005). Observa-se ainda que a taxa de absorção de água da região nodal é cerca de 25% superior do que da região sem a presença de nó; comprovando a maior porosidade dessa região. Analisando as curvas das taxas de umidade dos corpos de prova com extremidade ou laterais impermeabilizadas sem nó, observa-se que estas apresentaram o mesmo comportamento; contudo, inferiores ao dos corpos sem impermeabilização. Já para o bambu com nó verifica-se que os corpos de prova com extremidades livres apresentaram maiores taxa de absorção para tempos entre 100 e 800 min; contudo, em 24 h de ensaio os valores estabilizaram e se igualaram aos corpos de prova sem tratamento, devido ao fato de ocorrer saturação das amostras de bambu, por conseguinte, para um tempo infinito de submersão de bambu em água, as curvas da Figura 19 indicam o ponto de máxima taxa de absorção.

Com o objetivo de verificar qual face realmente absorve mais água, calcularam-se as variações das taxas de umidade em relação à área em contato com a água. Desta forma, a Figura 20, apresentam-se as curvas da variação da taxa de umidade vs. a área de exposição, para 24 h e 60 min de ensaio.

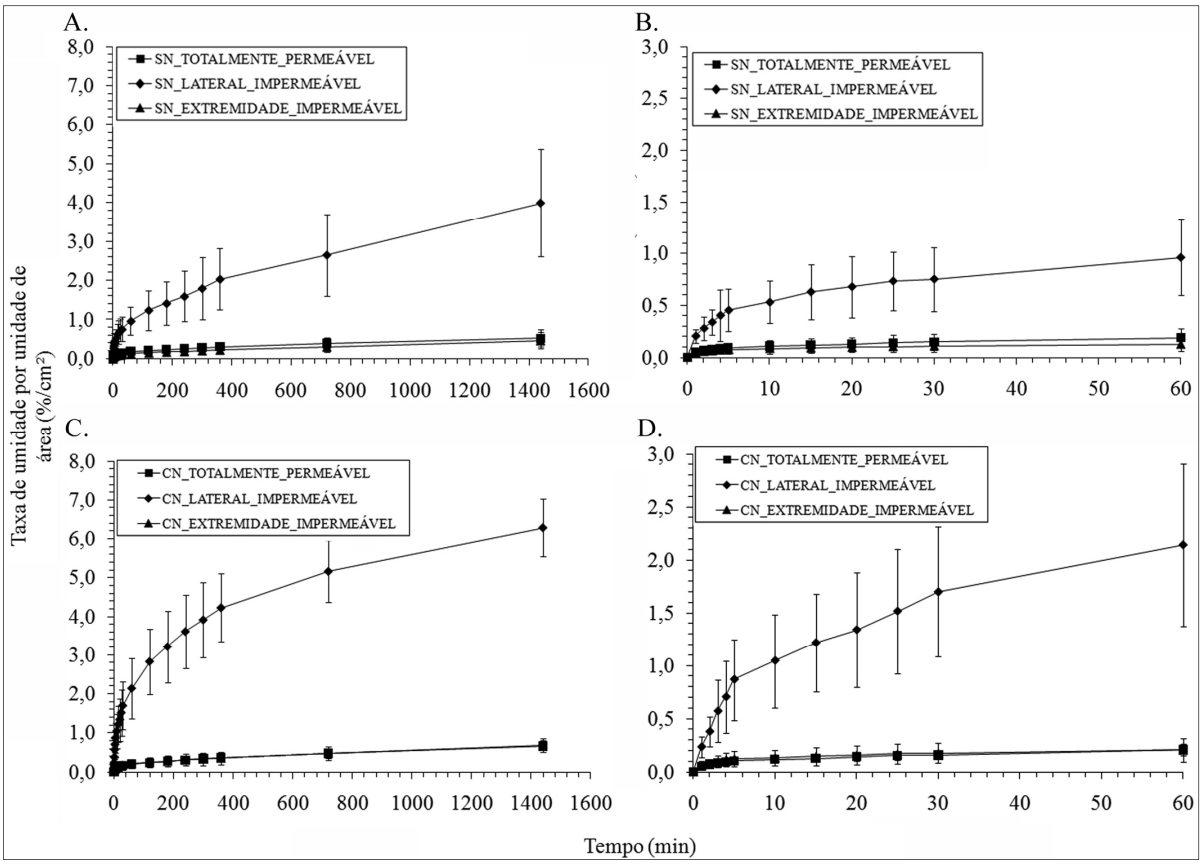


Figura 20 - Diagrama variação da taxa de umidade por unidade de área versus tempo: A. bambu sem nó e tempo de ensaio de 24 h; B. bambu sem nó e tempo de ensaio de 60 min; C. bambu com nó e tempo de ensaio de 24 h; D. bambu com nó e tempo de ensaio de 60 min.

