

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Ricardo Arturo Amado Borda

**Análise experimental de vigas parede de
concreto reforçado com bambu**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil do
Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio

Orientador: Prof. Khosrow Ghavami

Rio de Janeiro
Agosto de 2013



Ricardo Arturo Amado Borda

**Análise experimental de vigas parede de
concreto reforçado com bambu**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Khosrow Ghavami

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof^a. Marta de Souza Lima Velasco

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Eduardo Humberto Achá Navarro

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Normando Perazzo Barbosa

Universidade Federal da Paraíba – UFPB

Prof. Timothy Jack Ross

University of New Mexico

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de Agosto de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Ricardo Arturo Amado Borda

Graduou-se em Engenharia Civil na Universidade Nacional de Colômbia, em Julio de 2009. Atualmente pesquisa em materiais e tecnologias não convencionais.

Ficha Catalográfica

Amado Borda, Ricardo Arturo.

Análise experimental de vigas parede de concreto reforçado com bambu / Ricardo Arturo amado Borda; orientador: Khosrow Ghavami.- Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

v.,123 f. il. (color) ; 29,7 cm

1. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia civil – Dissertações. 2. Vigas parede. 3. Bambu. 4. Concreto. 5. Impermeabilização de bambu. 6. Modos de falha. I. Amado Borda, Ricardo Arturo. II. Ghavami, Khosrow. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD: 624

A minha família: Arturo, Elizabeth,
Julieth, Andrea, Isabela e Martin.

Agradecimentos

A meu orientador Khosrow Ghavami, pela orientação no desenvolvimento desta pesquisa e sua forma de transmitir sua experiência.

Ao grupo de Materiais Não Convencionais da PUC – Rio.

Aos técnicos do Laboratório de Estruturas e Materiais: Euclidez, Evandro e José Nilson.

A meus amigos e amigas: Alexandre Soares, Martin Purizaga, Diego Martinez, Lorena Chamorro, Andrea Rojas, Tathiana Caram, Nicolas Papadopoulos, Fabio Teófilo, Alexander Zhemchuzhnikov, Eliot Pezo, Nelson Vargas, Camyla Oliveira, Anna Naccache, Marlom Alves e Ricardo Maestri.

A CAPES e a PUC-Rio pelo apoio financeiro.

Resumo

Borda, Ricardo Arturo Amado; Ghavami, Khosrow. **Análise experimental de vigas parede de concreto reforçado com bambu.** Rio de Janeiro, 2013. 123p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O contínuo e variado uso da viga parede como elemento estrutural em diferentes tipos de projetos da construção civil como em silos, reservatórios, fachadas de edifícios entre outros. Além da importância do bambu como material natural não convencional de baixo impacto ambiental e baixo custo econômico na prática sustentável da engenharia civil são fatores que justificam a presente pesquisa. O enfoque é dado para o entendimento do comportamento das vigas parede de concreto reforçado com tiras de bambu. Testaram-se nove vigas parede de concreto reforçado com bambu (espécie *Dendrocalamus giganteus*) e uma reforçada com barras de aço, com relação de esbeltez (l/h) igual a 1.5, biapoiadas, geometricamente iguais, submetidas a uma carga pontual central na face superior e distribuídas em quatro grupos diferenciados pela taxa geométrica da armadura. Como resultados foram identificados e comparados os parâmetros: mecanismos de falha, padrão de fissuração, deflexões, deformações, cargas últimas e aderência entre reforço e concreto. Devido à influência da aderência no desempenho das estruturas de concreto armado realizou-se um tratamento de impermeabilização no material de reforço com a finalidade de melhorar a interface entre o concreto e a armadura de bambu.

Palavras-chave

Bambu; Vigas parede; Concreto reforçado; Análise experimental.

