

# Análise experimental de pilares de concreto com armadura de bambu sob flexocompressão

*Experimental analysis of concrete columns with bamboo reinforcement under eccentric compression*

Aaron Kadima Lukanu Lwa Nzambi 

Dênio Ramam Carvalho de Oliveira 

Euclides Luiz Pires Coêlho 

## Resumo

**E**sta pesquisa avaliou o comportamento de flexocompressão na rigidez da conexão viga-pilar com o uso de armadura de bambu da espécie *Bambusa vulgaris* como alternativa de substituição à armadura convencional de aço, na expectativa de utilizar um material com viés ecológico. Foram confeccionados 4 pilares de concreto armado de comprimento 1.600 mm e de seções transversais de 140x140 mm<sup>2</sup> e de 140x310 mm<sup>2</sup> no trecho interno e nas extremidades do pilar respectivamente, simulando a conexão viga-pilar. Os pilares tinham como única variável a taxa de armadura longitudinal, de 1,03% para o pilar convencional, de 2,14%, 3,21% e 4,29% para os pilares com o bambu. Os resultados quanto à capacidade resistente mostraram que o pilar com a taxa de bambu de 4,29%, ou seja, com a área de armadura quatro vezes a área do aço, apresentou comportamento similar ao pilar com armadura convencional e teve o menor índice de ductilidade, reduzindo consideravelmente a propagação das fissuras. As estimativas teóricas apresentaram variabilidade de apenas 9%. Assim, o bambu, com taxa e aderência adequadas, revelou-se uma alternativa tecnicamente viável e sustentável ao aço na fabricação de elementos estruturais de concreto armado.

**Palavras-chave:** Aço. Concreto. Bambu. *Bambusa vulgaris*. Impactos ambientais.

## Abstract

*This research evaluated the flexo-compression behavior in the rigidity of the beam-pillar connection with the use of bamboo armor of the species bamboo vulgaris as an alternative replacement to conventional steel reinforcement, in the expectation of using an alternative material with ecological biases. They have manufactured reinforced concrete pillars of length 1,600 mm and cross-sections (140 x 140) mm<sup>2</sup> and (140 x 310) mm<sup>2</sup> were made, respectively, in the internal stretch and at the ends of the pillar, simulating the beam-pillar connection. The pillars had as their only variable the longitudinal reinforcement rate, of 1.03% for the conventional pillar, of 2.14%, 3.21% and 4.29% for the pillars with the bamboo. The results regarding the resistant capacity showed that the pillar with the bamboo rate of 4.29%, that is, with the reinforcement area four times the steel area, presented similar behavior to the pillar with conventional reinforcement and had the lowest ductility index, considerably reducing the propagation of cracks. And the theoretical estimates showed variability of only 9%. Thus, bamboo, with an adequate rate and adhesion, revealed a technically viable and sustainable alternative to steel in the manufacture of reinforced concrete structural elements.*

**Keywords:** Reinforced concrete. Bamboo. *Bambusa vulgaris*. Environmental impacts.

<sup>1</sup>Aaron Kadima Lukanu Lwa Nzambi

<sup>1</sup>Universidade Federal do Pará  
Belém - PA - Brasil

<sup>2</sup>Dênio Ramam Carvalho de Oliveira

<sup>2</sup>Universidade Federal do Pará  
Belém - PA - Brasil

<sup>3</sup>Euclides Luiz Pires Coêlho

<sup>3</sup>Universidade Federal do Pará  
Belém - PA - Brasil

Recebido em 05/09/22

Aceito em 14/04/23

## Introdução

Pilares são elementos estruturais fundamentais para a estabilidade e segurança das estruturas. Por estarem sujeitos a carregamentos quase sempre excêntricos em relação ao eixo longitudinal, pesquisadores e normas para projeto recomendam adotar uma excentricidade mínima no dimensionamento, gerando momentos fletores e consequentes tensões de tração e compressão ao longo dos pilares. O mal dimensionamento dos pilares, ou seja, sem a consideração de uma excentricidade inicial, pode levar a estrutura ao colapso. Portanto, o comportamento excêntrico à compressão dos pilares desempenha um papel fundamental na garantia da estabilidade global das estruturas (HONG *et al.*, 2021), bem como as análises sobre a rigidez e a ductilidade dos pilares são indispensáveis. Porém, o aumento da taxa de armadura longitudinal de aço não é o caminho mais econômico e é ecologicamente menos correto. Como solução alternativa e ambientalmente aceita, tem-se o uso de materiais alternativos em substituição parcial ou total das armaduras convencionais de aço, como as fibras artificiais e as naturais, sendo que, destas últimas, o bambu tratado apresenta-se como excelente opção por garantir boa aderência e bom desempenho mecânico da estrutura, além de vantagens como ser renovável e degradável com baixo consumo de energia, baixas emissões de carbono e baixa poluição ambiental (WU *et al.*, 2023; SHARMA *et al.*, 2015). Portanto, na literatura não há trabalhos relacionados à sua capacidade resistente sob flexo-compressão. De acordo com Lei *et al.* (2020), a atuação do bambu como armadura longitudinal sob carregamento axial, pode oferecer mais liberdade para o concreto de baixa resistência deformar, isto é, com o aumento da taxa de armadura de bambu, a ductilidade dos pilares de concreto armado também aumenta. A ductilidade do pilar de concreto armado com 2,56% de armadura longitudinal de bambu é próxima daquela do pilar de concreto com 0,72% de armadura longitudinal de aço. Este artigo traz os resultados experimentais de pilares de concreto armado com armaduras de bambu em substituição total das armaduras longitudinais convencionais de aço. Quatro pilares ( $P_{REF}$ ,  $P_{B4}$ ,  $P_{B6}$  e  $P_{B8}$ ) foram ensaiados sob carregamento excêntrico monotônico para verificação da influência da variação da taxa de armadura longitudinal de bambu em comportamentos, e seus respectivos deslocamentos, deformações e modos de rupturas são apresentados e discutidos.

## Contexto histórico de utilização do bambu

Os bambus pertencem à família *graminae*, subfamília *bambusoideae*, e algumas vezes tratados separadamente como pertencentes à família *bambusaceae*, com aproximadamente 116 gêneros e mais de 1.400 espécies (THUY *et al.*, 2021) que se distribuem naturalmente desde as regiões tropicais até às regiões temperadas, tendo maior ocorrência nas zonas quentes e com chuvas abundantes, como nas regiões tropicais e subtropicais da Ásia, África e América do Sul (PEREIRA; BERHALDO, 2007). Os bambus nativos crescem naturalmente em todos os continentes, exceto na Europa, sendo 62% das espécies nativas da Ásia, 34% das Américas e 4% da África e da Oceania (PEREIRA; BERHALDO, 2007). Apesar de não ser nativo do Brasil, o *Bambusa vulgaris* é uma espécie que se adaptou muito bem em solo amazônico. Além disso, é um vegetal de rápido crescimento e abundante na região, de fácil manejo e com excelentes propriedades mecânicas (LIESE, 1998).

Também, o Brasil dispõe da Lei nº 12.484/2011, que criou a política nacional de incentivo à cultura do bambu (BRASIL, 2011), e o estado do Acre, na região Norte do Brasil, possui a maior floresta nativa com bambu do mundo (LEAL; LEAL; CRUZ, 2021), com mais de 4,5 milhões de hectares.

Diante do desafio de atenuar os impactos ambientais da construção civil, bem como de responder à pressão para a proteção das florestas tropicais, vítimas de desmatamento, torna-se cada vez mais necessária na indústria de construção civil a busca por novos materiais sustentáveis. O bambu é um recurso natural com cultura de utilização milenar (LOPEZ, 1974) na obtenção de papel, álcool, tecidos, cordas, cabos, construção de pontes e uma infinidade de outras aplicações. Além disso, seu uso pode tanto proporcionar sustentabilidade (CHURKINA *et al.*, 2020; YADAV; MATHUR, 2021; XU *et al.*, 2022), com as renovações das áreas desmatadas em menor intervalo de tempo, quanto desempenhar função estrutural na construção de casas e de paisagismo (Figura 1).

O bambu apresenta excelentes propriedades mecânicas, as quais são influenciadas pelo teor de umidade do colmo (BAHTIAR; DENIH; PUTRA, 2023; JANSSEN, 2000; LOPEZ, 2003). Essas propriedades se correlacionam com a idade, o clima, a densidade do colmo e, principalmente, do teor de fibras, o elemento responsável por sua resistência. Na condição seca a resistência do colmo é superior àquela obtida na condição verde (PEREIRA; BERHALDO, 2007; LI *et al.*, 2007; HISHAM *et al.*, 2006), e são necessários 4 anos para que os colmos de bambu estejam maduros para aplicações estruturais. Numerosos estudos na literatura vêm sendo realizados com a utilização de bambu em estruturas de concreto reforçado (DHIMAN; LALLOTRA; 2022; LEI *et al.*, 2020; SALAU; ADEGBITE; IKPONMWOSA, 2012; GHAVAMI, 2005; COOK; PAMA;

SINGH, 1978; GEYMAYER; COX, 1970), tanto como armadura principal ou secundária, quanto como material compósito (AMIN *et al.*, 2021; JAWAID; RANGAPPA; SIENGCHIN, 2021; DEWI; WIJAYA; REMAYANTI, 2017; HEBEL *et al.*, 2014; TORGAL; JALALI, 2011). De acordo com Javadian, Smith e Hebel (2020), as vigas de concreto armado compostas de bambu apresentam cargas finais comparáveis às de vigas de concreto reforçado com fibra, o que viabiliza o uso do bambu como alternativa sustentável às fibras sintéticas.

