



Vigas de concreto reforçadas com bambu *Dendrocalamus giganteus*. I: Análise experimental

Humberto C. Lima Júnior¹, Ligia P. Mesquita¹, Gilmar Fabro²,
Fábio L. Willrich¹ & Cleber J. Czarnieski¹

¹ UNIOESTE/CCET/Laboratório de Modelos Reduzidos. Rua Universitária, 2069, CEP 85814-110, Cascavel, PR.
Fone: (45) 220-3221. E-mail: czarnieski@unioeste.br (Foto); mesquita@unioeste.br; flwillrich@unioeste.br; correialima@unioeste.br

² ITAIPU Binacional/Laboratório de Concreto. Av. Tancredo Neves 6731, CP 1555, CEP 85856-000, Foz do Iguaçu, PR.
Fone: (45) 520-6220. E-mail: fabro@itaipu.gov.br

Protocolo 59 - 6/5/2004 - Aprovado em 10/5/2005

Resumo: Neste trabalho, apresenta-se e se discute um estudo experimental sobre o comportamento estrutural de vigas de concreto reforçadas com bambu. Ensaíram-se dez vigas de concreto armado, sendo oito vigas armadas longitudinalmente com varas de bambu *Dendrocalamus giganteus* e duas vigas de referência, armadas com barras de aço. Duas variáveis foram estudadas: a taxa de armadura longitudinal (1,6 e 3,2%) e a relação área/perímetro das varas de bambu (0,25 e 0,33 cm). Para cada combinação de variáveis foram confeccionadas duas vigas. Curvas força vs. deslocamento e força vs. deformação dos materiais são apresentadas e discutidas. Constatou-se que o comportamento estrutural das vigas de concreto reforçadas com bambu segue a teoria de flexão de Bernoulli-Kirchoff, sendo possível a aplicação dos procedimentos usuais de dimensionamento do concreto armado no projeto desses elementos. Observou-se, também, que a capacidade de carga dessas vigas se assemelha à das vigas de aço; contudo, estas são mais rígidas que aquelas.

Palavras-chave: concreto armado, vigas, reforço não metálico

Concrete beams reinforced with bamboo (*Dendrocalamus giganteus*). I: Experimental analysis

Abstract: In this paper, an experimental study about bamboo reinforced concrete beams is presented and discussed. Ten reinforced concrete beams were tested, where eight of them were reinforced with *Dendrocalamus giganteus* bamboo-splint and two reference beams were reinforced with steel bars. Two factors were studied: the longitudinal reinforcement ratio (1.6 and 3.2%) and the area/perimeter ratio of the bamboo-splint (0.25 and 0.33 cm). For each factor combination, two beams were cast. Force vs. displacement and force vs. strain curves are presented and discussed. It was found out that the structural behaviour of bamboo-concrete beams follow the Bernoulli-Kirchoff bending theory. Therefore, the usual design procedures of reinforced concrete can be used to design the bamboo-concrete beams. The load capacity of the bamboo-concrete beams is almost the same as that of reinforced with steel; nevertheless, are more stiffer than those ones.

Key words: reinforced concrete, beam, non metallic reinforcement

INTRODUÇÃO

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 al. (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 deste 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, conseqüentemente, 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 al., 1996; Da Rosa, 2002); entretanto, Czarnieski et al. (2004) verificaram que a maioria desses trabalhos apresenta problemas em suas metodologias experimentais e mostraram que a tensão de aderência de dimensionamento entre o bambu e o concreto é cerca de apenas 20% inferior àquela entre o aço liso e o concreto. Em vigas isoladas de concreto armado com solicitações elevadas, apenas a aderência aço-concreto não é capaz de garantir a transferência de forças entre esses materiais, caso em que é comum o dobramento da armadura para a formação de ganchos de ancoragem nas extremidades das barras; tais ganchos aumentam consideravelmente a dificuldade de deslocamentos relativos entre a armadura e o concreto e garantem a transferência de forças, mesmo para níveis de solicitações próximas ao colapso da estrutura. Diante disso, observa-se que a dificuldade no dobramento das varas de bambu torna mais restrita a sua utilização como reforço em vigas de concreto armado.

Outra característica essencial utilizada na concepção das estruturas de concreto armado consiste em se admitir que o reforço apresente homogeneidade e isotropia na direção da tensão principal de tração, fato este não observado no bambu (MacGregor, 1997). Lima Jr. et al. (2000) estudaram as propriedades mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus* e concluíram que as resistências à tração desse material na região nodal e internodal são de 97 e 277 MPa, respectivamente, e que os módulos de elasticidade nessas regiões são, respectivamente, 13 e 23 GPa. A variação de resistência à tração ao longo do comprimento das varas de bambu faz com que as estruturas de concreto armado atinjam o colapso em regiões que não são, necessariamente, as mais solicitadas, gerando grande dificuldade no dimensionamento. Verifica-se, ainda, que a variação do módulo de elasticidade gera seções transversais com baixa rigidez, nas quais ocorrem concentrações de deformações e, por sua vez, formação de fissuras com grandes aberturas; assim, nota-se que, em grande parte, as fissuras de flexão que surgem nas vigas de concreto reforçadas com bambu ocorrem nas seções transversais onde as varas apresentam os nós. Uma técnica simples que pode amenizar os problemas citados acima é a utilização de um número maior de varas de bambu com as regiões nodais e internodais intercaladas; contudo, esta técnica dificulta a determinação da resistência à tração e do módulo de elasticidade reais do reforço em uma seção transversal.

Os resultados apresentados neste artigo fazem parte de um programa de pesquisa mais amplo, que visa estudar estruturas de concreto reforçadas com bambu. O artigo em questão corresponde à primeira parte do estudo das vigas de concreto reforçadas com bambu *Dendrocalamus giganteus* e apresenta os resultados do programa experimental realizado. Buscou-se avaliar o comportamento estrutural desses elementos e verificar se as teorias utilizadas no dimensionamento das estruturas usuais de concreto armado podem ser estendidas para eles; na segunda parte do programa (Lima Jr., 2005) são apresentados os critérios de dimensionamento, a modelagem numérica e a resistência à tração e o módulo de elasticidade globais das varas de bambu com regiões nodais e internodais intercaladas.

MATERIAL E MÉTODOS

Metodologia de estudo das vigas de concreto reforçadas com bambu

O dimensionamento das vigas de concreto armado a flexão é fundamentado em três hipóteses básicas, quais sejam: seções transversais permanecem planas e perpendiculares à linha neutra, após a flexão (teoria de Bernoulli-Kirchoff), a deformação no reforço e nas fibras adjacentes de concreto são iguais (teoria da compatibilidade de deformações) e as tensões no aço e no concreto podem ser calculadas a partir de diagramas tensão vs. deformação idealizados, representativos do comportamento daqueles materiais, obtidos por meio de ensaio de corpos-de-prova (MacGregor, 1997).