Abstract

Borda, Ricardo Arturo Amado; Ghavami, Khosrow (Advisor). **Experimental analysis of bamboo-reinforced concrete deep beams**. Rio de Janeiro, 2013. 123p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The continuous and varied use of the deep beams as an element with structural function in different types of civil construction projects such as reservoirs, building facades among others. Besides the importance of bamboo as unconventional material in the practice of sustainable civil engineering, are facts that justify this research. The focus is given to understanding the behavior of concrete deep beams reinforced with bamboo (type *Dendrocalamus Giganteus*). Were tested nine simply supported bamboo-reinforced deep beams, with slenderness ratio (l / h) equal to 1.5 and same geometry, subjected to a central point load on the upper surface and divided into three groups distinguished by the geometric rate of truss. As results were identified and compared the parameters: failure mechanisms, crack pattern, deflections, strain, ultimate loads and adhesion between reinforcement and concrete. Due to the influence of the adhesion performance of reinforced concrete structures, was performed a waterproofing treatment on the reinforcing material in order to improve the interface between the concrete and the reinforcement of bamboo.

Keywords

Bamboo; Deep beams; Reinforced concrete; Experimental analysis.

Sumário

1. Introdução	16
1.1. Aspectos Gerais	16
1.2. Objetivos do trabalho	17
1.3. Estrutura da dissertação	17
2. Revisão bibliográfica	19
2.1. Introdução	19
2.2. Definições de viga parede	19
2.3. Breve histórico	20
2.4. Distribuição de tensões em vigas parede	21
2.5. Influência dos modos de introdução de carga.	23
2.6. Mecanismos de falha	25
2.6.1. Ruptura por flexão	25
2.6.2. Ruptura por Cisalhamento	26
2.6.2.1. Ruptura de tração diagonal	26
2.6.2.2. Ruptura de compressão diagonal	27
2.6.3. Ruptura Local	28
2.7. Dimensionamento de vigas Parede	28
2.7.1. Recomendações do CEP-FIP	28
2.7.2. Recomendações do ACI-318 (1995)	32
2.8. Modelo de bielas e tirantes	34
2.8.1. Elementos de treliça	35
2.8.1.1. Bielas	35
2.8.1.2. Nós	36
2.8.1.3. Tirantes	38
2.8.2. Resistência das bielas, tirantes e zonas nodais	38
2.8.3. Modelos de biela e tirante na predição da carga última	41
2.8.3.1. Abordagem de WON	41
2.8.3.2. CAST (“Computer Aided Strut and Tie”)	42
2.9. Bambu	43
2.9.1. Umidade do bambu e seu efeito na aderência bambu/concreto	47
3. Descrição de materiais, vigas de teste e ensaios	50
3.1. Introdução	50
3.2. Bambu	50

3.2.1. Corte e Tratamento de Impermeabilização do Bambu	50
3.2.2. Resistência à tração do Bambu.	52
3.3. Descrição das vigas parede ensaiadas	54
3.3.1. Geometria das vigas parede ensaiadas	54
3.3.2. Reforço das vigas	55
3.3.2.1. Vigas V1	56
3.3.2.2. Vigas V2	57
3.3.2.3. Vigas V3	58
3.3.2.4. Viga V4	59
3.3.3. Estribos	61
3.4. Montagem do ensaio	62
3.5. Instrumentação	66
3.6. Procedimento do ensaio	68
4. Apresentação e análise dos resultados experimentais	69
4.1. Introdução	69
4.2. Propriedades mecânicas do bambu e do concreto	69
4.2.1. Bambu	69
4.2.1.1. Resistência à Tração do Bambu.	69
4.2.2. Concreto	73
4.2.2.1. Resistência à compressão do concreto	73
4.2.2.2. Resistência à tração	73
4.3. Vigas Parede Ensaaiadas	75
4.3.1. Carga vs. Deslocamento	75
4.3.2. Carga vs. Deformação	81
4.3.2.1. Carga vs. Deformação no reforço principal.	81
4.3.2.2. Carga vs. Deformação no concreto	87
4.3.3. Abertura de fissuras	92
4.3.4. Mecanismos de falha e configuração de fissuras	99
4.3.5. Carga última	105
4.3.6. Aderência	109
5. Conclusões e sugestões	111
5.1. Conclusões	111
5.2. Sugestões	112
6. Referências Bibliográficas	113
Anexo 1	119