Portanto, verifica-se que a utilização do bambu sofre com a baixa aderência desenvolvida na interface de ligação do bambu com o concreto. Segundo Ghavami (1995) e Lopez (2003), o bambu, quando utilizado como armadura para concreto, absorve a água da mistura, aumentando de volume, e volta às dimensões originais após a secagem (TORGAL; JALALI, 2011), ou seja, é um material higroscópico, que se dilata com o aumento de umidade e se contrai com a perda de água. Isso faz com que a aderência entre os dois materiais seja prejudicada (MONDAL; MAITY; PATRA, 2022; JAVADIAN *et al.*, 2016; LOPEZ, 2003). Recomenda-se, então, teor de umidade adequado, em torno de 12% a 15% (GHAVAMI; MARINHO, 2001), secagem e tratamento da melhoria de aderência com uma camada de resina epóxi e areia, por exemplo.

## Concreto armado com bambu

O primeiro estudo experimental de utilização do bambu de pequeno diâmetro como material de reforço para o concreto ocorreu em 1914 (CHOW, 1914). Mais tarde, por volta de 1918, surgiram na China as primeiras aplicações estruturais usando o bambu como substituto do aço no reforço de concreto de pontes ferroviárias e outras construções. A Segunda Guerra Mundial, por causa da escassez do aço, motivou estudos sobre utilização do bambu por parte do Japão e dos Estados Unidos.

Também chamado de aço verde, o bambu possui alta resistência à tração, que varia entre 135 MPa e 170 MPa respectivamente para as espécies como *Dendrocalamus asper* e *Bambusa vulgaris* (KUMAR *et al.*, 2021; OSORIO *et al.*, 2011; LIMA JUNIOR *et al.*, 2008; LIESE, 1985; GHAVAMI, 1995) e na ordem de 250 MPa de acordo com os relatos dos trabalhos de Zhou *et al.* (1981) e Lu *et al.* (1985). A fibra única de algumas espécies pode atingir resistência à tração de até 2.000 MPa (OSORIO *et al.*, 2011; JAVADIAN; SMITH; HEBEL, 2020). O módulo de elasticidade ( $E$ ) de um colmo verde pode atingir 10 GPa, já o dos calmos maduros, com a maturidade de 6 meses a 3 anos, e secados ao ar livre, podem chegar a valores entre 12,50 GPa e 19,50 GPa; com a secagem em estufas, a 22,50 GPa (TARGA; BALLARIN, 1990). Essas características mecânicas tornam seu uso atrativo, especialmente se a relação entre a resistência à tração e o peso específico do material for levada em consideração. Entretanto, a resistência à compressão é muito menor do que a resistência à tração, ficando entre 31 MPa e 72 MPa.

As pesquisas focam mais em vigas que em pilares, apesar de o bambu trabalhar mais a tração. Terai e Minami (2011) e Leelatanon, Srivaros e Matan (2010) realizaram ensaios de carregamento axial em colunas curtas de concreto reforçado com o bambu e não notaram diferença no comportamento da capacidade resistente entre o bambu e o aço, devido à geometria curta dos corpos de prova e do confinamento transversal. Ghavami (2005) recomenda uma taxa ideal do bambu de 3% em pilares de concreto para atender às normas brasileiras de dimensionamento, portanto a mesma não garantiu a acurácia em comparação com o valor da resistência última.

Figura 1 - Corredor exótico de bambu, Universidade Federal do Pará



A proposta apresentada neste trabalho tenta demonstrar que o bambu pode também ser usado para reforço em pilares, como substituição do aço, na expectativa de utilizar o bambu como material alternativo com viés ambiental e sustentável. Para isso, avalia e compara suas resistências últimas quanto à segurança estrutural (acurácia), na tentativa de viabilizar seu uso nas construções de unidades habitacionais simples e de baixo custo na região Norte do Brasil.

## Método de cálculo

O carregamento dos esforços normais produz tensões de tração e compressão na seção transversal do pilar de concreto armado, com os valores máximos nas superfícies do pilar. Geralmente, os pilares de edifícios sofrem flexocompressão normal ou oblíqua devido às conexões entre vigas e pilares, e à posição delas em relação aos eixos principais da seção transversal dos pilares (OLIVEIRA; DAMASCENO; BRANCO, 2018). A Figura 2 mostra o exemplo da metodologia de cálculo de uma seção transversal de compressão uniaxial na qual duas camadas de concreto armado longitudinal são comprimidas, enquanto a camada inferior na seção transversal é tracionada.  $F_{s1}$ ,  $F_{s2}$  e  $F_{s3}$  são forças em cada camada de aço, e  $F_c$  é a resistência à compressão do concreto. As deformações-limite adotadas levam em consideração o esmagamento do concreto a 3,50‰ ( $\epsilon_c$ ), conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), e o escoamento do aço a 2,30‰ ( $\epsilon_{ys}$ ), obtido experimentalmente. As Equações 1 e 2 determinam respectivamente a carga normal máxima aplicada ao pilar e a resistência à flexão levando em consideração a flexocompressão normal. Com os limites de deformações estabelecidos, utilizou-se o diagrama de interação para calcular a resistência à flexocompressão normal, seguindo as recomendações de Wight e MacGregor (2009) e as prescrições e simplificações da norma ACI 318 (AMERICAN..., 2019), em concomitância com os parâmetros da NBR 6118 (ABNT, 2014). A interação do diagrama é ilustrada na Figura 3, e a linha radial indica a excentricidade, quanto mais vertical tende a estar a linha, menor é a excentricidade, conduzindo à ruptura por compressão, e quanto mais horizontal, maior é a excentricidade, conduzindo à faixa de ruptura por tração (OLIVEIRA; DAMASCENO; BRANCO, 2018).

$$P_{RK} = 0,68 \cdot f_c \cdot x \cdot b + \sum_{i=1}^n \epsilon_{si} \cdot E_s \cdot A_{si} = F_c + \sum_{i=1}^n F_{si} \quad \text{Eq. 1}$$

$$M_{RK} = F_c \cdot \left(\frac{h}{2} - 0,4 \cdot x\right) + \sum_{i=1}^n F_{si} \cdot \left(\frac{h}{2} - d_i\right) \quad \text{Eq. 2}$$

Em que:

$f_c$  é a resistência à compressão;

$x$  é a linha neutra;

$b_w$  é a largura da seção do pilar;

$\epsilon_s$ ,  $E_s$  e  $A_s$  são a deformação, o módulo de elasticidade e a área do aço respectivamente;

$h$  é a altura da seção;

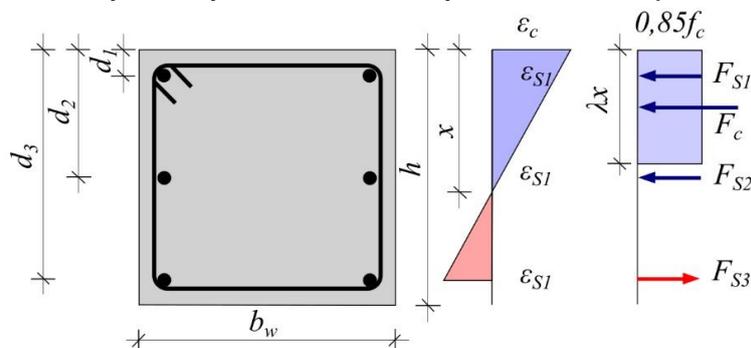
$F$  é a força na camada;

$d$  é a altura útil; e

$M$  é o momento fletor.

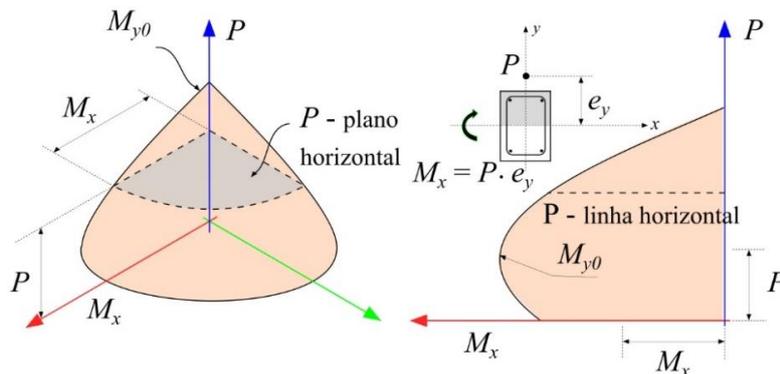
Na Figura 3,  $P$  é a carga axial; e  $M_x$  e  $M_y$  são momentos fletores nas direções dos eixos  $x$  e  $y$ . Neste trabalho foi considerada a simplificação de atuação do momento fletor apenas na direção principal ( $M_x$ ).