Analisando essas curvas fica evidente que a face da extremidade, ou seja, perpendicular a direção das fibras e vasos, tanto para o bambu com nó quanto para o sem nó, apresenta a maior taxa de absorção. Considerando os pontos correspondentes aos tempos de 24 h e 60 min, observa-se que a face da extremidade é cerca de 8 e 10 vezes mais absorvente que a face lateral para o bambu sem nó e com nó, respectivamente; e que a face da extremidade da região nodal é cerca de 2 vezes mais absorvente que da região sem nó. Na Figura 21, apresenta-se em detalhe a absorção da água pela face das extremidades nos corpos de prova com lateral impermeável. Observa-se uma região com tonalidades mais escuras, próxima a face da extremidade, caracterizada pela maior concentração de água.

Figura 21 - Penetração de água pela face da extremidade do bambu.

A Tabela 4 apresenta as características geométricas das amostras de bambu utilizadas no ensaio de absorção.

Tabela 4 – Dimensões das amostras do ensaio de absorção.

Características Geométricas		**SN1**	**SN2**	**SN3**	**SN4**	**SN5**	**CN1**	**CN2**	**CN3**	**CN4**	**CN5**
Espessura (mm)	Medidas	8,19	8,20	6,67	8,12	8,24	7,54	7,92	8,11	6,78	7,95
		8,24	8,07	7,09	8,12	8,11	7,83	7,74	7,89	6,65	7,75
		8,25	8,14	7,12	8,30	8,19	7,75	7,90	7,74	6,65	7,85
	Média	**8,23**	**8,14**	**6,96**	**8,18**	**8,18**	**7,71**	**7,85**	**7,91**	**6,69**	**7,85**
	Desvio padrão	**0,03**	**0,07**	**0,25**	**0,10**	**0,07**	**0,15**	**0,10**	**0,19**	**0,08**	**0,10**
Largura (mm)	Medidas	30,76	31,06	30,06	31,13	30,72	30,68	31,54	31,44	30,36	30,96
		30,85	31,06	30,21	31,28	31,16	30,94	31,58	31,22	30,32	31,30
		30,66	30,96	30,11	31,13	31,45	30,28	31,08	31,13	30,42	31,42
	Média	**30,76**	**31,03**	**30,13**	**31,18**	**31,11**	**30,63**	**31,40**	**31,26**	**30,37**	**31,23**
	Desvio padrão	**0,10**	**0,06**	**0,08**	**0,09**	**0,37**	**0,33**	**0,28**	**0,16**	**0,05**	**0,24**
Comprimento (mm)	Medidas	66,07	46,26	42,23	54,09	78,62	48,80	67,92	56,64	45,15	52,74
		66,45	47,05	42,49	54,27	78,68	48,60	68,52	55,13	44,48	52,30
		67,03	47,17	42,73	55,25	77,73	48,67	68,33	56,19	44,88	52,76
	Média	**66,52**	**46,83**	**42,48**	**54,54**	**78,34**	**48,69**	**68,26**	**55,99**	**44,84**	**52,60**
	Desvio padrão	**0,48**	**0,49**	**0,25**	**0,62**	**0,53**	**0,10**	**0,31**	**0,78**	**0,34**	**0,26**
Área Lateral (mm²)		5186	3668	3151	4293	6156	3734	5359	4387	3323	4111
Área das extremidades (mm²)		506	505	419	510	509	472	493	495	407	490
Área Total (mm²)		5692	4173	3570	4803	6665	4206	5852	4882	3730	4601

4.2 Ensaio de variação dimensional em imersão em água

Na Figura 22A apresentam-se as curvas das médias das deformações vs. tempo das quatro ripas de bambu utilizadas no ensaio de variação dimensional em água, para os dois

extensômetros (um longitudinal e outro transversal) distanciados 10 cm da extremidade impermeabilizada (nomeados de LONG_EXTR_IMPER e TRANS_EXTR_IMPER, que significam: extensômetros nas direções longitudinal e transversal, respectivamente, situados próximo a extremidade impermeável da lâmina de bambu) e outros dois distanciados 10 cm da extremidade não impermeabilizada (nomeados de LONG_EXTR_PER e TRANS_EXTR_PER, que significam: extensômetros nas direções longitudinal e transversal, respectivamente, situados próximo a extremidade permeável da lâmina de bambu).