Lista de figuras

Figura 2.1 Distribuição de esforços σ_x no meio do vão, em vigas parede de um só vão, com diferentes relações de esbeltez (l/h) e carregadas uniformemente na face superior. (Fonte: Leonhardt & Mönning, 1978).	22
Figura 2.2 Variação das componentes σ_x , σ_y , τ_{xy} e trajetórias das tensões principais em vigas parede de um só vão com $l/h = 1$, para carregamentos nas faces superior e inferior (Fonte: Leonhardt & Mönning, 1978).	24
Figura 2.3 Sequência de aparição de fissuras na falha por flexão.	26
Figura 2.4 Configuração de fissuras na falha por cisalhamento.	27
Figura 2.5 Influência das relações a/d e l/d na resistência ao cisalhamento de vigas parede sem armadura de alma (Leonhardt, 1968).	27
Figura 2.6 Sequência de aparição de fissuras por flexão, cisalhamento e local, em uma viga parede biengastada (Fonte: Subedi, 1994).	28
Figura 2.7 Comparação entre a carga de escoamento calculada pelas recomendações do CEP – FIP (1978) e a carga última real de vigas parede com ($1 \leq lh \leq 2$) rompendo por flexão.	30
Figura 2.8 Comparação entre o esforço cortante último pelas recomendações do CEP – FIP (1978) e o esforço cortante último real de vigas parede.	31
Figura 2.9 Restrições no código ACI-318 (1995) referentes à resistência ao cisalhamento (V_u) para vigas paredes (Nilson, 1999).	32
Figura 2.10 Modelo da treliça de Ritter (Ritter, 1899).	34
Figura 2.11 Uso do modelo de bielas e tirantes – (a) Consolos. (b) Vigas parede. (c) Dentes Gerber.	35
Figura 2.12 Elementos do modelo de bielas e tirantes (Miguel et al., 2009).	35
Figura 2.13 Tipos de bielas e tirantes (Fonte: Mohammadhassani et al., 2012).	36
Figura 2.14 Classificação geral de nós	37
Figura 2.15 Tipos de nós ACI 318 (2002).	37
Figura 2.16 Relação Carga última experimental vs. Carga última calculada com o enfoque de Won et al. (1998).	41
Figura 2.17 Fluxograma de dimensionamento de uma estrutura com o método de bielas e tirantes (Fonte: Nepomuceno, 2012).	43
Figura 2.18 Usos do bambu. (a) Vista geral de ponte de pedestre construída com bambu e concreto. (b) Interação bambu concreto. (c) União pilar de concreto com viga de bambu.	45
Figura 2.19 Construção, concreto reforçado com tiras de bambu e/ou bambu de pequenos diâmetros (Fonte: Hidalgo, 1992).	46
Figura 2.20 Colapso de estrutura de concreto reforçado com tiras de bambu - Vietnam (Fonte: Hidalgo, 1992).	46
Figura 2.21 Absorção média de água de sete espécies de bambu (Culzoni, 1986).	47
Figura 2.22 Comportamento de um segmento de bambu sem tratamento de impermeabilização dentro de concreto. (a) Bambu em concreto fresco. (b) Bambu durante a cura do concreto. (c) Bambu depois da cura do concreto (Ghavami, 1995).	48