Figura 2 - Tensão, deformação e forças resultantes na seção transversal do pilar



Fonte: adaptada de Oliveira, Damasceno e Branco (2018).

Figura 3 - Diagrama de interação para seções submetidas à flexocompressão



Fonte: adaptada de MacGregor e Ibrahim (1996) e de Oliveira, Damasceno e Branco (2018).

## Programa experimental

O programa experimental se constituiu basicamente na caracterização dos materiais, na moldagem dos corpos de prova, na realização dos ensaios de compressão axial nos pilares e nas análises dos resultados. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará.

## Materiais utilizados

### Concreto

A Tabela 1 apresenta a composição da dosagem do concreto. Utilizou-se o cimento Portland CP II-Z, areia fina e brita 0, classificação conforme a NBR 7211 (ABNT, 2022). Os concretos foram confeccionados em betoneira, dosados seguindo os critérios da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) para resistência média de 30 MPa aos 28 dias. Usou-se aditivo superplastificante para reduzir o consumo de água e para manter a mesma trabalhabilidade em todas as misturas. O abatimento do concreto verificado por meio do Slump Test foi de  $70 \pm 10$  mm, e o concreto foi adensado com vibrador. Os pilares foram concretados simultaneamente e curados na temperatura ambiente seguindo a NBR 5738 (ABNT, 2016), com umidade relativa do ar de 85%. Durante a concretagem, foram retiradas 9 amostras de corpos de prova cilíndricos para a realização dos ensaios de compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), de tração por compressão diametral, conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011), e do módulo, conforme a NBR 8522-1 (ABNT, 2021). A Tabela 2 apresenta os resultados dos testes de caracterização aos 28 dias. Os valores médios característicos foram de 30,10 MPa, 3,60 MPa e 29,30 GPa respectivamente para a resistência à compressão ( $f_c$ ), a resistência à tração ( $f_{ct}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_c$ ).

### Armaduras

O aço utilizado foi o do tipo CA50, com diâmetro de 8,0 mm. As caracterizações das propriedades mecânicas foram realizadas de acordo com as recomendações da NBR 6118 (ABNT, 2014) e da NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2018). A Tabela 3 apresenta os resultados dos valores médios para a tensão de escoamento ( $f_{ys}$ ), a resistência última ( $f_u$ ), a deformação no ponto de escoamento ( $\epsilon_{ys}$ ) e o módulo de elasticidade ( $E_s$ ), que foram de 570,00 MPa, 685,00 MPa, 2,30‰ e 248,00 GPa respectivamente. As amostras do bambu utilizadas apresentaram largura de  $20 \pm 3$  mm, com alongamento nas extremidades para permitir a garra na máquina durante o ensaio. O comprimento das taliscas foi de 500 mm, e a espessura foi de  $10 \pm 2$  mm, respeitando a natureza do colmo, cortadas em seção retangular na direção longitudinal. Foram ensaiadas 9 amostras com nó, 3 amostras para cada parte basal, centro e topo. Os ensaios de tração das taliscas do bambu seguiram a adaptação conforme a norma NBR ISO 6892-1 (ABNT, 2018). A Tabela 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização do bambu. Notou-se que as variabilidades maiores foram na deformação e no módulo de elasticidade do topo, 12% e 11% respectivamente.

A Figura 4a mostra o comportamento da curva tensão-deformação das barras de aço, com patamar de escoamento, enquanto na Figura 4b se observa comportamento linear até a ruptura sem patamar de escoamento, em taliscas do bambu. Também, o bambu apresentou módulo de elasticidade relativamente baixo. De acordo com Mondal, Maity e Patra (2020), essas propriedades resultam em grandes deflexões e em grandes aberturas de fissuras em estruturas de concreto com bambu.

Tabela 1 - Materiais constituintes e consumo

| Constituinte    | Tipo                          | Consumo (kg) |
|-----------------|-------------------------------|--------------|
| Cimento         | Portland CP II-Z-32           | 91,60        |
| Agregado miúdo  | Areia fina <sup>a</sup>       | 155,80       |
| Agregado graúdo | Brita 0 ( $d_{max} = 9,5$ mm) | 210,70       |
| Aditivo         | Sika ViscoCrete 3535 CB       | 0,22         |

Nota: <sup>a</sup>Módulo de finura = 2,12 e massa específica = 2,65 g/cm<sup>3</sup>; e  $d_{max}$  = diâmetro máximo do agregado graúdo.

Tabela 2 - Valores médios dos resultados de caracterização do concreto

| Resistência à compressão axial, $f_{ck}$ (MPa) | Resistência à tração por compressão diametral, $f_{ct}$ (MPa) | Módulo de elasticidade, $E_c$ (GPa) |
|--|---|-------------------------------------|
| 30,10  | 3,60  | 29,30                               |

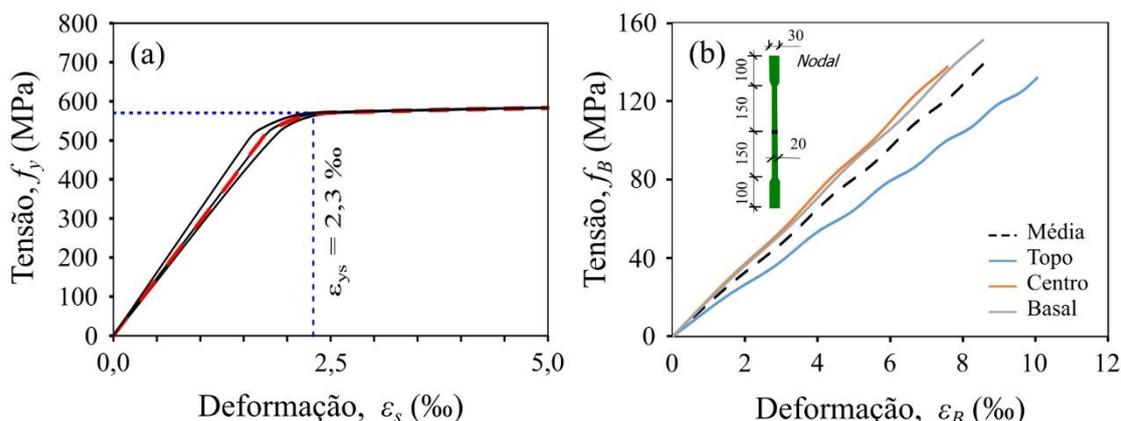
Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço ( $\varnothing = 8$  mm)

| Tensão de escoamento, $f_{ys}$ (MPa) | Resistência à tração última, $f_u$ (MPa) | Deformação de escoamento, $\varepsilon_{ys}$ (‰) | Módulo de elasticidade, $E_s$ (GPa) |
|--------------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| 570,00                               | 685,00                                   | 2,30   | 248,00                              |

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do bambu

| Amostra   | Resistência à tração última, $f_B$ (MPa) |        |        | Deformação, $\varepsilon_B$ (‰) |        |       | Módulo de elasticidade, $E_b$ (GPa) |        |       |
|-----------|--|--------|--------|---------------------------------|--------|-------|-------------------------------------|--------|-------|
|           | Topo                                     | Centro | Basal  | Topo                            | Centro | Basal | Topo                                | Centro | Basal |
| Amostra 1 | 130,70                                   | 139,60 | 142,50 | 11,40                           | 7,20   | 8,80  | 11,50                               | 19,40  | 16,20 |
| Amostra 2 | 135,20                                   | 140,10 | 159,10 | 9,50                            | 7,80   | 8,30  | 14,20                               | 18,00  | 19,20 |
| Amostra 3 | 128,50                                   | 135,80 | 153,40 | 9,20                            | 7,60   | 8,60  | 14,00                               | 17,90  | 17,80 |
| Média     | 131,47                                   | 138,50 | 151,67 | 10,03                           | 7,53   | 8,57  | 13,23                               | 18,43  | 17,73 |
| D.P.      | 3,42                                     | 2,35   | 8,43   | 1,19                            | 0,31   | 0,25  | 1,50                                | 0,84   | 1,50  |
| C.V.      | 3%                                       | 2%     | 6%     | 12%                             | 4%     | 3%    | 11%                                 | 5%     | 8%    |