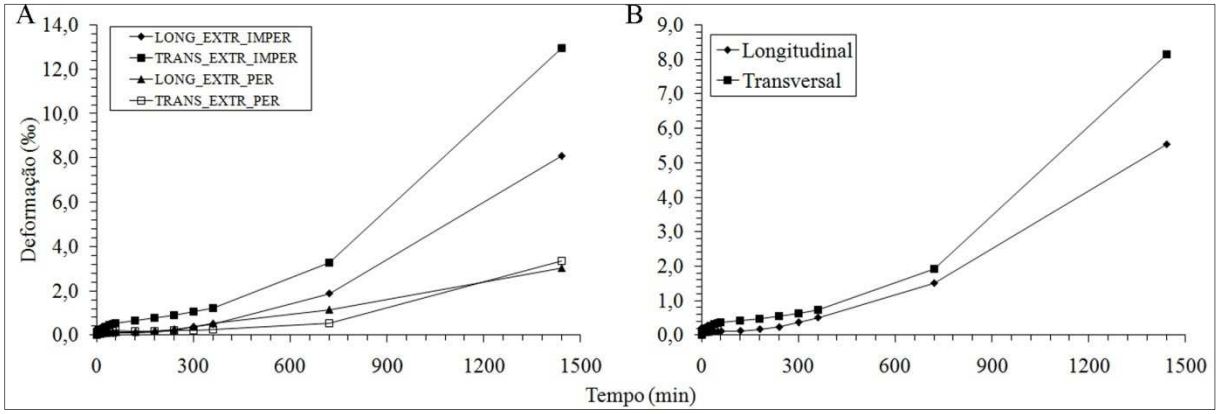


Figura 22 - Diagrama deformação vs. tempo: A. valores das deformações nas duas posições de avaliação; B. médias dos valores das deformações nas duas posições de avaliação.

Observa-se que as deformações transversal e longitudinal, na extremidade impermeável, foram, respectivamente, cerca de 4 e 2,5 vezes superiores aos valores da extremidade permeável; valores estes contraditórios em relação aos obtidos no ensaio de absorção de água. Esta contradição é explicada pela diferença da pressão de água nos pontos de análise. Tal constatação é importante, pois a posição de uma vara de bambu dentro da massa de concreto irá interferir diretamente na aderência bambu-concreto.

Na extremidade impermeável, extremidade com maior pressão de água, a deformação longitudinal atingiu valores da ordem 8‰ e a transversal 13‰. Analisando tais resultados e considerando-se uma vara de bambu imersa em concreto com uma região de análise de comprimento de 1 cm e uma deformação média de 10‰ isto levaria a um deslocamento relativo de 0,1 mm, valor este igual ao limite de deslocamento relativo reforço-concreto que levaria a ruptura por aderência (MESQUITA et alii, 2006). Este valor de deslocamento relativo torna-se ainda mais deletério se for considerado que com 24 h a resistência do concreto é muito baixa. Na Figura 22B, apresentam-se as curvas médias deformação vs. tempo entre os dois pontos de análise, extremidade permeável e impermeável. Observa-se que tais curvas representariam as deformações em um ponto cerca de 40 cm submerso, e que as deformações longitudinal e transversal atingiram valores da ordem 5,5‰ e 8‰,

respectivamente, para um tempo de 24 h; contudo, para o tempo equivalente ao de fim de pega da argamassa estudada neste trabalho (234 min) foram da ordem de 0,2‰ e 0,9‰, respectivamente. Estes últimos valores são bem inferiores aos correspondentes ao tempo de 24 h; porém, ainda expressivo quando considerada a baixa resistência do concreto para o tempo médio de fim de pega (4 h), já que segundo Mesquita et alii (2006) apenas a resistência do concreto influencia na aderência bambu-concreto.

