

DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA DE CÁLCULO BAMBU-CONCRETO

Ligia Pauline Mesquita¹, Cleber J. Czarnieski¹, Antônio Correia Braga Filho²
Fábio Luiz Willrich¹, Humberto Correia Lima Júnior¹
& Normando Perazzo Barbosa²

RESUMO

O presente trabalho teve com objetivo principal o estudo da aderência entre o bambu e o concreto. Com base em uma programação estatística de experimento foram realizados dois estudos: o primeiro, onde se investigaram as influências da dimensão da seção transversal das varetas de bambu e da resistência do concreto na aderência bambu-concreto; e o segundo, onde foi avaliado o efeito da colocação de pinos artificiais nas varetas de bambu nessa aderência. Em cada estudo, realizaram-se 10 réplicas para cada combinação de fatores resultando em um total de 159 ensaios de arracamento. Os corpos-de-prova consistiam de varetas de bambu imersas em uma massa cilíndrica de concreto com 15 cm de diâmetro por 30 cm de altura. As varetas de bambu foram divididas em três trechos com 10 cm cada, ao longo dos 30 cm imersos no concreto, sendo a aderência avaliada apenas no trecho central. Curvas tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto são apresentadas e discutidas, e a tensão de aderência de cálculo é calculada e comparadas com os valores sugeridos por diversas normas internacionais para barras de aço lisas. Constatou-se na primeira fase da investigação que apenas a resistência do concreto influencia na aderência bambu-concreto e que essa tensão é apenas 20% inferior que a do aço liso-concreto. Já na segunda fase, foi verificado que os pinos de bambu e de aço elevam a capacidade de transferência de tensões bambu-concreto de forma significativa.

Palavras-chave: aderência, concreto, bambu, dimensões da seção transversal, resistência à compressão do concreto, pinos e ancoragem mecânica.

DETERMINATION OF THE BAMBOO-CONCRETE DESIGN BOND STRESS

¹ Laboratório de Modelos Reduzidos – CCET - UNIOESTE. Rua Universitária, 2069, CEP 85814-110, Cascavel, PR. Fone: (45) 220-3221.

² Universidade Federal da Paraíba – Centro de Tecnologia, Cidade Universitária, CEP 58059-900, João Pessoa, PB. Fone: (83) 246-2669.

ABSTRACT

This paper aimed to study the bamboo-concrete stress bond. Based on a statistical design of experiment, the investigation was divided in two: the first one, where the effects of the concrete compressive strength and the dimensions of the bamboo-splint cross-section were investigated; and the second, where the effect of artificial pins studding in the bamboo splints was evaluated. In both steps, ten replicates for each factors combination were done, resulting in 159 push-out tests. The specimens consisted of a bamboo-splint embedded in a cylinder of concrete 30 cm high and with diameter of 15 cm. The bamboo-splints were divided in three regions with 10 cm each. The bond stress was only studied in the centre region. Bond stress vs. relative displacement were presented and discussed. In addition, the design bond stresses of bamboo-concrete were calculated and their values were compared with those specified by International Building Codes for smooth steel and concrete. In the first step of the investigation, it was observed that only the concrete compressive strength influences the bamboo-concrete bond stress and that this stress is only 20% inferior to the smooth steel-concrete bond stress. In the second step, it was verified that the bamboo and the steel pins increased the transfer stress capacity between the concrete and bamboo.

Keywords: bond, concrete, bamboo, cross section dimensions, compressive concrete strength, pins and mechanic bond.

INTRODUÇÃO

A concepção básica de uma estrutura de concreto armado consiste na capacidade do concreto resistir aos esforços de compressão e o reforço, aos esforços de tração. Para que tal sistema seja eficiente e responda adequadamente às solicitações da estrutura, deve haver transferência de forças entre o concreto e a armadura (Macgregor, 1997). A aderência entre o concreto e o reforço é responsável por essa transferência quando da fissuração do primeiro. Quando eficiente, a aderência garante que esses dois materiais trabalhem de forma unificada, garantindo a capacidade do concreto continuar a resistir aos esforços após a ocorrência da sua fissuração (Park e Paulay, 1975).