A primeira hipótese implica em que as deformações em uma seção transversal se distribuem linearmente ao longo da altura e, deste modo, os deslocamentos transversais das vigas ($w(x)$) são regidos pela Eq. 1:

$$\frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} = -\frac{M(x)}{E_c \cdot I} \quad (1)$$

na qual $M(x)$ é a função momento fletor ao longo da viga, E_c é o módulo de elasticidade do concreto e I é o momento de inércia da seção transversal homogeneizada da viga.

A avaliação experimental do comportamento estrutural de vigas de concreto armado é realizada, usualmente, por meio do ensaio de Stuttgart (Figura 1), o qual gera diagramas de momentos fletores que, por sua vez, variam linearmente entre os pontos de aplicação das forças e os apoios, e momento fletor constante entre os pontos de aplicação das forças. Avaliando-se a forma do diagrama de momento fletor gerado neste ensaio e se utilizando a Eq. 1, obtêm-se que as deflexões das vigas de concreto armado podem ser calculadas com base na Eq. 2:

$$w(x) = -\frac{P}{6 \cdot E_c \cdot I} \cdot x^3 + \frac{P \cdot a \cdot (L - a)}{2 \cdot E_c \cdot I} \cdot x \quad 0 \leq x \leq a$$

$$w(x) = -\frac{P \cdot a}{2 \cdot E_c \cdot I} \cdot x^2 + \frac{P \cdot a \cdot L}{2 \cdot E_c \cdot I} \cdot x - \frac{P \cdot a^3}{6 \cdot E_c \cdot I} \quad a \leq x \leq a + b$$

$$w(x) = \frac{P}{6 \cdot E_c \cdot I} \cdot x^3 - \frac{P \cdot (2 \cdot a + b)}{2 \cdot E_c \cdot I} \cdot x^2 + \frac{P \cdot (a^2 + 2 \cdot a \cdot b + a \cdot L + b^2)}{2 \cdot E_c \cdot I} \cdot x - \frac{P \cdot L \cdot (L^2 - 3 \cdot a \cdot L - 3 \cdot b \cdot L + 3 \cdot a^2 + 6 \cdot a \cdot b + 3 \cdot b^2)}{6 \cdot E_c \cdot I}$$

$$a + b \leq x \leq L$$

na qual P é força aplicada e os comprimentos a , b , L e x são definidos na Figura 1. Para que as vigas de bambu obedeam a teoria de Bernoulli-Kirchoff, os deslocamentos transversais desses elemento têm que ser governados pela Eq. 2.

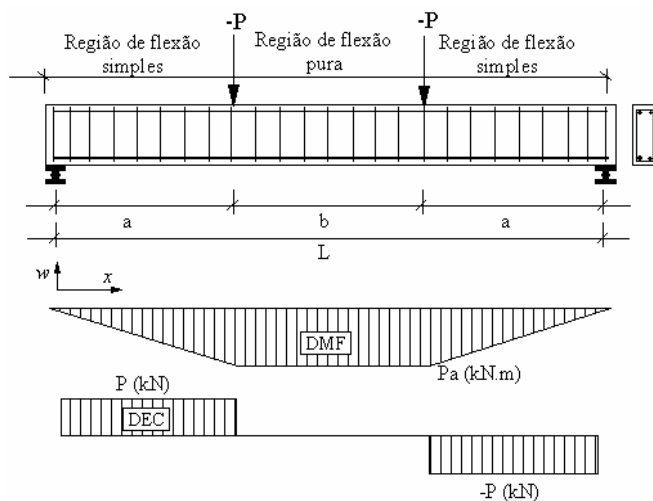


Figura 1. Detalhes do ensaio de Stuttgart

A segunda hipótese sugere que a deformação do reforço é igual à deformação do concreto em sua região adjacente. Para que esta hipótese seja verdadeira, é necessária uma perfeita aderência entre o reforço e o concreto. Com tal hipótese, a curvatura da seção transversal da viga pode ser calculada com base na Eq. 3:

$$\frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} = \frac{|\varepsilon_{cc}(x)| + |\varepsilon_s(x)|}{d} \quad (3)$$

na qual $|\varepsilon_{cc}(x)|$ é o módulo da função deformação da fibra mais comprimida do concreto ao longo da viga, $|\varepsilon_s(x)|$ é o módulo da função deformação do reforço ao longo da viga e d é a distância do centro de gravidade da armadura à face superior da viga. Avaliando as deformações na seção transversal posicionada a $L/2$ do apoio e se considerando as Eqs. 2 e 3, obtém-se que,

para existir a compatibilidade de deformações, a deformação da armadura em $L/2$ é dada pela Eq. 4:

$$\varepsilon_s(L/2) = -\frac{P \cdot a \cdot d}{E_c \cdot I} - |\varepsilon_{cc}(L/2)| \quad (4)$$

A terceira e última hipótese implica no fato de que as vigas de concreto armado devem apresentar comportamento momento vs. curvatura e força vs. deslocamento regido pelas propriedades dos materiais que as compõem; assim, quando uma viga de concreto é reforçada por barras de aço, esses diagramas apresentam, inicialmente, um trecho retilíneo (domínio 1) até o início da fissuração do concreto; neste ponto se observa que o momento de inércia da seção transversal da viga diminui e, conseqüentemente, dá-se redução da inclinação do diagrama; a partir desse ponto, os diagramas momento vs. curvatura e força vs. deslocamento da viga, se mantêm praticamente com a mesma inclinação até a armadura atingir o escoamento (domínio 2); a partir daí e com a redução drástica do valor do módulo de elasticidade do aço, tem-se que a inclinação da curva é reduzida para valores próximos de zero (domínio 3); em seguida, verifica-se que os valores dos momentos e/ou das forças, praticamente não se alteram, mas as curvaturas e/ou deslocamentos vão sendo incrementados até o colapso completo do elemento estrutural. Na Figura 2 apresenta-se o diagrama típico momento vs. curvatura de uma viga de concreto armado com barra de aço. Segundo Lima Jr. et al. (2000), o bambu apresenta um diagrama tensão de tração vs. deformação elástico-linear, até a ruptura; deste modo, prevê-se que o comportamento das vigas de concreto reforçadas com bambu seja semelhante ao apresentado na Figura 2; contudo, isso deve ocorrer sem a presença do trecho horizontal entre o início do escoamento do reforço e o colapso do elemento estrutural.