4.3 Ensaio de variação dimensional em imersão em argamassa

Na Figura 23A e B apresentam-se as curvas deformação longitudinal vs. tempo, do bambu imerso na argamassa 1 e 2, respectivamente (SN1, SN2, CN1 e CN2 correspondem as amostras imersas na argamassa 1; e, SN3, SN4, CN3 e CN4 correspondem as amostras imersas na argamassa 2). Observa-se que para ambas as argamassas, as deformações longitudinais do bambu foram pequenas não ultrapassando valores de 0,2‰. Apesar do baixo valor determinado, ainda se estar trabalhando com confiança, uma vez que os valores lidos apresentavam ordem de grandezas da precisão e sensibilidade deste sensor.

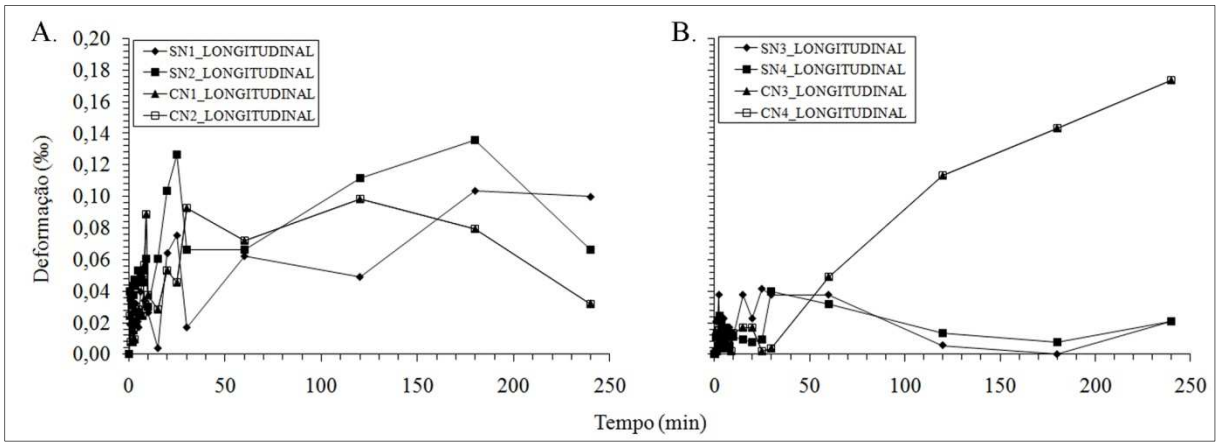


Figura 23 - Diagrama deformação vs. tempo: A. deformação longitudinal para argamassa 1; B. deformação longitudinal para argamassa 2.

O aumento do fator água/cimento de 0,55 (argamassa 1) para 0,60 (argamassa 2) não influenciou significativamente nas deformações longitudinais. Em adição, verifica-se que para tempos iguais ao de fim de pega os valores das deformações longitudinal média, para as argamassas 1 e 2, foram 0,056‰ e 0,064‰, respectivamente; valores esses, são cerca de 30% daqueles quando do bambu imerso em água, considerando o mesmo decorrer de tempo.

Finalmente, verifica-se novamente que as varas com nó apresentaram maiores deformações que as sem nó.

Na Figura 24A e B apresentam-se as curvas deformação transversal vs. tempo do bambu imerso na argamassa 1 e 2, respectivamente. Observa-se que, ao contrário da deformação longitudinal, o aumento do fator água/cimento, de 0,55 (argamassa 1) para 0,60 (argamassa 2), aumentou os valores das deformações transversais em cerca de 2 vezes para tempo correspondente ao final de pega. Além disso, os valores dessas deformações transversais, para o tempo de final de pega, foram cerca de 2 (argamassa 1) e 4 (argamassa 2) vezes superiores aos valores das deformações longitudinais.

Observa-se que para a argamassa 2, uma das varas de bambu com nó atingiu deformações da ordem de 0,8‰, o qual é suficiente para prejudicar a aderência bambu-concreto; contudo, os valores médios das deformações correspondente ao tempo de final de pega para a argamassa 1 e 2 foram, respectivamente, 7,5 e 3,5 vezes inferiores as correspondentes deformações quando da imersão em água. Finalmente, mais uma vez constata-se com os trechos de bambu com a presença do nó apresentou maiores deformações.