O bambu é um material que possui propriedades mecânicas compatíveis às dos materiais utilizados em estruturas de concreto armado (Lima Jr. et alii, 2000). Por esse motivo, a possibilidade da utilização desse material como reforço em estruturas de concreto armado vem sendo estudada (Geymayer e Cox, 1970). Apesar do descrito, verifica-se que a utilização do bambu com esta finalidade tem sido dificultada pela

baixa aderência desenvolvida entre esse material e o concreto (Kurian e Kalam, 1977). Segundo Ghavami (1995) e Lopes et alii (2002), o bambu quando utilizado como reforço no concreto, absorve a água da mistura, aumentando de volume e voltando às dimensões originais após secagem. Isto faz com que a aderência entre os dois materiais fique prejudicada. Apesar desse, fato não foram encontrados na Literatura nacional e internacional trabalhos que quantifiquem a variação da taxa volumétrica do bambu imerso no concreto, nem tão pouco o valor da perda de aderência devido a esse efeito higroscópico.

O problema da baixa aderência bambu-concreto vem sendo estudado por diversos pesquisadores (Ghavami e Hombeek, 1981; Beraldo, 1987; Argollo e Freire, 1995; Ghavami, 1995; Lima Jr. et alii, 1996; Lopes et alii, 2002; e Da Rosa, 2002). Apesar disso, constata-se que nesses trabalhos as metodologias experimentais utilizadas para o ensaio de arracamento (*push-out test*) não se mostraram adequadas, uma vez que, os deslocamentos medidos apresentaram interferência de deslocamentos parasitas provenientes das acomodações e deformações da máquina de ensaio e de irregularidades da superfície de contato entre o bloco de concreto e os pratos das prensas. Além disso, observa-se que os tratamentos estudados nesses trabalhos para melhorar o mecanismo de aderência bambu-concreto basicamente consistiam na aplicação, por meio de pintura, de resinas impermeabilizantes à superfície do bambu. Entretanto, a grande maioria das resinas estudadas possuíam baixa resistência ao cisalhamento, funcionaram como lubrificante entre o bambu e o concreto, ou são materiais termoplásticos que se fluidificam com a elevação da temperatura, como é o caso do asfalto. Com base nisso, observa-se que, em sua grande totalidade, os resultados obtidos foram piores que aqueles com o bambu sem tratamento. Em outros casos, as resinas utilizadas foram epoxidicas. Nesses casos, observam-se elevações acentuadas na tensão de aderência bambu-concreto. Porém, o custo financeiro dessas resinas é elevado e torna a utilização do bambu mais cara que a do aço.

Com base no exposto, verifica-se que a questão da aderência bambu-concreto é complexa e que se fazem necessários maiores estudos para tentar solucionar as questões levantadas. Os resultados apresentados nesse artigo fazem parte de um programa de pesquisa mais amplo, que visa estudar estruturas de concreto reforçadas com bambu, e que atualmente vem sendo desenvolvido em parceria por três instituições de pesquisa: a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, o Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu e a Universidade Federal da Paraíba. O presente artigo apresenta os resultados de

um estudo que visou solucionar os problemas dos deslocamentos parasitas no ensaio de arrancamento e estudar a aderência bambu-concreto verificando a influência da resistência do concreto, das dimensões da seção transversal das varetas de bambu e do aumento da aderência mecânica bambu-concreto por meio de cravação de pino nas varetas de bambu.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Diversos pesquisadores sugerem que a aderência reforço-concreto é composta por três parcelas: aderência por adesão, por atrito e mecânica (Fib, 1999). Quando uma estrutura de concreto armado é solicitada por forças de pequena magnitude, desenvolve-se a aderência por adesão (estágio 1). Tais forças são resultado tanto da aderência química entre os materiais produzidas na interface reforço-concreto durante as reações de hidratação do cimento, quanto da aderência física provocada por efeitos de capilaridade, que está diretamente ligada à deformação elástica da camada cimentícia em torno da barra componente da armadura. A aderência por adesão rompe após um pequeno deslocamento relativo, e a partir de então sua contribuição é praticamente nula.