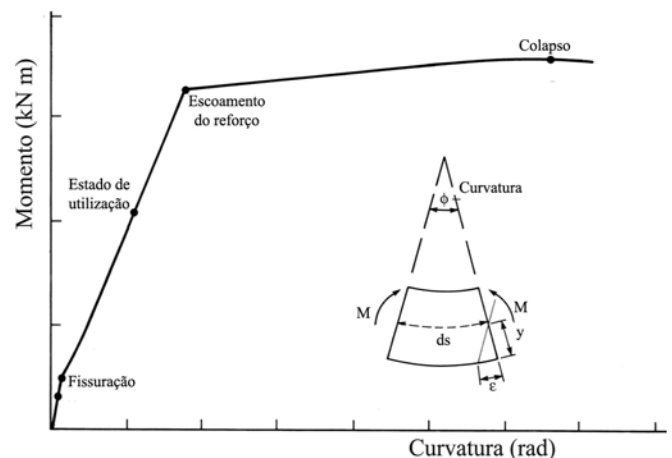


Figura 2. Comportamento típico momento vs. curvatura de vigas de concreto armado

Material

Para a produção do concreto utilizado nas vigas, foram utilizados: areia quartzosa com módulo de finura de 2,11, diâmetro máximo de 2,4 mm e massa unitária de 1,62 kg dm⁻³ (ABNT 248, 2003; ABNT 52, 2003); agregado graúdo de origem basáltica com módulo de finura de 5,79, diâmetro máximo de

9,5 mm e massa unitária de 1,52 kg dm⁻³ (ABNT 248, 2003; ABNT 53, 2003); e cimento Portland branco, CPB-40, que apresentava finura Blaine de 426 m² kg.

As porcentagens dos materiais foram definidas a partir de uma curva experimental de dosagem, para a qual se adotou um teor de argamassa de 51%, uma relação água/materiais secos de 10%, abatimento no cone de Abrams de 12 ± 2 cm e resistência a compressão média do concreto, de 30 MPa. As resistências dos concretos foram avaliadas aos quatorze dias, por meio de ensaio de corpos-de-prova cilíndricos 15 x 30 cm, os quais seguiram as prescrições da norma brasileira (ABNT 5739, 1994). Com base nas curvas de dosagem e na resistência preestabelecida, obteve-se a seguinte proporção em massa de materiais: 1:1,86:2,75 (cimento:agregado miúdo:agregado graúdo) e relação água cimento de 0,56. As características dos concretos utilizados são apresentadas na Tabela 1.

O bambu utilizado foi da espécie *Dendrocalamus giganteus*, cujos colmos foram cortados com idade entre dois e três anos e deixados para secar na 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. O bambu apresentou comportamento à tração elástico-linear até a ruptura, tanto para a região nodal como para a internodal. As resistências à tração das regiões nodal e internodal foram 97 e 277 MPa, respectivamente, e os módulos de elasticidade foram 13 e 23 GPa, respectivamente.

Utilizaram-se barras de aço nervuradas com diâmetro de 8 e 5 mm. Três amostras de 80 cm de comprimento, de cada diâmetro, foram coletadas para ensaio de tração uniaxial. Os corpos-de-prova foram pesados em balança com precisão de 0,01 g, tiveram o comprimento medido e, em seguida, foram calculados as áreas transversais e os respectivos diâmetros, considerando-se a massa específica do aço igual a 7850 kg m⁻³. Após o cálculo dos diâmetros, os corpos-de-prova foram instrumentados com “clip gage” e ensaiados em uma máquina universal de ensaios. As barras de 8 e 5 mm apresentaram tensão média de escoamento de 686 e 701 MPa, respectivamente, e módulo de elasticidade médio de 222 e 215 GPa, respectivamente.

Característica dos espécimes

Para realização do programa experimental das vigas, utilizou-se uma programação estatística de experimento, na qual duas variáveis de influência foram selecionadas: a taxa de armadura

longitudinal (fator X₁) e a relação área/perímetro das varas de bambu que compunham a armadura longitudinal (fator X₂); dois níveis de estudo para as duas variáveis foram utilizados: taxas de armadura longitudinal de 1,6 e 3,2%, e varas de bambu com relação área/perímetro de 0,25 e 0,33 cm. Para cada combinação de variável foram preparadas duas réplicas, resultando em um programa fatorial de 8 vigas; além das oito vigas armadas longitudinalmente com varas de bambu, ensaiaram-se mais duas vigas de referência, armadas longitudinalmente com barras de aço.

Todas as dez vigas apresentavam seção transversal retangular com 25 cm de altura e 10 cm de largura, comprimento de 260 cm e vão teórico de 250 cm, e foram dimensionadas de modo a apresentar colapsos por flexão, com ruptura da armadura longitudinal; assim, utilizaram-se armaduras transversais que se compunham de estribos de dois ramos, com 5 mm de diâmetro e espaçados a cada 10 cm na região de flexão pura e a cada 7 cm na região de flexão simples. Objetivando-se evitar a condição de colapso por esmagamento do concreto, a resistência à compressão do concreto foi tomada como igual a 30 MPa.

Para preparação das armaduras das oito vigas de bambu, os colmos de bambu foram selecionados, após secagem, sendo utilizados apenas os trechos intermediários; em seguida, foram levados a uma marcenaria, para serem serrados em serra circular. Foram extraídas dos colmos varas com comprimento de 2,6 m e seções transversais retangulares com largura de 1 e 2 cm e espessura igual à da parede do bambu; após o corte, as varas foram escovadas e limpas, e depois elas tiveram suas seções transversais medidas com paquímetro de 0,01 mm de sensibilidade a cada 25 cm. Ao final desses procedimentos, as varas de bambu foram selecionadas para a montagem das armaduras, tendo-se o cuidado, porém, de manter os nós em posições intercaladas. Duas vigas foram armadas com duas varas de bambu de 2 cm x espessura (vigas 3 e 4); duas armadas com quatro varas de bambu de 1 cm x espessura (vigas 5 e 6); duas armadas com quatro varas de bambu de 2 cm x espessura (vigas 7 e 8) e, finalmente, duas armadas com oito varas de bambu de 1 cm x espessura (vigas 9 e 10). Na Figura 3 apresentam-se os detalhes das armaduras utilizadas nas vigas.

As armaduras longitudinais das vigas de referência foram calculadas de modo que apresentassem o mesmo índice de reforço das vigas de bambu, com 1,6% de armadura longitudinal

Tabela 1. Características das vigas

Espécime	Tipo de armadura	A _r (cm ²)	A _m (cm ²)	f _{cj14} - s (MPa)	d (cm)	L (cm)	h (cm)	b (cm)	2P (kN)
Viga 1	Aço - 2φ 8,0	1,00	1,00	27,16 - 0,75	23,8				41,20
Viga 2	Aço - 2φ 8,0	1,00	1,00	27,11 - 0,20	23,9				39,83
Viga 3	Bambu - 2φ (2x1)	5,04	≈ 4,50	27,03 - 1,08	23,6				33,04
Viga 4	Bambu - 2φ (2x1)	5,21	≈ 4,50	26,26 - 0,48	23,7				32,90
Viga 5	Bambu - 4φ (1x1)	4,75	≈ 4,50	29,46 - 1,11	23,7	250	25	10	26,27
Viga 6	Bambu - 4φ (1x1)	5,03	≈ 4,50	28,97 - 1,13	23,7				28,66
Viga 7	Bambu - 4φ (2x1)	8,76	≈ 9,00	28,77 - 1,40	22,3				44,62
Viga 8	Bambu - 4φ (2x1)	9,42	≈ 9,00	28,56 - 1,67	22,6				58,53
Viga 9	Bambu - 8φ (1x1)	12,11	≈ 9,00	26,69 - 1,78	22,5				57,16
Viga 10	Bambu - 8φ (1x1)	11,40	≈ 9,00	27,73 - 0,80	22,3				58,06