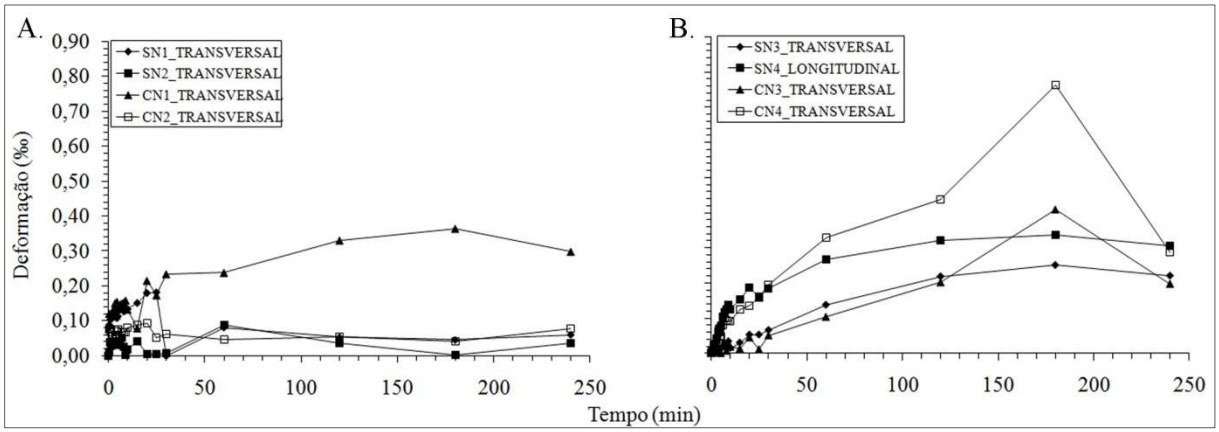


Figura 24 - Diagrama deformação vs. tempo: A. deformação transversal para argamassa 1; B. deformação transversal para argamassa 2.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. A região nodal do bambu absorve cerca de 25% mais água que a região internodal, quando em contato com água.

2. As extremidades do bambu possuem maior capacidade de absorção que as laterais das varas; sendo cerca de 8 a 10 vezes mais absorvente.

3. A profundidade de imersão, ou seja, a pressão da água influencia na taxa de absorção e na variabilidade dimensional.

4. As deformações higroscópicas do bambu, quando imerso em água, atingiram valores que podem prejudicar a aderência por adesão entre o concreto e o bambu.

5. Apesar das deformações higroscópicas quando da imersão em argamassa serem menores que as em água, os valores das deformações transversais em argamassa podem interferir a resistência da aderência entre o bambu e o concreto.

6. Como proposta para trabalhos futuros, pose-se realizar o acompanhamento dos extensômetros instalados nas amostras de bambu imersas em argamassa durante 28 dias ou para o tempo necessário, de forma a verificar realmente as condições de expansão seguida de contração do bambu.

REFERÊNCIAS

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, S. C.; BRITO, G. A. de. **Extensometria Básica**. Ilha Solteira: UNESP, 2004. 46p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA BRASILEIRA. **NBR 13276:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005. 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA MERCOSUL. **NBR NM 43:** Cimento Portland: Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003. 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA MERCOSUL. **NBR NM 52:** Agregado miúdo: Determinação da massa específica e da massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009. 6p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA MERCOSUL. **NBR NM 65:** Cimento Portland: Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003. 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NORMA MERCOSUL. **NBR NM 248:** Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

BERALDO, A.L. **Bambucreto**: o uso do bambu como reforço do concreto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 16., 1987, Jundiaí. **Anais**... Jundiaí: SBEA, v. 2, 1987, p. 521- 530.

CARDOSO JÚNIOR, M. L. **Recomendações para Projeto de Piso de Bambu Laminado Colado – BLC**. Salvador, 2008. 163p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-graduação na área de Produção e Gestão do Ambiente Construído. Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia (UFBA).

CZARNIESKI, C.J. **Avaliação da aderência bambuconcreto**. In: JORNADAS SUD-AMERICANAS DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL, 31., 2004, Mendoza. **Anais**.... Mendoza: ASAEE, 2004, p. 1-16. CD-Rom.

DA ROSA, S.P.A.P. **Análise teórica e experimental de colunas de concreto armado com bambu**. Rio de Janeiro: PUC, 2002. 135p. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

DUNKELBERG, K. **Bamboo as a building material**: bamboo-IL 31. Stuttgart: University of Stuttgart, Institute for Lightweight Structures, 1985. 431 p.

FERRÃO, A.M; FREIRE, W.J. **Aderência entre bambu e concreto: teste de arrancamento com taliscas de Bambusa tuldoides**. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 5., 1995, Belo Horizonte. **Anais**... Belo Horizonte: EBRAMEM, v. 2, 1995, p. 389-398.