Figura 4 - Curvas de tensão-deformação das amostras: (a) aço e (b) bambu



## Características dos pilares

Geralmente, os pilares de um edifício sofrem flexocompressão normal ou oblíqua devido às conexões entre pilares e vigas, e à posição delas em relação aos eixos principais da seção transversal dos pilares. Também, podem ser afetados por atividades excêntricas das forças verticais causadas pelas imperfeições das construções, portanto a excentricidade inicial ( $e$ ), ou o acréscimo de momento da 2ª ordem (índice de esbeltez,  $\lambda > 35$ ), deve ser levada em conta no projeto estrutural. Assim, buscando investigar o comportamento de flexocompressão na rigidez da conexão pilar-viga com o uso de armadura de bambu como alternativa de substituição à armadura convencional de aço, foram confeccionados 4 pilares de concreto armado com

comprimento de 1.600 mm e com seções transversais de 140x140 mm<sup>2</sup> e de 140x310 mm<sup>2</sup> nos trechos internos e nas extremidades do pilar respectivamente. Os três pilares tinham como única variável a área ocupada pela armadura longitudinal do bambu, calculada pela relação da Equação 3. Utilizou-se o bambu da espécie *Bambusa vulgaris*, cortado em barras transversais. Para evitar perdas de aderência, as taliscas de bambu foram tratadas com uma camada composta de resina epóxi e areia, de acordo com as recomendações da literatura (GHAVAMI, 2005; JAVADIAN *et al.*, 2016), para evitar perda de aderência. A Figura 5 mostra os detalhes dos pilares, e a Tabela 5 apresenta suas características.

$$A_s \cdot f_{ys} = A_B \cdot f_B \tag{Eq. 3}$$

Em que:

$A_s$  é a área de aço;

$A_B$  é a área de bambu;

$f_{ys}$  é a tensão de escoamento do aço; e

$f_B$  é a tensão de ruptura do bambu.

Figura 5 - Detalhe dos pilares

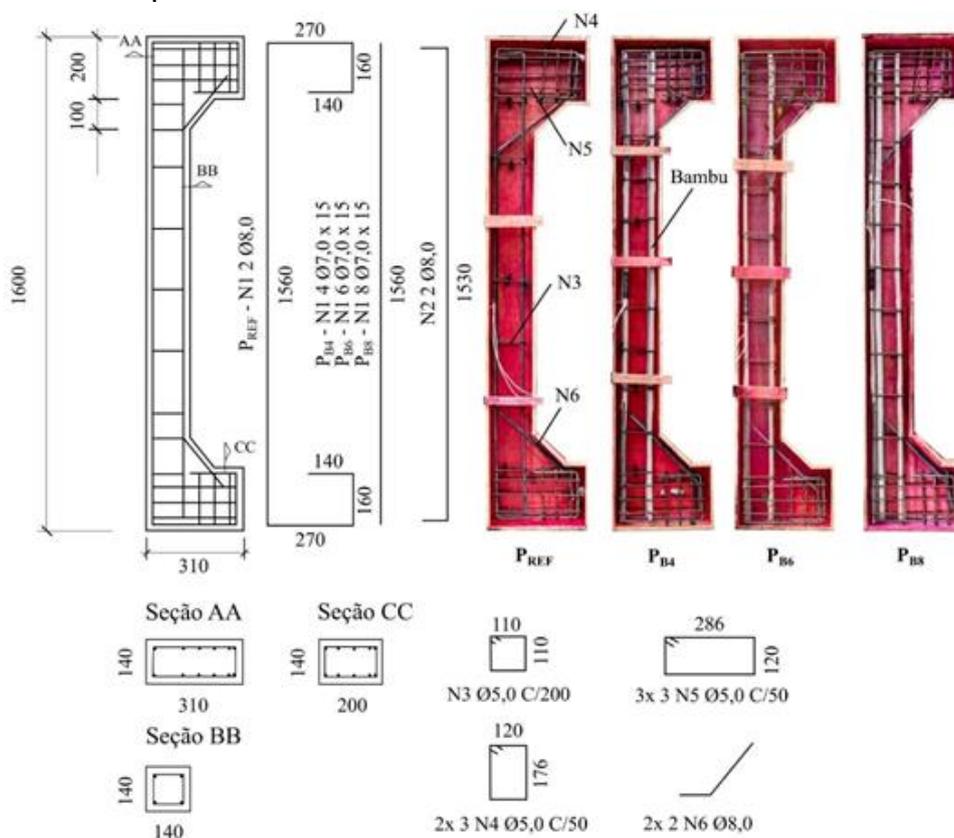


Tabela 5 - Características dos pilares ensaiados

| Pilar            | $A_s$ (mm <sup>2</sup> ) | $A_B$ (mm <sup>2</sup> ) | $e$ (mm) | $A_i$ (mm <sup>2</sup> ) | $\rho$ (%) | Índice de esbeltez |
|------------------|--------------------------|--------------------------|----------|--------------------------|------------|--------------------|
| P <sub>REF</sub> | 201                      | -                        | 150      | 19.600                   | 1,03       | 39,60              |
| P <sub>B4</sub>  | -                        | 420 (~2· $A_s$ )         |          |                          | 2,14       |                    |
| P <sub>B6</sub>  | -                        | 630 (~3· $A_s$ )         |          |                          | 3,21       |                    |
| P <sub>B8</sub>  | -                        | 840 (~4· $A_s$ )         |          |                          | 4,29       |                    |

Nota:  $A_i$  = área da seção do pilar (140x140) mm<sup>2</sup>;  $e$  = excentricidade;  $\rho$  = taxa geométrica de armadura; e  $\rho = A_{s,B}/A_i$ .

## Instrumentação

As deformações no concreto e nas armaduras longitudinais foram medidas com extensômetros elétricos (EER). Sensores da marca Excel, modelo PA-06-201BA-120L (dimensões da grelha: 51,10x2,03 mm) e modelo PA-06-125AA-120L (dimensões da grelha 3,18x3,18 mm), foram fixados respectivamente na face comprimida do concreto do meio do vão dos pilares e no meio do comprimento das armaduras longitudinais. Também foram medidos os deslocamentos verticais no meio do vão por meio de um defletômetro digital com precisão de 0,01 mm. A leitura e o registro dos dados foram realizados por meio do equipamento de aquisição de dados Ahlborn Almemo 5690-2M, com o software AMR WinControl.

## Sistema de ensaio

Os pilares foram ensaiados até a ruptura. O carregamento foi aplicado com a excentricidade ( $e$ ) de 150 mm. O sistema foi composto de dois blocos de concreto fixados à laje de reação do laboratório, um macaco hidráulico de 1.000 kN acionado por uma bomba hidráulica para carregamento e uma célula de carga de 1.000 kN com precisão de 0,5 kN, conectada ao sistema de aquisição de dados. A Figura 6 mostra a configuração do sistema de ensaio. Posteriormente se averiguou o funcionamento de todos os extensômetros pelo sistema de aquisição de dados e, em seguida, efetuou-se a aplicação do carregamento em 20 passos de carga de 2,0 kN com intervalos de 2 min para o mapeamento das fissuras.

## Resultados

A Tabela 6 apresenta os resultados experimentais da resistência à compressão do concreto ( $f_c$ ), das cargas de fissuração ( $P_{Ist}$ ) e de ruptura ( $P_u$ ), do momento último ( $M_u$ ), da comparação entre as cargas últimas dos pilares com bambu e a carga última do pilar de referência ( $P_{u,B} / P_{u,REF}$ ), e do modo de ruptura observada.

## Análise dos resultados

### Cargas e modos de ruptura

Os pilares com armadura de bambu,  $P_{B4}$ ,  $P_{B6}$  e  $P_{B8}$ , se romperam com cargas normais inferiores à carga do pilar de referência,  $P_{REF}$ . O  $P_{B8}$  rompeu com carga normal de 60,00 kN, correspondendo aproximadamente a 90% da carga última do  $P_{REF}$ . Apesar de as taxas de armadura longitudinal do bambu serem superiores à do aço, nenhum pilar apresentou ganho de resistência superior ao  $P_{REF}$ , enquanto as perdas foram de aproximadamente 35% e 15% respectivamente para os pilares  $P_{B4}$  e  $P_{B6}$ . O ganho da resistência nos pilares com a armadura longitudinal de bambu se deu pelo aumento da área ocupada, portanto proporcional à tensão de aderência. A Figura 7 mostra a comparação da carga de fissuração com a de ruptura. Pode-se observar que o pilar  $P_{B4}$  apresentou fissuração precoce, com apenas 8% de sua carga de ruptura, enquanto os demais pilares com armadura de bambu apresentaram comportamentos compatíveis com o  $P_{REF}$ , 25% a 30% da carga de ruptura, revelando ocorrência de grandes deformações nas armaduras longitudinais. Portanto, o  $P_{REF}$  teve como modo de ruptura escoamento e esmagamento do concreto, enquanto o  $P_{B4}$  e o  $P_{B6}$  esmagaram, e o  $P_{B8}$  não apresentou nenhum sinal de ruptura por esmagamento.