Nota: A_r é a área média de reforço, A_m é a área calculada considerando-se apenas as regiões internodais do reforço, f_{cj14} é a resistência a compressão média do concreto avaliada aos 14 dias, s é o desvio-padrão da amostra, d é a altura útil da seção transversal, L é o vão de centro a centro de apoio, h é a altura da seção transversal, b é a largura da seção transversal e 2P é a carga última aplicada na viga considerando-se a soma das duas forças pontuais

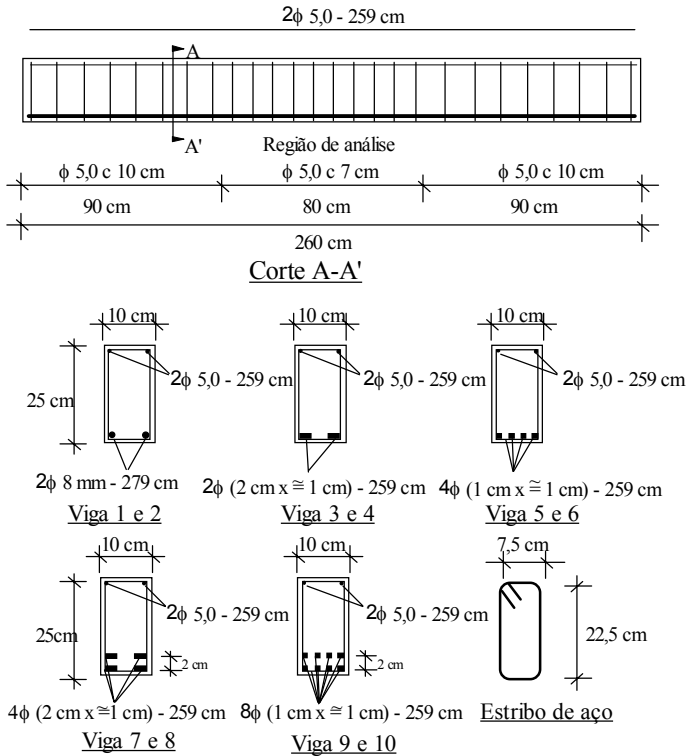


Figura 3. Características dos espécimes analisados

de bambu; desta forma, a área das barras de aço vezes a tensão de escoamento do aço teria que ser igual à área das varas de bambu multiplicada pela média das resistências do bambu nas regiões nodal e internodal. Com base neste cálculo, adotaram-se duas barras de 8 mm compondo a armadura longitudinal das vigas de referência. Confeccionaram-se duas vigas de referência, as quais foram nomeadas de vigas 1 e 2. Na Figura 3 mostram-se as características dessas vigas.

As vigas foram moldadas em fôrmas metálicas, sendo o concreto vibrado mecanicamente, por meio de vibrador de agulha. Após a concretagem, espumas molhadas foram dispostas sobre as mesmas, durante 24 h para, logo depois, as vigas serem desenformadas, regadas com água e cobertas por lona plástica, permanecendo assim pelo período 7 dias. Por ocasião da concretagem de cada viga, três corpos-de-prova cilíndricos 150 x 300 mm foram moldados para avaliação da resistência à compressão, e depois submetidos ao mesmo processo de cura das vigas; após este processo, as vigas foram preparadas para o ensaio, que ocorreu aos 14 dias após a concretagem; por fim, as resistências à compressão dos concretos nos dias dos ensaios das vigas foram avaliadas (Tabela 1).

Ensaio e instrumentação

As vigas foram ensaiadas em uma mesa de reação com capacidade de carga de 300 kN. O carregamento foi aplicado em quatro pontos, dois ativos e dois reativos, por meio de dois cilindros hidráulicos. O sistema de carga utilizado garantia que as forças aplicadas nos dois cilindros fossem as mesmas. Células de carga com capacidade de 100 kN foram conectadas aos cilindros hidráulicos e suas leituras realizadas por meio de um visor analógico. O controle de carregamento foi manual a partir da força aplicada, enquanto o carregamento foi aplicado

de modo quase estático, monotonicamente, e as leituras dos instrumentos realizadas a cada 2,5 kN. Detalhes do ensaio são apresentados na Figura 4.

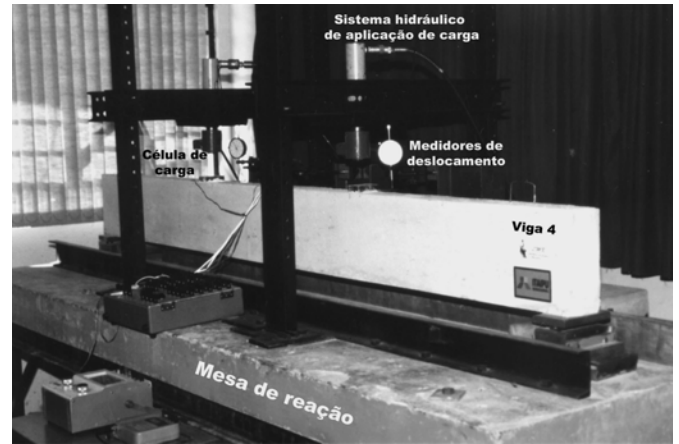


Figura 4. Detalhe do ensaio das vigas

Três medidores de deslocamento mecânicos, com sensibilidade de 0,01 mm, foram utilizados para avaliar as deflexões abaixo dos pontos de aplicação das forças e na seção transversal central das vigas. Utilizaram-se dois extensômetros de resistência elétrica para medir as deformações no concreto e na armadura longitudinal no meio do vão, ressaltando-se que um foi disposto em uma das barras da armadura longitudinal e o outro disposto na face superior das vigas no concreto. Leituras de abertura de fissuras de cisalhamento e flexão foram realizadas constantemente, por fissurômetro, com lente de aumento de 20 vezes. Na Figura 5 apresentam-se detalhes da instrumentação das vigas.

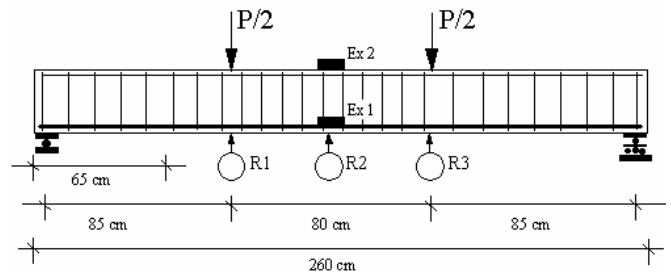


Figura 5. Detalhes da instrumentação

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento geral

As resistências dos concretos dos corpos-de-prova ficaram próximas da resistência preestabelecida, de 30 MPa, e a variação das resistências dos concretos entre as vigas foi desprezível, observando-se desvio-padrão global de 1,79 MPa e resistência média global do concreto de 27,67 MPa. Em todas as concretagens os concretos apresentaram boa trabalhabilidade, com abatimento médio no cone de Abrams de 12,5 cm. Na Tabela 1 apresentam-se as resistências médias dos concretos das vigas.