No caso de reforços com superfície lisa, após a ruptura da aderência por adesão, ocorre a ativação da aderência por atrito (estágio 2). Essa parcela está diretamente relacionada ao coeficiente de atrito entre as superfícies e à força de compressão perpendicular ao plano de contato, que é proveniente da retração do concreto, da irregularidade do plano de deslizamento e do efeito de cunha das partículas do concreto. Neste caso, o plano de deslizamento coincide com a superfície de contato reforço-concreto. Deste modo, por causa da baixa rugosidade do plano de atrito, observa-se que o efeito de cunha das partículas do concreto é pequeno e, conseqüentemente, a tensão de aderência diminui com o aumento do deslizamento.

Para reforços com superfícies irregulares ou com variação da seção transversal, depois de rompida a aderência por adesão, são ativadas concomitantemente as parcelas da aderência por atrito e mecânica (estágio 2 e 3). Observa-se que, neste caso, a superfície de deslizamento não é regular e não coincide com a superfície do reforço. Assim, como o efeito de cunha das partículas do concreto e o efeito de cunha causado pela irregularidade da geometria da barra são elevados e o esforço normal é bem superior ao das barras lisas. Por conseguinte, a tensão de atrito eleva-se com o deslizamento relativo da barra. Em adição, verifica-se que a parcela relativa à aderência mecânica é função do engrenamento mecânico entre as irregularidades da superfície do

reforço e o concreto. As irregularidades do reforço funcionam como consolos que tentam cortar a pasta do concreto. Segundo Leonhardt (1977), essa parcela é a mais efetiva e confiável da aderência e que ela é imprescindível para que se possa utilizar toda a capacidade resistente de reforços com elevada resistência à tração. Na Figura 1 apresentam-se, esquematicamente, as curvas tensão de aderência vs. deslocamento relativo para os aços de construção e o concreto. Nessa pode-se observar todos os três estágios de aderência para os aços com superfícies nervuradas e os dois estágios para os aços com superfície lisa. Devido à superfície lisa do bambu e analisando os diagramas apresentados na Figura 1, é esperado que os diagramas de arrancamento bambu-concreto apresentem o mesmo comportamento daquele apresentado pelos aços com superfícies lisas.

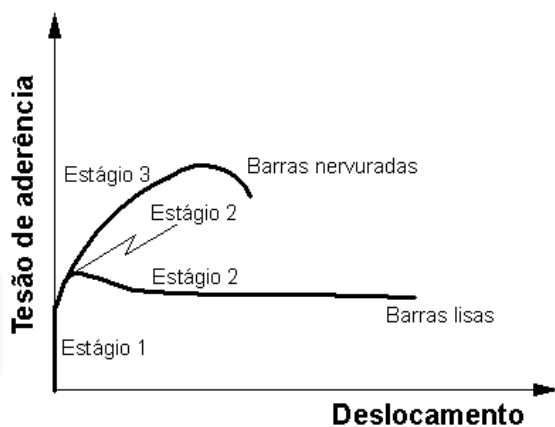


Figura 1. Curvas esquemáticas tensão de aderência vs. deslocamento e os estágios da aderência aço-concreto (adaptada de Fib (1999))

Segundo RILEN-FIP-CEB (1973), a medição da variação das tensões ao longo do comprimento deve ser avaliadas por meio de um valor médio calculado com base na Eq. (1):

$$t_{bm} = \frac{F_{arr}}{u \cdot \ell_b} \quad \text{Eq.(1)}$$

na qual, F_{arr} é a força necessária para arrancar a vareta da massa de concreto, u é o perímetro de contato entre o reforço e o concreto e ℓ_b é o comprimento da barra em contato com o concreto. Devido à grande dispersão dos valores das forças obtidas nos ensaios de arrancamento, RILEN-FIP-CEB (op. Cit.) sugere que a força de arrancamento F_{arr} seja definida como a força correspondente ao deslocamento de 0,1 mm.