Figura 2.23 Microscopia de uma seção transversal de Bambu. Distribuição de fibras ao longo da espessura do colmo (Ghavami,1995).	49
Figura 3.1 Impermeabilização e preparação do bambu. (a) Corte e cura na mata, (b) corte do colmo em tiras, (c) limpeza da superfície das tiras do bambu, (d) perfilado de tiras do bambu, (e) aplicação de Sikadur32, (f) incorporação de areia, (g) bambu impermeabilizado.	52
Figura 3.2 Geometria de corpos de prova para ensaio de tração	53
Figura 3.3 Corpos de prova - material bambu da espécie Dendrocalamus giganteus.	53
Figura 3.4 Geometria geral das vigas parede.	55
Figura 3.5 Identificação de vigas.	55
Figura 3.6 Camadas de reforço principal.	56
Figura 3.7 Distribuição geral de reforço nas vigas V1	57
Figura 3.8 Distribuição geral de reforço nas vigas V2	58
Figura 3.9 Distribuição geral de reforço nas vigas V3	59
Figura 3.10 Distribuição geral de reforço na viga V4	60
Figura 3.11 Estribos das vigas V1 e V3. (a) Esquema geral de chapa em aço com forma de C, (b) Chapas em C, (c) Estribos formados por tiras de bambu e chapas de aço.	62
Figura 3.12 Macacos hidráulicos de 500KN cada um. Conjunto de chapas niveladas de transmissão de carga.	63
Figura 3.13 Apoios de viga, (a) primeiro gênero e (b) segundo gênero.	63
Figura 3.14 Sistema de contenção lateral.	64
Figura 3.15 Montagem geral do ensaio.	65
Figura 3.16 Extensômetros e Transdutores de deslocamento	66
Figura 3.17 Instrumentação para a medição de deformações- Extensômetros	67
Figura 3.18 Instrumentação para a medição da carga -Transdutor de pressão	68
Figura 4.1 Tensão vs. Deformação. Material Bambu sem nó da espécie Dendrocalamus giganteus.	70
Figura 4.2 Tensão vs. Deformação. Material Bambu com nó da espécie Dendrocalamus giganteus.	71
Figura 4.3 Ensaio de tração do bambu da espécie Dendrocalamus giganteus na máquina universal INSTRON No.6233.	72
Figura 4.4 Ensaio a compressão simples. (a) Geometria de corpo de prova, (b) corpo de prova ensaiado à compressão simples, (c) Montagem geral de ensaio de compressão simples do concreto.	74
Figura 4.5 Ensaio de compressão diametral do concreto (a) Montagem geral do ensaio, (b) Fendilhamento do corpo de prova, (c) Corpo de prova ensaiado.	75
Figura 4.6 Carga vs. Deslocamento – Viga V1-2.	77
Figura 4.7 Carga vs. Deslocamento – Viga V1-3.	77
Figura 4.8 Carga vs. Deslocamento – Viga V2-1.	78
Figura 4.9 Carga vs. Deslocamento – Viga V2-2.	78
Figura 4.10 Carga vs. Deslocamento – Viga V2-3.	79

Figura 4.11 Carga vs. Deslocamento – Viga V3-1.	79
Figura 4.12 Carga vs. Deslocamento – Viga V3-2.	80
Figura 4.13 Carga vs. Deslocamento – Viga V3-3.	80
Figura 4.14 Carga vs. Deslocamento – Viga V4.	81
Figura 4.15 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V1-2.	82
Figura 4.16 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V1-3.	83
Figura 4.17 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V2-1.	83
Figura 4.18 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V2-2.	84
Figura 4.19 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V2-3.	84
Figura 4.20 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V3-1.	85
Figura 4.21 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V3-2.	85
Figura 4.22 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V3-3.	86
Figura 4.23 Carga vs. Deformação do reforço principal – Viga V4.	86
Figura 4.24 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V1-2.	88
Figura 4.25 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V1-3.	88
Figura 4.26 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V2-1.	89
Figura 4.27 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V2-2.	89
Figura 4.28 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V2-3.	90
Figura 4.29 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V3-1.	90
Figura 4.30 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V3-2.	91
Figura 4.31 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V3-3.	91
Figura 4.32 Carga vs. Deformação do concreto – Viga V4.	92
Figura 4.33 Zonas de flexão e cisalhamento na viga.	92
Figura 4.34 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V1-2.	95
Figura 4.35 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V1-3.	95
Figura 4.36 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V2-1.	96
Figura 4.37 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V2-2.	96
Figura 4.38 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V2-3.	97
Figura 4.39 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V3-1.	97
Figura 4.40 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V3-2.	98
Figura 4.41 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V3-3.	98
Figura 4.42 Carga vs. Abertura de fissuras – Viga V4.	99
Figura 4.43 Configuração de fissuras - Viga V1-2.	100
Figura 4.44 Configuração de fissuras - Viga V1-3.	101
Figura 4.45 Configuração de fissuras - Viga V2-1.	101
Figura 4.46 Configuração de fissuras - Viga V2-2.	102
Figura 4.47 Configuração de fissuras - Viga V2-3.	102
Figura 4.48 Configuração de fissuras - Viga V3-1.	103
Figura 4.49 Configuração de fissuras - Viga V3-2.	103
Figura 4.50 Configuração de fissuras - Viga V3-3.	104