Figura 6 - Detalhe do sistema de ensaio

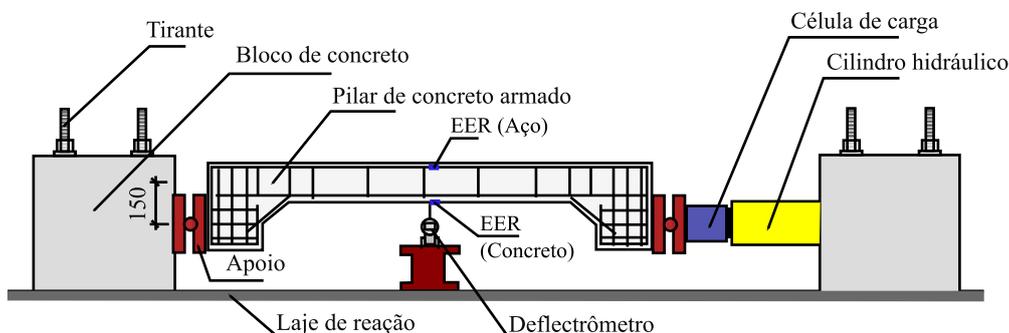


Tabela 6 - Cargas e modos de ruptura

| Pilar            | $f_c$ (MPa) | $P_{Ist}$ (kN) | $P_u$ (kN) | $M_u$ (kN·m) | $P_{u,B}/P_{u,REF}$ | Modo de ruptura |
|------------------|-------------|----------------|------------|--------------|---------------------|-----------------|
| P <sub>REF</sub> |             | 20,30          | 66,80      | 10,00        | -                   | E.E.            |
| P <sub>B4</sub>  | 30,10*      | 3,50           | 43,10      | 6,50         | 0,65                | E.C.            |
| P <sub>B6</sub>  |             | 18,30          | 56,80      | 8,50         | 0,85                | E.C.            |
| P <sub>B8</sub>  |             | 14,20          | 60,00      | 9,00         | 0,90                | S.E.C.          |

Nota: Legenda:

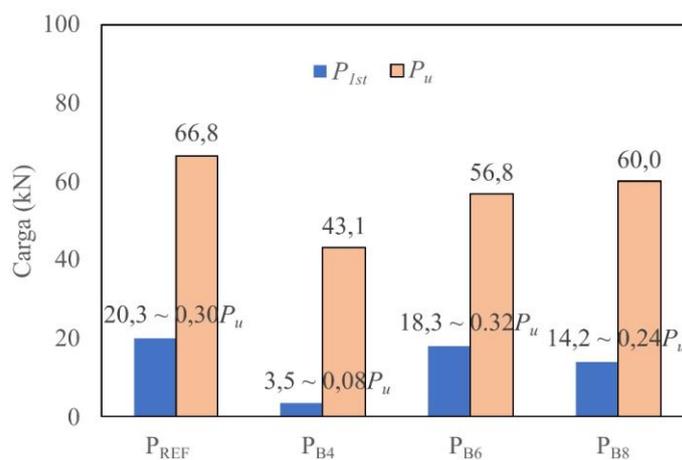
\* = valor médio;

E.E. = escoamento do aço e esmagamento do concreto;

E.C. = esmagamento do concreto; e

S.E.C. = sem esmagamento do concreto.

Figura 7 - Comparação das cargas



### Mapa de fissuração

A Figura 8 mostra os padrões de fissuração dos pilares, mais pronunciadas na zona de tração. O P<sub>REF</sub> teve vasta malha de fissuras, evidentemente por possuir maior módulo de elasticidade do que o bambu. Apesar de os pilares P<sub>B4</sub> e P<sub>B6</sub> apresentarem menos fissurações, notou-se a presença de esmagamento do concreto na zona comprimida, e o P<sub>B8</sub> teve o melhor desempenho em comparação com o P<sub>REF</sub>. A Figura 9 mostra as aparências das armaduras do bambu após rupturas. Notou-se que as rupturas em armaduras ocorreram nas regiões internodais para os pilares P<sub>B4</sub> e P<sub>B6</sub>, contrariamente ao pilar P<sub>B8</sub>, onde não foi notada fissuração aparente na barra de bambu, demonstrando satisfatoriamente o desempenho da camada resina epóxi-área na melhoria do mecanismo de aderência entre o bambu e a matriz do concreto. Todavia, a técnica pode acarretar custos adicionais elevados.

### Deslocamentos verticais

As deflexões máximas no plano longitudinal foram medidas durante o carregamento, por meio do relógio comparador digital posicionado no meio do vão dos pilares. Os pilares apresentaram deslocamentos maiores do que o deslocamento-limite de serviço recomendado pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014),  $L/250$ , ou seja, os pilares apresentaram comportamento de rigidez suficiente para ser utilizados até no estado limite de serviço, sendo  $L$  o comprimento do pilar, como mostra a Figura 10. Também se notou que o tipo de material influenciou bastante no comportamento de deslocamento. O pilar de referência, P<sub>REF</sub>, apresentou menores deslocamentos, apesar de ocupar menor área de armadura no concreto do que os pilares P<sub>B4</sub>, P<sub>B6</sub> e P<sub>B8</sub>, enquanto a tendência da redução da área ocupada pelo bambu tende a proporcionar maiores deslocamentos, como mostra o pilar P<sub>B4</sub>. Portanto, os pilares P<sub>B8</sub> e P<sub>REF</sub> apresentaram pouca diferença.

Figura 8 - Mapa de fissuração dos pilares



Figura 9 - Colapso das armaduras de bambu

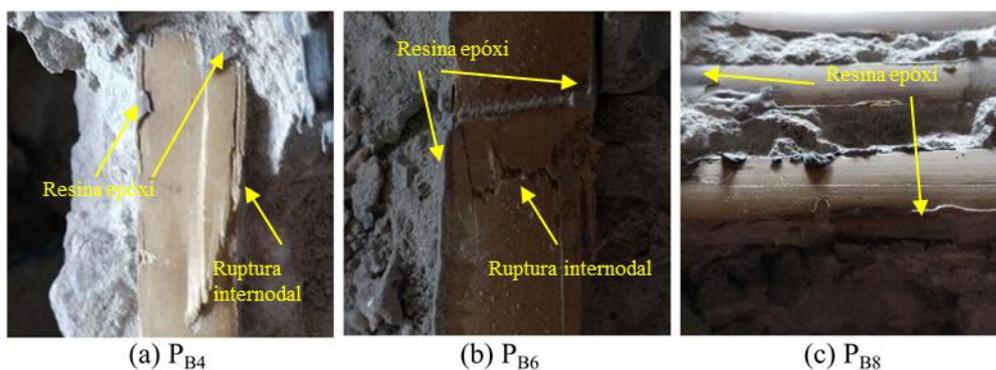
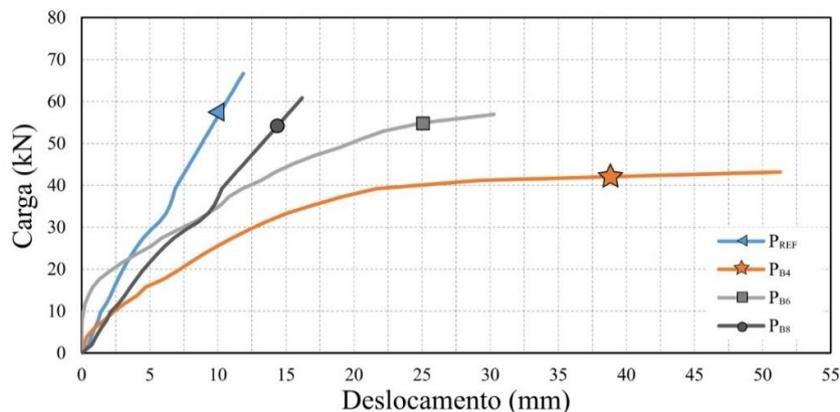


Figura 10 - Diagrama carga - deslocamento



### Índices de ductilidade

A ductilidade é uma medida de habilidade de deformações inelásticas que um material ou um elemento estrutural pode sofrer sem que ocorra perda substancial de sua capacidade de resistência, ou seja, no que diz respeito à capacidade de redistribuição de esforços pós-fissuração, por exemplo. Assim, o índice de ductilidade,  $ID$ , representa o estado global da deformabilidade, de acordo com a Equação 4. A Tabela 7 apresenta as cargas com seus deslocamentos nos pontos do início da fissuração, do estágio de escoamento e do momento da ruptura. Observou-se que o  $ID$  diminua com o aumento da área de armadura do bambu nos pilares  $P_{B4}$ ,  $P_{B6}$  e  $P_{B8}$ , ou seja, o índice de ductilidade tende a decrescer com o aumento da rigidez da estrutura. O  $P_{REF}$  e o  $P_{B8}$  tiveram praticamente a mesma ductilidade, o que se justifica também pela aproximação dos valores de capacidade de resistência de ambos os pilares, enquanto o pilar  $P_{B4}$  apresentou maior valor do  $ID$ , revelando que tanto o início da abertura de fissura quanto o deslocamento último são funções da rigidez da estrutura. O contrário ocorre com as estruturas de concreto reforçado com fibras de aço (NZAMBI *et al.*, 2022; NZAMBI; OLIVEIRA, 2023), por exemplo, que aumentam sua capacidade de resistência proporcionalmente ao aumento da ductilidade, devido ao efeito de ponte, que ativa as fibras no estágio pós-fissuração. Já o bambu com área  $2 \cdot A_s$  se mostrou frágil para absorver suficientemente a dissipação de energia no estágio pós-fissuração, provocando grandes deslocamentos e acelerando a ruptura.

$$ID = \delta_u / \delta_y \quad \text{Eq. 4}$$

Em que  $\delta_y$  e  $\delta_u$  são os deslocamentos obtidos nos momentos de escoamento e de ruptura da estrutura respectivamente.