O Eurocode (1992) estabelece um coeficiente de 2,15 para o cálculo da tensão de aderência de cálculo a partir da tensão de aderência característica para os aços de construção e que a tensão de aderência de cálculo para o caso de barras de aço lisas e nervuradas devem ser calculadas segundo as Eq.(2) e Eq.(3), respectivamente:

$$f_{bd} = \frac{0,36 \cdot g_m \cdot \sqrt{f_{ck}}}{g_c} \quad \text{Eq.(2)}$$

$$f_{bd} = \frac{0,472 \cdot g_m \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}}{g_c} \quad \text{Eq.(3)}$$

nas quais, f_{ck} é a resistência característica do concreto, g_c é um coeficiente de minoração da resistência à compressão do concreto e g_m é um coeficiente de minoração global. Os valores de g_c e g_m são 1,5 e 0,7 respectivamente. Observa-se que a aplicação desses dois coeficientes de minoração geram o valor de 2,15, citado anteriormente.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O agregado miúdo utilizado foi areia quartzosa com módulo de finura de 2,11, diâmetro máximo de 2,4 mm e massa específica aparente de 1,62 kg/dm³ (NBRNM248:2003 e NBRNM52:2003). Utilizou-se agregado graúdo de origem basáltica com módulo de finura de 6,8, diâmetro máximo de 19 mm e massa específica aparente de 1,92 kg/dm³ (NBRNM248:2003 e NBRNM53:2003). O cimento utilizado foi o cimento Portland branco, CPB-40 que apresentava um módulo de finura de 426 m²/kg.

As porcentagens dos materiais foram definidas a partir de uma curva experimental de dosagem (Helene e Terzian, 1995), para a qual adotou-se se um teor de argamassa de 50%, uma relação água/materiais secos de 8,8% e abatimento no cone de Abrams de 15 cm ± 2 cm. As resistências dos concretos foram avaliadas aos sete dias por meio de ensaio de corpos-de-prova cilíndricos 15 cm x 30 cm vibrados mecanicamente. O ensaio dos corpos-de-prova seguiu as prescrições da norma brasileira (NBR 5739:1994). Estabeleceram-se três resistências bases para os concretos a serem estudados na fase 1 da investigação: 15 MPa, 25 MPa e 35 MPa. As características dos concretos utilizados são apresentadas na Tabela 1.

O bambu utilizado foi da espécie *Dendrocalamus giganteus*, cujos os colmos foram cortados com idade entre dois e três anos, e deixados secar, na sombra, em temperatura

ambiente por um período de três meses. Estes apresentavam comprimento médio de 20 metros e foram divididos em três trechos de igual comprimento, aqui denominados: basal, intermediário e topo. Apenas os trechos basais e intermediários foram utilizados. As propriedades mecânicas do bambu utilizado são apresentadas na Tabela 2.

Utilizaram-se barras de aço nervuradas com diâmetro de 10 mm, tensão de escoamento de 628 MPa e módulo de elasticidade de 219 GPa, para ensaio de arrancamento a título de comparação com o bambu.

Tabela 1. Propriedades do concreto

Resistência (MPa)	Proporções dos materiais	Slump (mm)	Relação Água/cimento	Massa Específica (kg/m ³)	$f_{cj} - s$ (MPa)	f_{ck} (MPa)
15	1:3,18:4,18	16	0,68	2409,53	16,8 – 3,7	10,8
25	1:2,42:3,42	14	0,58	2440,20	25,2 – 3,4	19,6
35	1:1,79:2,79	16	0,50	2443,97	39,6 – 4,7	31,8

Nota: f_{cj} é a resistência média dos corpos-de-prova, f_{ck} é a resistência característica do concreto e s é o desvio-padrão da amostra.