GEYMAYER, H.G.; COX, F.B. Bamboo reinforced concrete**. Journal of American Concrete Institute**, Farmington Hills, 1970, v. 67, n. 10, p. 841-846.

GHAVAMI, K. **Bamboo as reinforcement in structural concrete elements**. Cement and Concrete Composites, v.27, p.637-649, 2005.

GHAVAMI, K. **Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams**. Cement and Concrete Composites, London, 1995, v.17, n.4, p. 259-351.

GHAVAMI, K; HOMBECK, R.V. **Mechanical properties and waterrepellent treatment of bamboo**. In: LATIN AMERICAN SYMPOSIUM RATIONAL ORGANIZATION OF BUILDING APPLIED TO LOW COST HOUSING, 1981, São Paulo. **Anais**... São Paulo: USP, v.1, p. 49-55.

GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Propriedades Mecânicas dos Colmos dos Bambus das Espécies**: Mosó e Guadua angustifolia para Utilização na Engenharia. Rio de Janeiro: PUC-Rio. Publicação RMNC-2 Bambu 02/2002, 2002. 90 p.

KURIAN, N.P.; KALAM, A.K.A. Bamboo reinforced soil-cement for rural use. **Indian Concrete Journal**, New Delhi, 1977, n. 51, p. 382- 389.

LIMA JÚNIOR, H.C et alii. **Características mecânicas do bambu Dendrocalamus giganteus: Análise teórica e experimental**. In: Barbosa, N.P.; Swamy, R.N. and Lynsdale, C. (eds.). SUSTAINABLE CONSTRUCTION INTO THE NEXT MILLENNIUM: ENVIRONMENTALLY FRIENDLY AND INNOVATIVE CEMENT BASED MATERIALS, 2000, João Pessoa: SNT, p. 394-406.

LIMA JÚNIOR, H.C. et alii. **Aderência bambu-concreto**. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, 2., 1996, Juiz de Fora. **Anais**... Juiz de Fora: UFJF, v. 1, 1996, p. 312-323.

LOPES, W. G. R. **Solo-cimento reforçado com bambu:** características físico-mecânicas**.** Campinas: [s.n.], 2002. 165p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

LOPES, W. G. R.; FREIRE, W. J.; FERREIRA, G. C. S. Ensaios de arrancamento e de empuxamento aplicados a taliscas de bambu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 504-510, 2002.

LOPEZ, O. H. **Nuevas Técnicas de construcción con Bambú**. Colombia: Estudios Tecnicos Colombianos. Ltda Bogotá, 1978. 95 p.

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

MESQUITA, L. P.; CZARNIESKI, C. J.; BRAGA FILHO, A. C.; WILLRICH, F. L.; LIMA JR., 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.

MOREIRA, L. E. **Desenvolvimento de estruturas treliçadas espaciais de bambu**. Rio de Janeiro, 1991. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

NAVARRO, E. H. A. **Estudo Teórico Experimental a Flexão de Lajes de Concreto Reforçadas com Bambu**. Rio de Janeiro: PUC, 2002. 134p. Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

NOGUEIRA, C. L. **Painel de bambu laminado colado estrutural**. Piracicaba, 2008. 92p. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz.

PAKOTIPRAPHA, B.; PAMA, R. P.; LEE, S. L.. Behavior of a bamboo fiber-cement paste composite**. Journal of Ferrocement**, 1983, vol. 13, n. 3.

PARK, R.; PAULAY, T. **Reinforced concrete structures**. New York: John Wiley & Sons, 1975, 769p.

PEREIRA, M. A. dos R.; BERALDO, A. L. **Bambu de corpo e alma.** Bauru: Ed. Canal 6, 2007. 239p.

SÁNCHEZ CRUZ, M. L. **Caracterização física e mecânica de colmos inteiros do bambu da espécie *Phyllostachys aurea*:** Comportamento à flambagem. Rio de Janeiro: PUC, 2002. 114p. Dissertação Mestrado apresentada à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.

RECHT, C.; WETTERWALD, M. F. **Bamboos**. London: B.T. Batsford Ltd, 1994.

RIVERO, L. A. **Laminado colado e contraplacado de bambu.** Campinas, 2003. 99p. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

TAKEYA, T. **Notas de Aula**: Análise Experimental de Estruturas. São Carlos: EESC-USP, 2000. 50p.