### Deformações

A Figura 11 mostra as curvas de cargas-deformações no concreto. Notou-se que os pilares  $P_{REF}$ ,  $P_{B4}$  e  $P_{B6}$  apresentaram deformações superiores à deformação-limite do esmagamento do concreto, 3,50%, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), o que era de se esperar com as revelações dos comportamentos de deslocamento e de mapa de fissuração. Portanto, as deformações no  $P_{REF}$  foram menores em comparação com  $P_{B4}$  e  $P_{B6}$ . O desempenho do  $P_{B8}$  se confirmou novamente com os resultados de deformações no concreto, tendo apresentado deformação de ruptura inferior a 3,50% e comportamento da curva muito similar ao do  $P_{REF}$ . A Figura 12 mostra os comportamentos das curvas de cargas-deformações nas armaduras longitudinais. Todos os pilares revelaram deformações maiores que a de escoamento do aço,  $\epsilon_s > \epsilon_{ys} = 2,30\%$ . Evidentemente o  $P_{REF}$  deformou mais, e o  $P_{B6}$  teve menores deformações. Também se notou a mesma tendência de comportamento das curvas do  $P_{REF}$ , do  $P_{B6}$  e do  $P_{B8}$ , resultado de boa aderência para as áreas de bambu de  $3 \cdot A_s$  e  $4 \cdot A_s$ , considerando o diâmetro do aço de 8,00 mm. Além disso, o comportamento das curvas de deformações das armaduras revela que as fibras de bambu, quando bem aderidas ao concreto, tracionam simultaneamente com a camada protetora e podem prorrogar a linearidade elástica maior que a do aço.

### Diagramas de interação

As Figuras 13, 14 e 15 mostram os diagramas de interação (MACGREGOR; IBRAHIM, 1996; OLIVEIRA; DAMASCENO; BRANCO, 2018) da seção transversal com a mesma excentricidade em todos os pilares e seus valores de cargas e momentos fletores para pilar de referência e do reforço com o bambu. As linhas radiais indicaram o mesmo comportamento, devido à excentricidade constante, e tiveram tendências mais horizontais,

ou seja, romperam por tração, com balanceamento proporcional entre o aço e o concreto, como mostram os traçados das trajetórias lineares da carga. Os pontos  $A_s$  e  $A_B$  correspondem aos pilares com armadura totalmente comprimida junto com o concreto, tanto para o aço quanto para o bambu, com as deformações iguais,  $\varepsilon_c = \varepsilon_s = \varepsilon_B = 2,0\text{‰}$ . Os pontos  $B_s$  e  $B_B$  correspondem ao início da flexocompressão, com uma das faces do pilar solicitada, ocasionando deformação de  $3,5\text{‰}$  no concreto comprimido; e os pontos  $C_s$  e  $C_B$  são definidos por apresentar maiores momentos resistentes dos pilares, com o escoamento do aço ocorrendo em uma das faces do  $P_{REF}$ . Nos pilares do reforço com o bambu, o momento máximo resistente não corresponde ao escoamento, pois o bambu apresentou comportamento linear até sua ruptura, assim como apresentou baixo módulo de elasticidade, por isso se definiram os valores para as deformações de tração no bambu ( $\varepsilon_B$ ) de  $1,8\text{‰}$ ,  $1,9\text{‰}$  e  $2,1\text{‰}$  para o ponto  $C_B$  dos pilares  $P_{B4}$ ,  $P_{B6}$  e  $P_{B8}$  respectivamente. E o ponto  $DB$  é uma extrapolação para a definição completa da curva de interação com a deformação média de tração de  $8,8\text{‰}$ .

Tabela 7 - Cargas-deslocamentos e ductilidade

| Pilar     | 1ª Fissura     |                 | Escoamento |                 | Ruptura    |                 | Índice de ductilidade (ID) |
|-----------|----------------|-----------------|------------|-----------------|------------|-----------------|----------------------------|
|           | $P_{1st}$ (kN) | $\delta_l$ (mm) | $P_y$ (kN) | $\delta_y$ (mm) | $P_u$ (kN) | $\delta_u$ (mm) |                            |
| $P_{REF}$ | 20,30          | 2,75            | 32,50      | 5,63            | 66,80      | 10,40           | 1,84                       |
| $P_{B4}$  | 3,50           | 0,67            | 17,10      | 4,00            | 43,10      | 51,30           | 12,83                      |
| $P_{B6}$  | 18,30          | 1,70            | 31,00      | 8,00            | 56,80      | 31,00           | 3,88                       |
| $P_{B8}$  | 14,20          | 3,02            | 34,00      | 9,20            | 60,00      | 16,21           | 1,76                       |

Nota: Legenda:

$P_{1st}$  = carga da primeira fissuração;

$P_y$  = carga de escoamento;

$\delta_l$  = flecha de fissuração; e

$\delta_y$  = flecha de escoamento.

Figura 11 - Curvas de carga - deformação (concreto)

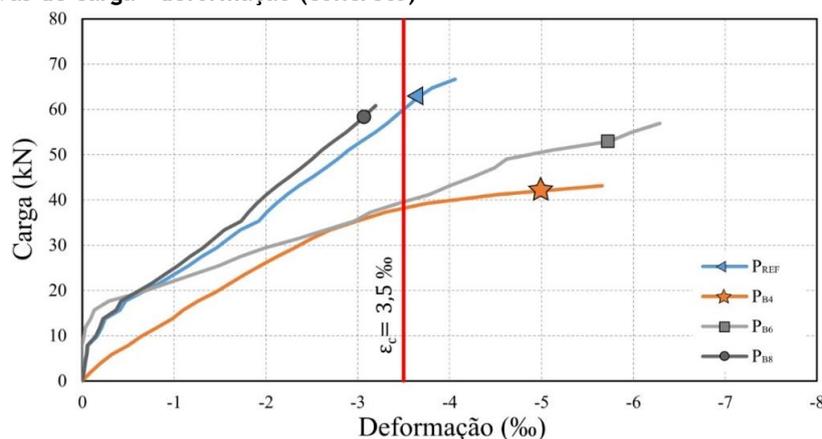


Figura 12 - Curvas de carga - deformação (armadura longitudinal)