Os procedimentos de ensaio mostraram-se adequados. Todas as vigas apresentaram colapso por tração excessiva na

armadura longitudinal, com seção de ruptura dentro da região de análise. Em todas as vigas armadas com bambu, o colapso foi provocado por ruptura das varas, sempre na região nodal; deste modo, constata-se que a seção de colapso nem sempre foi a posicionada no meio do vão teórico; contudo, esta seção sempre permaneceu dentro da região de flexão pura. Finalmente, observou-se maior número de fissuras nas vigas de referência que nas vigas de bambu; em geral, as vigas de referência apresentaram fissuras espaçadas em média a cada 10 cm e as de bambu a cada 15 cm. Na Figura 6 apresentam-se os detalhes do modo característico de colapso das vigas de bambu.

Em virtude da variabilidade da espessura da parede dos colmos do bambu, as taxas de armadura longitudinal das vigas gêmeas não foram exatamente iguais, porém os diagramas força vs. deslocamento, foram coincidentes, observando-se apenas

pequenas discrepâncias na capacidade de carga dessas vigas (Tabela 1).

Na Figura 7 apresentam-se as curvas força vs. deslocamento das vigas de bambu e das vigas de referência. Comparando-se os diagramas das vigas de bambu com os das vigas de referência, nota-se que em todos os casos as vigas armadas com aço apresentaram maior rigidez, fato este esperado, uma vez que o módulo de elasticidade do aço é cerca de 14 vezes superior ao do bambu; verifica-se, ainda, que a carga média de colapso das vigas 3, 4, 5 e 6 foi cerca de 25% inferior em relação às de referência, em razão do valor da resistência do bambu utilizado no cálculo ter sido o valor médio das resistências das regiões nodal e internodal, 187 MPa; entretanto, o valor real da resistência das varas de bambu é menor que este valor. As vigas com 3,2% de taxa de armadura longitudinal apresentaram força última resistente, cerca de 80% superior às das vigas com 1,6%.

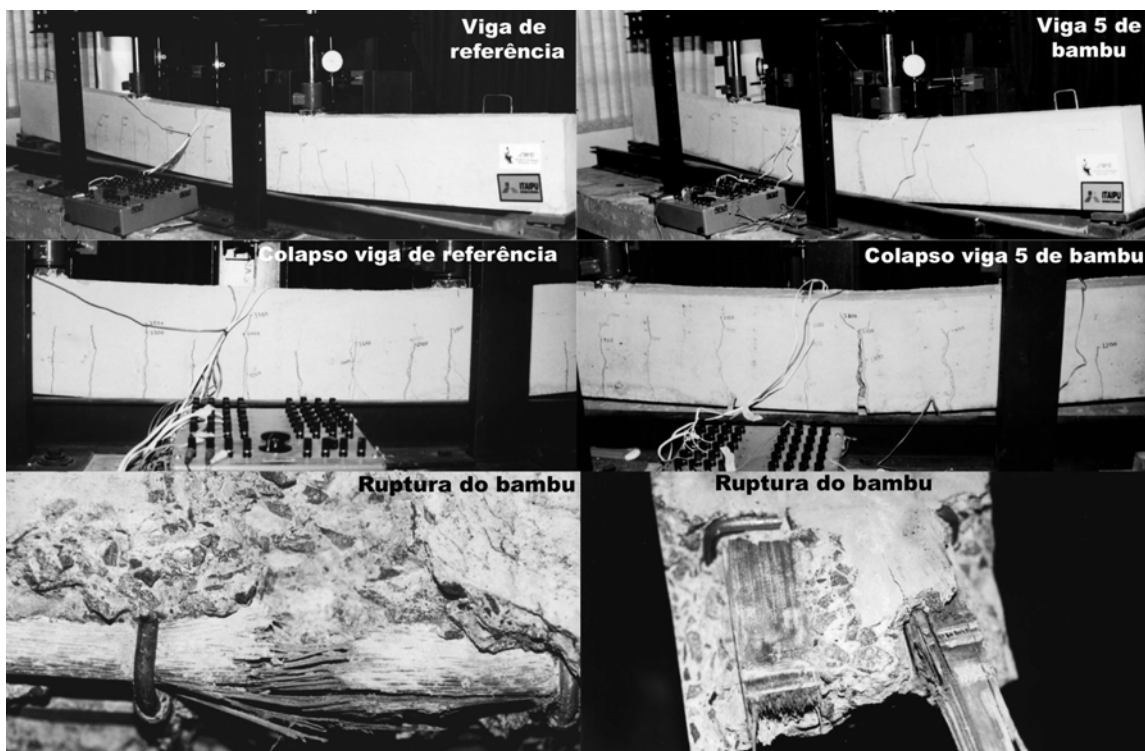


Figura 6. Detalhes dos modos de colapsos típicos das vigas

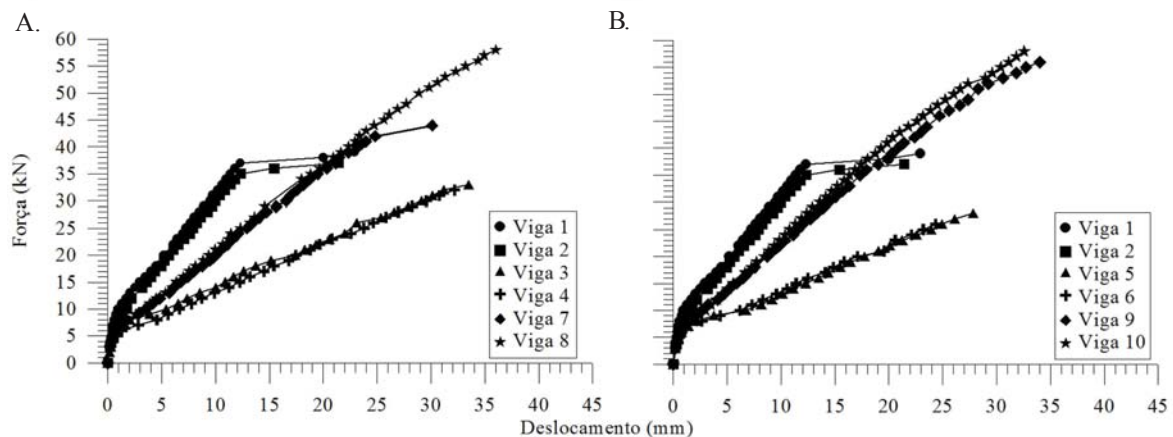


Figura 7. Diagramas força versus deslocamento transversal no meio do vão das vigas: A. vigas 1, 2, 3, 4, 7 e 8, e B. vigas 1, 2, 5, 6, 9 e 10

Como previsto, os diagramas das vigas de referência seguiram exatamente o padrão apresentado e discutido na metodologia de estudo do presente trabalho; de início, verificou-se um trecho retilíneo com grande inclinação entre o valor de força nula e de aproximadamente 7 kN, ponto em que se observou o aparecimento da primeira fissura de flexão e, conseqüentemente, redução da rigidez da viga; a partir daí, o diagrama apresentou-se linear, com inclinação da ordem de 63% em relação à do trecho inicial; este segundo trecho iniciou com força de aproximadamente 7 kN e se estendeu até a força de 37 kN. Para esta última intensidade de força, constatou-se o início do escoamento da armadura longitudinal, caracterizado pelo trecho horizontal do diagrama.