Figura 4.51 Configuração de fissura - Viga V4.	104
Figura 4.52 Predição de carga última – Vigas V1.	106
Figura 4.53 Predição de carga última – Vigas V2.	107
Figura 4.54 Predição de carga última – Vigas V3.	107
Figura 4.55 Predição de carga última – Vigas V4.	108
Figura 4.56 Aderência entre bambu e concreto. (a) Viga V1-2. (b) Viga V2-3. (c) Viga V3-3.	110
Figura A.1. Modelagem do nó CCT (WON et al., 1998).	120
Figura A.2. Modelagem do nó CCC (WON et al., 1998).	121
Figura A.3. Forças atuantes no modelo da viga-parede (WON et al., 1998).	122

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Classificação de vigas parede segundo normas estruturais.	20
Tabela 2.2 Ângulos entre bielas e tirantes recomendado por diferentes códigos normativos	38
Tabela 2.3 Resistência de bielas e zonas nodais segundo formulações de Schlaich et al. (1987).	39
Tabela 2.4 Resistência de bielas e zonas nodais segundo formulações CEP-FIP. (2010).	40
Tabela 2.5 Resistência de bielas e zonas nodais segundo formulações do código ACI 318 (2008)	40
Tabela 2.6 Resultados dos ensaios de Pull out realizados por Culzoni (1986) e Achá (2002) para diferentes tipos de impermeabilização de bambu.	49
Tabela 3.1 Granulometria de areia usada na superfície das tiras do bambu.	52
Tabela 3.2 Resultados dos ensaios de tração para bambu da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> obtidos em pesquisas de Culzoni (1986), Ghavami (1995), Lima Jr. Et al. (2000) e Ghavami & Marinho (2001).	52
Tabela 3.3 Grupos de vigas parede testadas.	54
Tabela 3.4 Área e distribuição de reforço principal nas vigas V1	56
Tabela 3.5 Área e distribuição de reforço principal nas vigas V2	57
Tabela 3.6 Área e distribuição de reforço principal nas vigas V3	58
Tabela 3.7 Taxas geométricas de reforço ($\rho\%$) das vigas V1,V2,V3,V4	61
Tabela 4.1 Resultados dos ensaios de resistência à tração para bambu sem nó da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> .	70
Tabela 4.2 Resultados dos ensaios de resistência à tração para bambu com nó da espécie <i>Dendrocalamus giganteus</i> .	71
Tabela 4.3 Resultados dos ensaios de compressão simples e compressão diametral do concreto.	74
Tabela 4.4 Registros do transdutor de deslocamento cinco (TD 5).	76
Tabela 4.5 Cargas de fissuração e abertura máxima de fissuras.	94
Tabela 4.6 Relação cargas de fissuração – Carga de ruptura.	94
Tabela 4.7 Abertura de fissuras em vigas carregadas com 50 Ton.	94
Tabela 4.8 Resistência efetiva à compressão do concreto das bielas tipo garrafa.	105
Tabela 4.9 Resistência efetiva à compressão do concreto dos nós tipo C-C-C e C-C-T.	105
Tabela 4.10 Tensões nas bielas e tirante na predição da carga última das vigas V1 – fatores do ACI (2008).	106
Tabela 4.11 Tensões nas bielas e tirante na predição da carga última das vigas V2 – fatores do ACI (2008).	107
Tabela 4.12 Tensões nas bielas e tirante na predição da carga última das vigas V3 – fatores do ACI (2008).	108
Tabela 4.13 Tensões nas bielas e tirante na predição da carga última da viga V4 – fatores do ACI (2008).	108
Tabela 4.14 Relação carga última CAST – Carga última experimental	109

Lista de símbolos

$&$	- Denominado <i>ampersand</i> (ou “e” comercial)
ρ	- Taxa geométrica de reforço
γ_s	- Coeficiente de minoração do reforço
ϑ	- Coeficiente de minoração do concreto
a	- Vão de corte
A_s	- Área transversal de reforço
b	- Espessura da viga
h	- Altura da viga parede
l	- Vão da viga parede
l_v	- Distância livre entre eixos de apoios
d	- Altura efetiva da viga
z	- Braço de alavanca
T	- Resultante de esforço à tração
C	- Resultante de esforço à compressão
V_u^{cal}	- Esforço cortante último calculado
V_u^{Real}	- Esforço cortante último real
V_C	- Resistência ao cisalhamento do concreto
V_S	- Resistência ao cisalhamento de armadura de reforço
f_{cd}	- Resistência efetiva da biela
f'_c	- Resistência à compressão do concreto
f_{ct}	- Resistência à tração do concreto