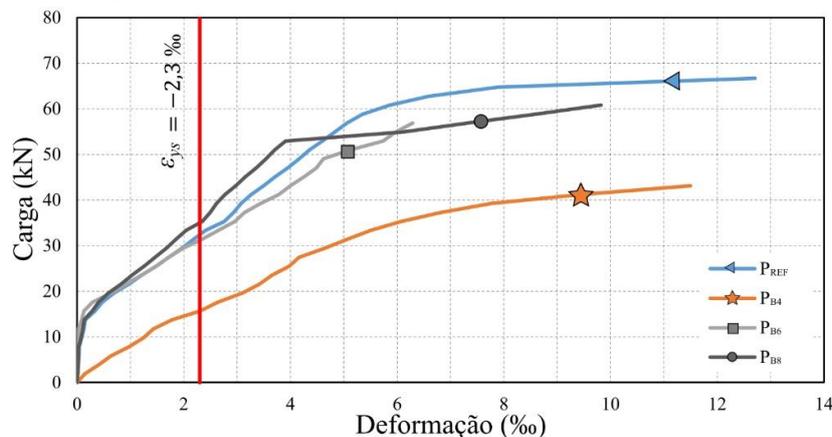


Figura 13 - Envoltória dos pilares P<sub>REF</sub> e P<sub>B4</sub>

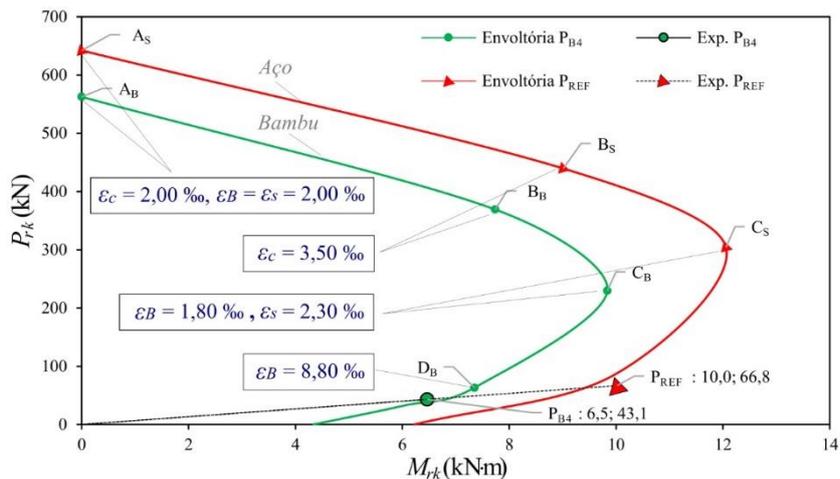


Figura 14 - Envoltória dos pilares P<sub>REF</sub> e P<sub>B6</sub>

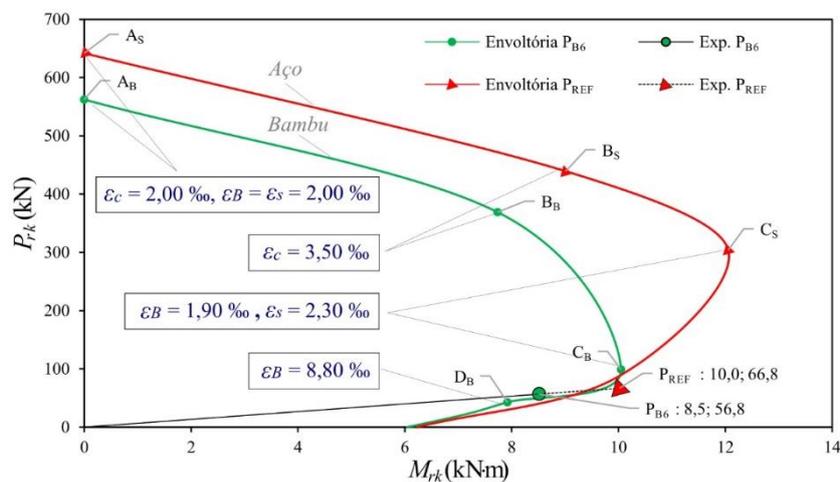


Figura 15 - Envoltória dos pilares P<sub>REF</sub> e P<sub>B8</sub>

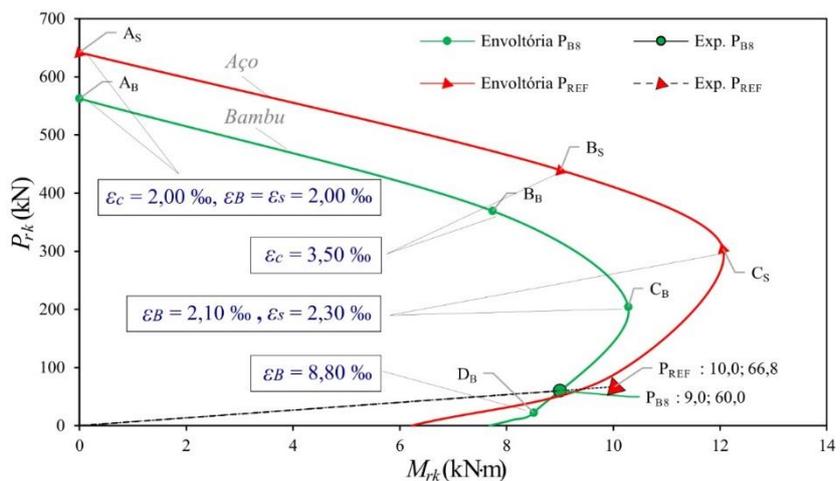


Tabela 8 - Comparação e análise estatística entre estimativas teóricas e experimentais

| Pilar            | $P_{RK}$ (kN) | $P_u$ (kN) | $P_u / P_{RK}$ | Media | Desvio Padrão | C.V. (%) |
|------------------|---------------|------------|----------------|-------|---------------|----------|
| P <sub>REF</sub> | 66,70         | 66,80      | 1,00           | 1,00  | 0,09          | 9        |
| P <sub>B4</sub>  | 49,90         | 43,10      | 0,86           |       |               |          |
| P <sub>B6</sub>  | 53,90         | 56,80      | 1,05           |       |               |          |
| P <sub>B8</sub>  | 58,00         | 60,00      | 1,03           |       |               |          |

Nota: C.V. = coeficiente de variação.

## Comparação dos resultados experimentais e teóricos

A Tabela 8 apresentou a comparação dos valores de carga experimental ( $P_u$ ) e teórica ( $P_{RK}$ ). Em geral, os resultados de estimativa teórica foram satisfatórios, como demonstrou a relação  $P_u / P_{RK}$ , com valor médio de 1,00 e coeficiente de variação de apenas 9%. Destaca-se que o pilar P<sub>B4</sub> foi o único a apresentar maior valor da resistência teórica em comparação com o valor experimental, ou seja, para a área do bambu duas vezes inferior ou igual à área do aço,  $A_B \leq 2 \cdot A_s$ , o pilar tende a ser mais dúctil, portanto com menor capacidade resistente, devido ao início precoce da abertura de fissuração, enquanto as áreas do bambu  $3 \cdot A_s$  e  $4 \cdot A_s$  demonstraram maior aproveitamento da superfície de aderência, retardando o início de propagação das fissurações e, consequentemente, aumentando a capacidade de resistência. Apesar de o pilar P<sub>B4</sub> ter como valor 0,86 da relação  $P_u / P_{RK}$ , mesmo assim está dentro do intervalo de segurança apropriada (para  $P_u / P_{RK} \in [0,85 - 1,15]$ ), de acordo com os critérios de classificação de Collins (2001).

## Conclusões

Os ensaios realizados forneceram os resultados experimentais de três pilares de concreto armado com bambu em diferentes taxas, e um pilar de referência com a armadura convencional de aço, submetidos a flexocompressão normal. Os resultados foram analisados levando-se em consideração as diferentes forças de compressão dos pilares, os deslocamentos máximos na zona central dos pilares, o índice de ductilidade e as deformações sofridas no concreto e nas armaduras. O P<sub>B8</sub>, com a área do bambu quatro vezes a área do aço ( $4 \cdot A_s$ ), apresentou comportamento similar ao do pilar de referência, P<sub>REF</sub>, com apenas 10% de perda da capacidade resistente, contra 15% e 35% para P<sub>B6</sub> e P<sub>B4</sub> respectivamente. Apesar dessa perda, o P<sub>B8</sub> teve melhor performance do que o P<sub>REF</sub>, com menos fissuração, menores deformações no concreto, menor índice de ductilidade e maior linearidade da fase elástica. As taxas do bambu inferiores a  $4 \cdot A_s$  se revelaram menos rígidas, resultando na aceleração de aberturas de fissuração, grandes deslocamentos, maiores índices de ductilidade e esmagamento do concreto nas zonas comprimidas dos pilares. Portanto, houve similaridade do comportamento dos diagramas de interação em termos de modo de ruptura, e as estimativas teóricas apresentaram acurácia em valor médio de 1,00 e coeficiente de variação de apenas 9%. Os resultados desta pesquisa podem contribuir no entendimento inicial do projeto de dimensionamento de pilar de concreto armado com bambu. Na prática, o modo de ruptura por flexocompressão pode ocorrer devido à existência de excentricidades, consequentemente gerando solicitações de tração-compressão na zona central do pilar (flambagem). Assim, o bambu, com taxa e aderência adequadas, trabalharia muito bem a tração e a compressão, e é uma alternativa viável e sustentável ao aço, no entanto necessita de pesquisas maiores e mais aprofundadas. O presente artigo, mesmo sendo baseado numa pesquisa pequena e com poucas amostras, contribui para demonstrar mais um exemplo da importância do bambu como material construtivo e da necessidade de materiais inovadores para a construção civil.

## Referências

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, 2019.