Os diagramas das vigas de concreto reforçadas com bambu também se comportaram como previsto na fundamentação teórica do presente trabalho, começando com um trecho retilíneo entre a intensidade de força nula e aproximadamente 7 kN, onde se iniciou o processo de fissuração do concreto; em seguida, observou-se um segundo trecho retilíneo, com inclinação de aproximadamente 30 e 50% da inclinação do trecho inicial para as vigas com 1,6 e 3,2% de taxa de armadura longitudinal de bambu, respectivamente. Este segundo trecho se iniciou logo após o início da fissuração do concreto e foi até

a força de colapso das vigas. Como esperado, as vigas de concreto reforçadas com bambu não apresentam o terceiro trecho horizontal do diagrama, que caracteriza o escoamento da armadura.

Na Figura 8 tem-se as curvas força vs. deformação na armadura longitudinal na seção transversal no meio do vão teórico das vigas. Observa-se que as deformações nas barras de aço correspondentes à força última das vigas de referência, foram da ordem de 4%, embora se previsse que essa deformação ultrapassaria o valor de 10%; este fato não ocorreu, uma vez que as seções transversais de colapso dessas vigas não coincidiram exatamente com a seção transversal que continha os extensômetros elétricos; já para as vigas de bambu, pôde-se verificar pequena diferença entre as deformações do bambu correspondente à força última, na qual a deformação última média e o correspondente desvio-padrão foram de 9,04 e 1,02%, respectivamente.

Como as vigas foram dimensionadas para apresentar colapso por flexão com ruptura da armadura longitudinal, previa-se que as deformações do concreto fossem inferiores à deformação de ruptura desse material que, em flexão, é da ordem de 3,5%. Na Figura 9 mostram-se os diagramas força vs. deformação do concreto na seção transversal, posicionada no

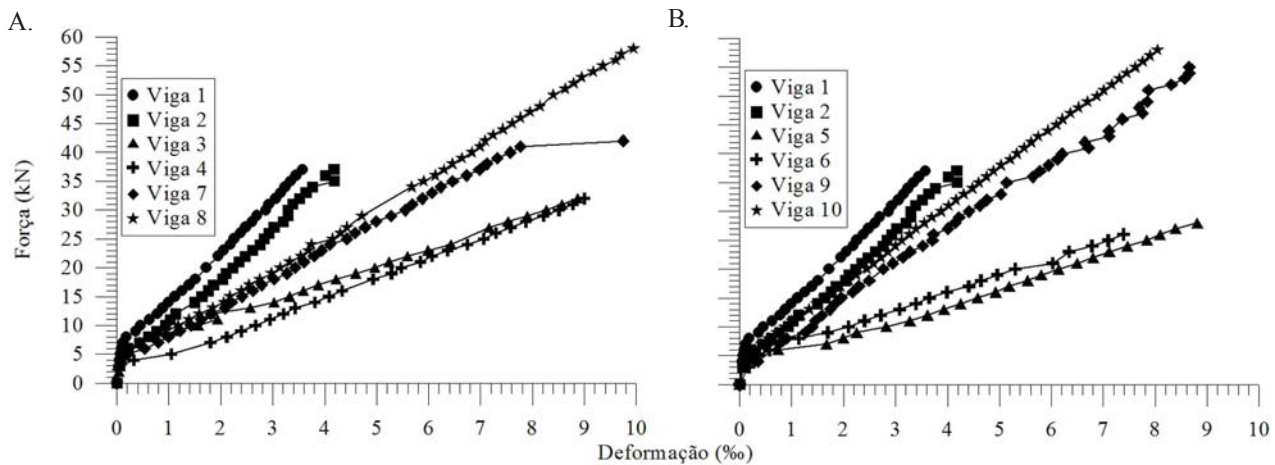


Figura 8. Diagramas força versus deformação da armadura longitudinal na seção transversal posicionada no meio do vão teórico das vigas: A. vigas 1, 2, 3, 4, 7 e 8, e B. vigas 1, 2, 5, 6, 9 e 10

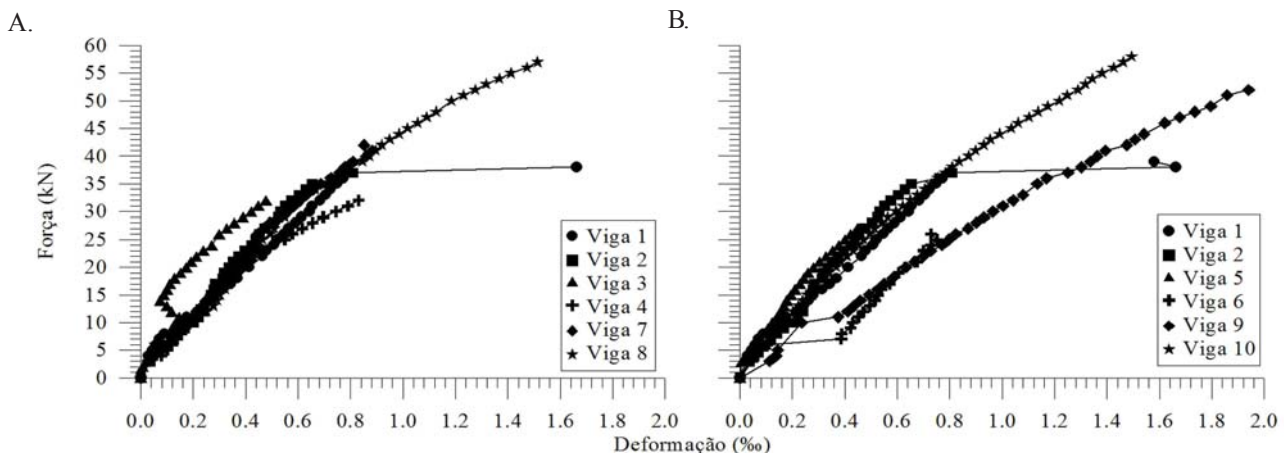


Figura 9. Diagramas força versus deformação do concreto na seção transversal posicionada no meio do vão teórico das vigas: A. vigas 1, 2, 3, 4, 7 e 8, e B. vigas 1, 2, 5, 6, 9 e 10

meio do vão teórico, nos quais se pode constatar que em todas as vigas a deformação máxima do concreto não ultrapassou o valor de 2‰.

Convalidação da teoria de Bernoulli-Kirchoff

Para verificar se a teoria de Bernoulli-Kirchoff pode ser utilizada nas vigas de bambu, aplicou-se a equ. 2 a todas as 8 vigas de bambu para níveis de força correspondentes a 45 e 90% da força última de cada viga; para isto, calcularam-se, inicialmente, os valores da rigidez, $E_c I$, de cada viga para os níveis de força estabelecidos por meio de regressão das três leituras de deslocamento experimentais; em seguida, esses valores foram substituídos na Eq. 2 juntamente com os respectivos valores das forças. Na Figura 10 apresentam-se as curvas das linhas elásticas das vigas ensaiadas e os respectivos pontos experimentais. As vigas de referência apresentaram coeficientes de determinação, R^2 , superiores a 99% para os dois níveis de força, enquanto nas vigas reforçadas com bambu se observaram coeficientes de determinação, R^2 , superiores a 99% para os dois níveis de força; esses valores indicam que as vigas de concreto reforçadas com varas de bambu também obedecem à teoria de flexão de Bernoulli-Kirchoff.

Convalidação da teoria de compatibilidade de deformação

Para avaliar a compatibilidade de deformações entre o concreto e as varas de bambu das vigas ensaiadas, utilizaram-se apenas os trechos das curvas força vs. deformação do bambu após a fissuração do concreto; deste modo calculou-se, inicialmente, o valor da rigidez, $E_c I$, de cada viga, com base no diagrama experimental força vs. deslocamento, trasladando-se, porém, os eixos das coordenadas cartesianas para o ponto do diagrama força vs. deslocamento correspondente à força de fissuração; logo após, esses valores foram substituídos na Eq. 4, conjuntamente com os valores das forças aplicadas e as respectivas deformações do concreto; então, desenharam-se os diagramas deformação experimental versus deformação teórica da armadura longitudinal, apresentados na Figura 11. Analisando-se esses diagramas observa-se um eixo a 45°, que corresponde aos pontos onde a deformação experimental é igual à deformação teórica e, assim, a correlação entre os valores experimentais e os teóricos será máxima quando os diagramas coincidirem com esse eixo. Constata-se, então, boa correlação entre os valores experimentais e os teóricos para todas as vigas ensaiadas. O coeficiente de determinação, R^2 , médio para as vigas de referência, foi de 97,01% e, para as vigas armadas com bambu, de 97,51%; comprova-se, daí, que o comportamento observado nas vigas armadas com aço é

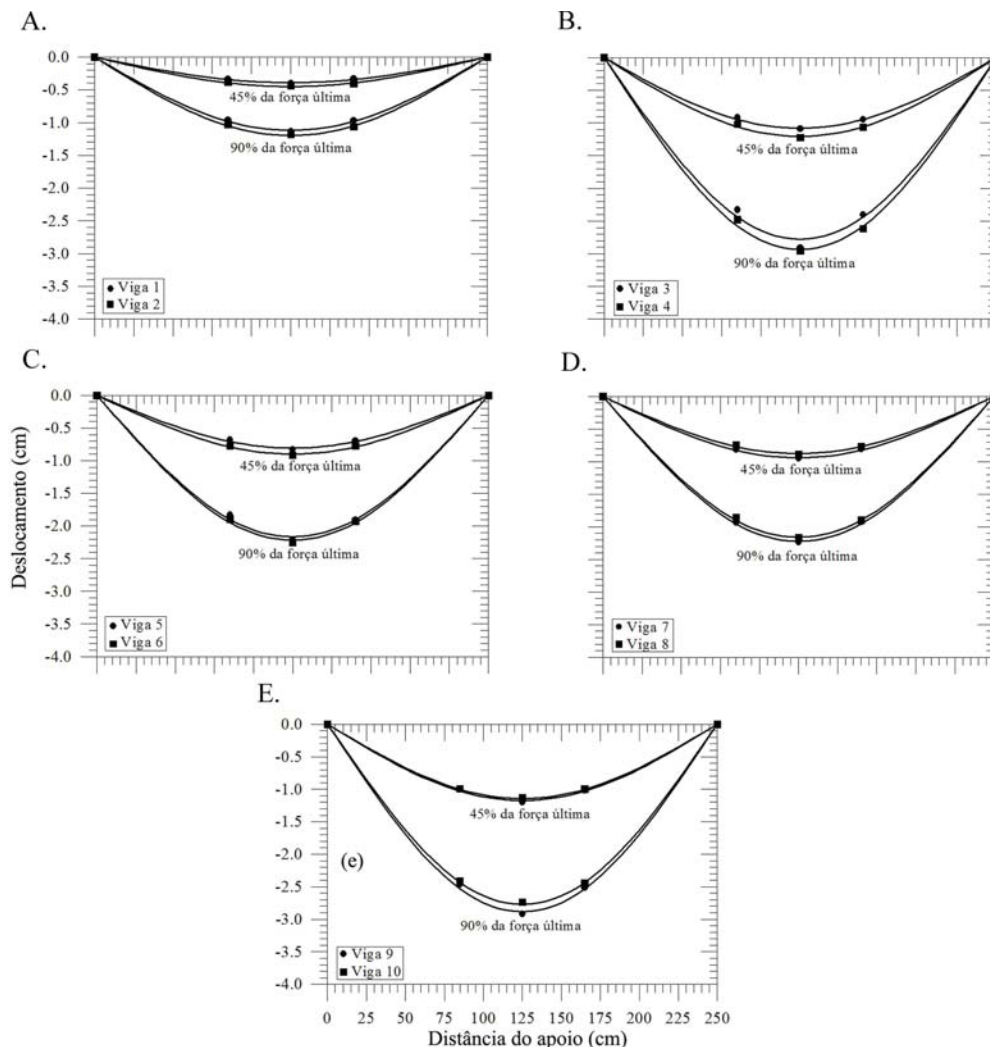


Figura 10. Linhas elásticas teóricas e experimentais: A) vigas 1 e 2; B) vigas 3 e 4; C) vigas 5 e 6; D) vigas 7 e 8; e E) vigas 9 e 10