AMIN, K. F. *et al.* Bamboo/bamboo fiber reinforced concrete composites and their applications in modern infrastructure. In: JAWAID, M.; RANGAPPA, S. M.; SIENGCHIN, S. (org.). **Bamboo fiber composites**. Singapore: Springer, 2021. Composites Science and Technology.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos: método de ensaio. Rio de Janeiro, 2018.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: agregados para concreto: requisitos. Rio de Janeiro, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222**: concreto e argamassa: determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522-1**: concreto endurecido: determinação dos módulos de elasticidade e de deformação: parte 1: módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6892-1**: materiais metálicos: ensaio de tração: parte 1: método de ensaio à temperatura ambiente. Rio de Janeiro, 2018.
- BAHTIAR, E. T.; DENIH, A.; PUTRA, G. R. Multi-culm bamboo composites as sustainable materials for green constructions: section properties and column behavior. **Results in Engineering**, v. 17, 100911, 2023.
- BRASIL. **Lei Nº 12.484**. Dispõe sobre a Política Nacional de Incentivo ao Manejo Sustentado e ao Cultivo do Bambu e dá outras providências. 2011. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2011/lei/l12484.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/l12484.htm). Acesso em: 02 de abril de 2023.
- CHOW, H. K. **Bamboo as material for reinforced concrete**. Ph.D Thesis – Massachusetts Institute of Technology, 1914.
- CHURKINA, G. *et al.* Buildings as a global carbon sink. **Nature Sustainability**, v. 3, pp. 269-276, 2020.
- COLLINS, M. P. Evaluation of shear design procedures for concrete structures. **ACI Structural Journal**, v. 98, n. 4, p. 537-547, Jul. 2001.
- COOK, D. J.; PAMA, R. P.; SINGH, R. V. Bamboo-reinforced concrete columns subjected to eccentric loads. **Magazine of Concrete Research**, v. 30, n. 104, 1978.
- DEWI, S. M.; WIJAYA, M. N.; REMAYANTI, N. C. The use of bamboo fiber in reinforced concrete beam to reduce crack. **AIP Conference Proceedings**, v. 1887, 020003, 2017.
- DHIMAN, S.; LALLOTRA, B. Replacing of steel with bamboo as reinforcement with addition of sisal fiber. **Materials Today: Proceedings**, v. 48, n. 5, p. 1708-1712, 2022.
- GEYMAYER, H. G.; COX, F. B. Bamboo reinforced concrete. **Journal of American Concrete Institute**, v. 67, n. 51, p. 841-846, 1970.
- GHAVAMI, K. A volta do velho e forte bambu. **Revista Globo Ciência**, n. 53, dez. 1995.
- GHAVAMI, K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 6, p. 637-649, 2005.
- GHAVAMI, K.; MARINHO, A. B. **Determinação das propriedades dos bambus das espécies: *Mosó, Matake, Guadua angustifolia, Guadua tagoara e Dendrocalamus giganteus*** para utilização na engenharia. Rio de Janeiro: RMNC do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, 2001.
- HEBEL, D. E. *et al.* Process-controlled optimization of the tensile strength of bamboo fiber composites for structural applications. **Composites Part B: Engineering**, v. 67, p. 125-131, 2014.
- HISHAM, H. N. *et al.* Characterization of bamboo *Gigantochloa scortechinii* at different ages. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 18, n. 4, p. 236-242, 2006.
- HONG, C. *et al.* Experimental and numerical study on eccentric compression properties of laminated bamboo columns with a chamfered section. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 102901, 2021.
- JANSSEN, J. J. A. **Designing and building with bamboo**: International Network for Bamboo and Rattan (INBAR): Beijing, 2000. (Technical report n. 20).
- JAVADIAN, A. *et al.* Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 122, p. 110-117, 2016.
- JAVADIAN, A.; SMITH, I. F. C.; HEBEL, D. E. Application of sustainable bamboo-based composite reinforcement in structural-concrete beams: design and evaluation. **Materials**, v. 13, p. 696, 2020.
- JAWAID, M.; RANGAPPA, S. M.; SIENGCHIN, S. **Bamboo fiber composites**: processing, properties and applications: Springer Singapore, 2021.

- KUMAR, P. *et al.* Bamboo as reinforcement in structural concrete. **Materials Today**, v. 46, n. 15, p. 6793-6799, 2021.
- LEAL, G. S. A.; LEAL, F. A.; CRUZ, A. S. A. Perfil de diversidade florística e padrão espacial de espécies arbóreas em florestas com ocorrência de bambu na Amazônia. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 3, p. 1545-1555, 2021.
- LEELATANON S.; SRIVARO S.; MATAN N. Compressive strength and ductility of short concrete columns reinforced by bamboo. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 419-424, 2010.
- LEI, M. *et al.* Experimental investigation on short concrete columns reinforced by bamboo scrimber under axial compression loads. **Advances in Civil Engineering**, v. 2020, Article ID 8886384, 2020.
- LI, X. B. *et al.* Chemical changes with maturation of the bamboo species *Phyllostachys pubescens*. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 19, n. 1, p. 6-12, 2007.
- LIESE, W. Anatomy and properties of bamboo. **GTZ Publication**, p. 196-208, 1985.
- LIESE, W. **The anatomy of bamboo culms**. International Network for Bamboo and Rattan (INBAR): Beijing, 1998. (Technical report, 18).
- LIMA JUNIOR, H. C. *et al.* Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement. **Materials and Structures**, n. 41, pp. 981-989, 2008.
- LOPEZ, O. H. **Bamboo: the gift of the gods**. Bogotá: D'Vinni, 2003.
- LOPEZ, O. H. **Bambu: su cultivo y aplicaciones em fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía**. Cali: SNT, 1974. Boletim técnico.
- LU, X. *et al.* A study on the physic-mechanical properties of culmwood of *Phyllostachys Glauca* of Shandong. **Journal of Bamboo Research**, v. 4, n. 2, pp. 98-106, 1985.
- MACGREGOR, J. G.; IBRAHIM, H. H. H. Tests of eccentrically loaded high-strength concrete columns. **ACI Structural Journal**, p. 585-594, 1996.
- MONDAL, B.; MAITY, D.; PATRA, P. K. Bond behavior between bamboo and normal-strength concrete: experimental and numerical investigation. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 27, n. 3, p. 04022037, 2022.
- MONDAL, B.; MAITY, D.; PATRA, P. K. Tensile characterisation of bamboo strips for potential use in reinforced concrete members: experimental and numerical study. **Materials and Structures**, v. 53, n. 128, 2020.
- NZAMBI, A. K. L. L. *et al.* Experimental analysis of steel fiber reinforced concrete beams in shear. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 3, e15301, 2022.
- NZAMBI, A.; OLIVEIRA, D. Steel fiber reinforced concrete beams with predetermined failure surface and no stirrups. **Engineering Structures**, v. 290, 116339, 2023.
- OLIVEIRA, D. R. C.; DAMASCENO, I. I. R.; BRANCO, V. H. L. Pilares de concreto armado reforçados à flexo-compressão com encamisamento parcial. **Revista ALCONPAT**, v. 8, n. 2, p. 150-162, 2018.
- OSORIO, L. *et al.* Morphological aspects and mechanical properties of single bamboo fibres and flexural characterization of bamboo/epoxy composites. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 30, n. 5, p. 396-408, 2011.
- PEREIRA, M. A. R.; BERALDO A. L. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal 6, 2007.
- SALAU, M. A.; ADEGBITE, I.; IKPONMWOSA, E. E. Characteristic strength of concrete column reinforced with bamboo strips. **Journal of Sustainable Development**, v. 5, n. 1, 2012.
- SHARMA, B. *et al.* Engineered bamboo for structural applications. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 66-73, 2015.
- TARGA, L. A.; BALLARIN, A. W. Características e potencialidades de uso do bambu como material de construção no meio rural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, Piracicaba, 1990. **Anais [...]** Jaboticabal: SBEA, 1990.
- TERAI, M.; MINAMI, K. Fracture behavior and mechanical properties of bamboo reinforced concrete members. **Procedia Engineering**, v. 10, p. 2967-2972, 2011.

THUY, V. T. *et al.* Status of bamboos in Binh Duong province, Vietnam: distribution, species diversity, conservation and utilization. **Trees, Forests and People**, v. 6, p. 100137, 2021.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. **Cement Composites Reinforced with Vegetable Fibres**. London: Springer, 2011. Eco-Efficient Construction and Building Materials.

WIGHT, J. K.; MACGREGOR, J. G. **Reinforced concrete: mechanics and design**. New Jersey: Pearson Education, 2009.

WU, F. *et al.* Confinement effectiveness of bamboo scrimber-filled steel tube columns under axial compression. **Journal of Building Engineering**, v. 68, 106157, 2023.

XU, P. *et al.* Are bamboo construction materials environmentally friendly? A life cycle environmental impact analysis. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 96, p. 106853, 2022.

YADAV, M.; MATHUR, A. Bamboo as a sustainable material in the construction industry: an overview. **Materials Today: Proceedings**, v. 43, n. 5, p. 2872-2876, 2021.

ZHOU, F. Studies on physical and mechanical properties of bamboo wood. **Journal of Nanjing Technological College of Forest Products**, v. 24, n. 2, p. 1-32, 1981.

#### **Aaron Kadima Lukanu Lwa Nzambi**

Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Pará | Rua Augusto Correa, 01, Campus Universitário do Guamá | Belém - PA - Brasil | CEP 66075-110 | Tel.: (91) 3201-8859 e (91) 98506-9513 | E-mail: aaronkadima@gmail.com

#### **Dênio Ramam Carvalho de Oliveira**

Conceitualização, Metodologia, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil | Universidade Federal do Pará | Tel.: (91) 98879-6547 | E-mail: denio@ufpa.br

#### **Euclides Luiz Pires Coêlho**

Conceitualização, Pesquisa, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Redação do manuscrito original.

Programa de Mestrado Profissional e Processos Construtivos e Saneamento Urbano | Universidade Federal do Pará | Tel.: (91) 3201-8967 e (91) 99100-3731 | E-mail: coelhoeuclides@gmail.com

Editores do artigo: **Marcelo Henrique Farias de Medeiros** e **Julio Cesar Molina**

Editoras de seção: **Ercília Hitomi Hirota** e **Juliana Parise Baldauf**

#### **Ambiente Construído**

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

[www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido](http://www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido)

[www.scielo.br/ac](http://www.scielo.br/ac)

E-mail: [ambienteconstruido@ufrgs.br](mailto:ambienteconstruido@ufrgs.br)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.