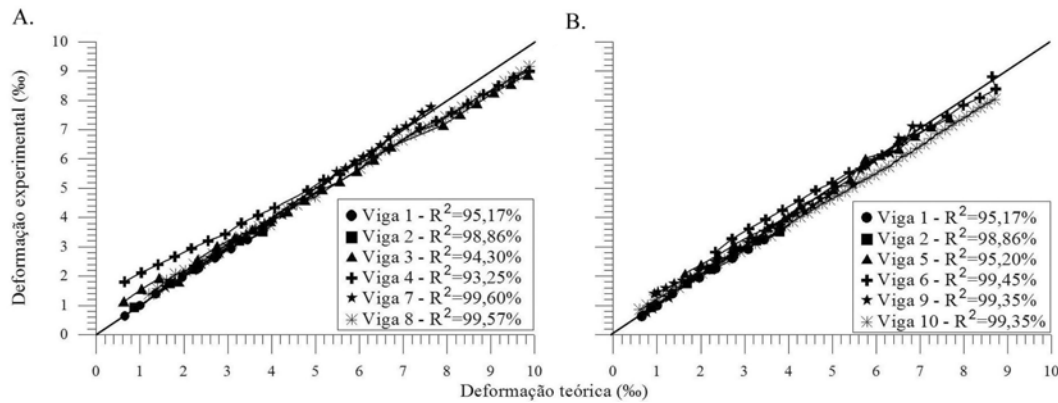


Figura 11. Diagramas deformação experimental versus deformação teórica da armadura longitudinal das vigas: A) vigas 1, 2, 3, 4, 7 e 8, e B) vigas 1, 2, 5, 6, 9 e 10

Tabela 2. Análise de variância dos valores das forças últimas resistente das vigas

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Fator (F_o)	Valor mínimo requerido para a significância do fator ($F_{0,01,n,4}$) e ($F_{0,05,n,4}$)	
Fatores principais						
X_1	3355,027	1	3355,027	286,27	21,20	7,71
X_2	46,792	1	46,792	3,99	21,20	7,71
Interação dos fatores						
$X_1 \times X_2$	25,535	1	25,535	2,17	21,20	7,71
Resíduo	46,879	4	11,719	--		
Total	347,234	7	--	--		

Tabela 3. Análise de variância dos valores da rigidez das vigas

Variável	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	Fator (F_o)	Valor mínimo requerido para a significância do fator ($F_{0,01,n,4}$) e ($F_{0,05,n,4}$)	
Fatores principais						
X_1	1188,281	1	1188,281	47,52	21,20	7,71
X_2	0,139	1	0,139	0,00	21,20	7,71
Interação dos fatores						
$X_1 \times X_2$	66,587	1	66,587	2,66	21,20	7,71
Resíduo	100,015	4	25,003	--		
Total	1355,023	7	--	--		

similar ao daquelas armadas com bambu, podendo-se afirmar que a compatibilidade de deformações também é observada para as vigas de concreto armadas com bambu.

Influência da taxa de armadura e da relação área perímetro

Objetivando-se avaliar a influência da taxa de armadura longitudinal (Fator X_1) e da relação área/perímetro (Fator X_2) sobre a capacidade resistente e a rigidez no domínio 2 das vigas armadas com bambu, realizaram-se análises de variância sobre esses parâmetros. Os graus de significância do efeito de cada fator foram testados para níveis de confiabilidade de 95 e 99%, usando-se o teste F. Na Tabela 2 apresentam-se os resultados da análise de variância realizada sobre as forças últimas; com base nesses resultados, nota-se que a influência da taxa de armadura longitudinal é significativa para um nível de confiabilidade de 99%; contudo, a relação área/perímetro e a interação entre os dois fatores estudados, mostraram-se não significantes para um nível de confiabilidade de 99%.

Apresentam-se, na Tabela 3, os resultados da análise de variância realizada sobre a rigidez das vigas; com base nesses resultados, novamente se nota que a influência da taxa de

armadura longitudinal é significativa para um nível de confiabilidade de 99%, porém a relação área/perímetro e o acoplamento entre os dois fatores estudados apresentaram-se não significantes para um nível de confiabilidade de 99%.

Com base no exposto, pode-se afirmar que a variação do diâmetro nominal das varas de bambu não influencia na rigidez nem, tampouco, na capacidade de carga das vigas, mas é notório que diâmetros nominais menores do reforço controlam o processo de fissuração de modo mais eficiente que os maiores.

CONCLUSÕES

1. As vigas de concreto reforçadas convencionalmente com aço, apresentam maior rigidez que as reforçadas com bambu.

2. As vigas de concreto reforçadas com bambu obedecem à teoria de Bernoulli-Kirchoff; observa-se, daí, que é possível a aplicação dos procedimentos usuais de dimensionamento das estruturas de concreto armado por barras de aço no dimensionamento dessas vigas.

3. Constatou-se a existência de compatibilidade de deformações entre o bambu e o concreto.

4. Finalmente, verificou-se que a relação área/perímetro não influencia a capacidade de carga nem, tampouco, a rigidez das vigas de concreto reforçadas com bambu.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Laboratório de Concreto da Hidrelétrica ITAIPU, pelo apoio na realização dos ensaios experimentais. Agradecem ainda ao Zoológico Municipal de Cascavel, à Camargo Correa S.A. e à Telhavel, pela doação dos materiais utilizados neste projeto. Finalmente, ao Professor Normando Perazzo Barbosa, pelas sugestões.

LITERATURA CITADA

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR5739 - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos de concreto: Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1994, 7p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBRNM52 - Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 7p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBRNM53 - Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 7p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBRNM248 - Agregados: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003, 7p.
- 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.
- Czarnieski, C.J.; Mesquita, L.P.; Braga Filho, A.C.; Willrich, F.L.; Lima Jr., H.C.; Barbosa, N.P. Avaliação da aderência bambu-concreto. In: Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural. 31, 2004, Mendoza. Anais.... Mendoza: ASAAE, 2004, p.1-16. CD-Room
- Da Rosa, S.P.A.P. Análise teórica e experimental de colunas de concreto armado com bambu. Rio de Janeiro: PUC, 2002, 135p. Dissertação Mestrado
- Ferrão, A.M.; Freire, W.J. Aderência entre bambu e concreto: teste de arrancamento com taliscas de *Bambusa tuldooides*. 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, v.67, n.10, p.841-846, 1970.
- Ghavami, K. Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams. Cement and Concrete Composites, London, v.17, n.4, p.259-351, 1995.
- Ghavami, K.; Hombeck, R.V. Mechanical properties and water-repellent 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, 1981, p.49-55.
- Kurian, N.P.; Kalam, A.K.A. Bamboo reinforced soil-cement for rural use. Indian Concrete Journal, New Delhi, n.51, p.382-389, 1977.
- 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. and Lynsdale, C. (eds.). Sustainable construction into the next millennium: Environmentally friendly and innovative cement based materials. João Pessoa: SNT, 2000, p.394-406.
- Lima Jr., H. C.; Willrich, F. L.; Fabro, G. Vigas de concreto reforçado com bambu *Dendrocalamus giganteus*. II: Modelagem e critérios de dimensionamento. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.9, n.4, p.XXX, 2005.
- Lima Jr., H.C.; Xavier, A.C.; Barbosa, N.P.; Toledo Filho, R.D. 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.
- Macgregor, J.G. Reinforced concrete, mechanics and design. New Jersey: Prentice Hall, 1997, 939p.
- Park, R.; Paulay, T. Reinforced concrete structures. New York: John Wiley & Sons, 1975, 769p.