Tabela 2. Propriedades mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus* (Lima Jr. et alii, 2000)

Região	Resistência à tração (MPa)	Módulo de elasticidade na tração (GPa)	Resistência à compressão (MPa)	Módulo de elasticidade na compressão (GPa)	Coefficiente de Poisson	Resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (MPa)
Nodal	97	13	58	19	-	-
Internodal	277	23	58	22	0,24	7,8

Variáveis estudadas e preparação dos corpos-de-prova da fase 1^o da investigação

O procedimento da escolha das variáveis e seus níveis de estudo seguiu uma programação fatorial de experimento (Montgomery, 1984). Duas variáveis foram selecionadas para análise nessa fase: as dimensões das seções transversais das varetas de bambu (X_1) e a resistência do concreto (X_2). Foram utilizados três níveis de estudo para as duas variáveis: varetas de bambu com dimensões das seções transversais de 1 cm x 1 cm, 1 cm x 1,5 cm e 1 cm x 2 cm e resistências média à compressão de 15 MPa, 25 MPa e 35 MPa. Para cada combinação de variável foram preparadas dez réplicas, resultando em um programa fatorial de $3 \times 3 \times 10 = 90$ corpos-de-prova.

Os corpos-de-prova consistiam de varetas de bambu imersas em blocos cilíndricos de concreto com dimensões de 15 cm x 30 cm. As varetas foram cortadas da região internodal dos colmos. Após o corte, essas foram limpas e suas dimensões medidas com paquímetro, apresentando seção transversal com espessuras e larguras médias de 8,8 mm x 10,0 mm, 9,6 mm x 13,8 mm e 10,7 mm x 19,3 mm, respectivamente; e comprimento de 50 cm. Em seguida, o trecho de 30 cm a ser imerso nos blocos de concreto foi dividido em três regiões de igual comprimento com 10 cm cada. A

avaliação da aderência foi realizada apenas nos 10 cm centrais (ver Figura 2). Nas outras duas regiões, a aderência foi anulada por meio de graxa e camadas sucessivas de papel. Objetivando-se avaliar a eficiência da técnica utilizada para anular a aderência bambu-concreto nas extremidades das varetas, ensaiaram-se 6 corpos-de-prova onde todos os 30 cm das varetas imersos no concreto receberam esse tratamento. As varetas utilizadas nesses corpos-de-prova apresentavam seção transversal com espessuras e larguras médias de 10,1 mm x 9,4 mm e foram preparados dois corpos-de-prova para cada resistência à compressão do concreto. Finalmente, ensaiaram-se 9 corpos-de-prova de arrancamento com barras de aço CA – 50 de 10 mm de diâmetro, sendo 3 corpos-de-prova para cada resistência à compressão do concreto. A metodologia utilizada para preparo dos corpos-de-prova com barras de aço foi a mesma utilizada para aqueles com varetas de bambu.

Os corpos-de-prova foram moldados em fôrmas metálicas e o concreto vibrado por meio de vibrador de agulha. A concretagem dos 99 corpos-de-prova foi dividida em nove betonadas. De cada betonada, moldaram-se três corpos-de-prova cilíndricos 15 cm x 30 cm para avaliação da resistência média à compressão do concreto, e que cujos valores foram apresentados no item 3.1 do presente trabalho. Durante a concretagem, discos de madeira com 15 cm de diâmetro e 1 cm de espessura, furados no centro, foram dispostos nas extremidades do moldes objetivando a centralização das hastes de bambu em relação à massa de concreto. Após a concretagem, os corpos-de-prova foram deixados nas fôrmas por um período de 24 h. Em seguida, efetuou-se a desfôrma e os corpos-de-prova foram envoltos em lona plástica onde permaneceram por mais 7 dias até serem ensaiados.

Os corpos-de-prova foram nomeados de acordo com as larguras das varetas de bambu e a resistência do concreto, assim, as letras do nome CPXY correspondem: CP corpo-de-prova, X a largura das varetas e Y a resistência do concreto. Deste modo, o CP1025 corresponde aos corpos-de-prova com varetas de 10 mm de largura e concreto com resistência à compressão de 25 MPa.

Variáveis estudadas e preparação dos corpos-de-prova da fase 2^o da investigação

Na fase dois da investigação foi estudada e quantificada a parcela da aderência mecânica gerada por pinos artificiais cravados nas varetas de bambu. Duas variáveis foram selecionadas para análise: o tipo do pino (pino de aço e pino de bambu) e o número de pinos utilizados (um e dois pinos). Para cada combinação de variável foram

preparadas dez réplicas. Em adição, ensaiaram-se dez corpos-de-prova com um pino de aço e dez com um pino de bambu sem aderência por adesão.

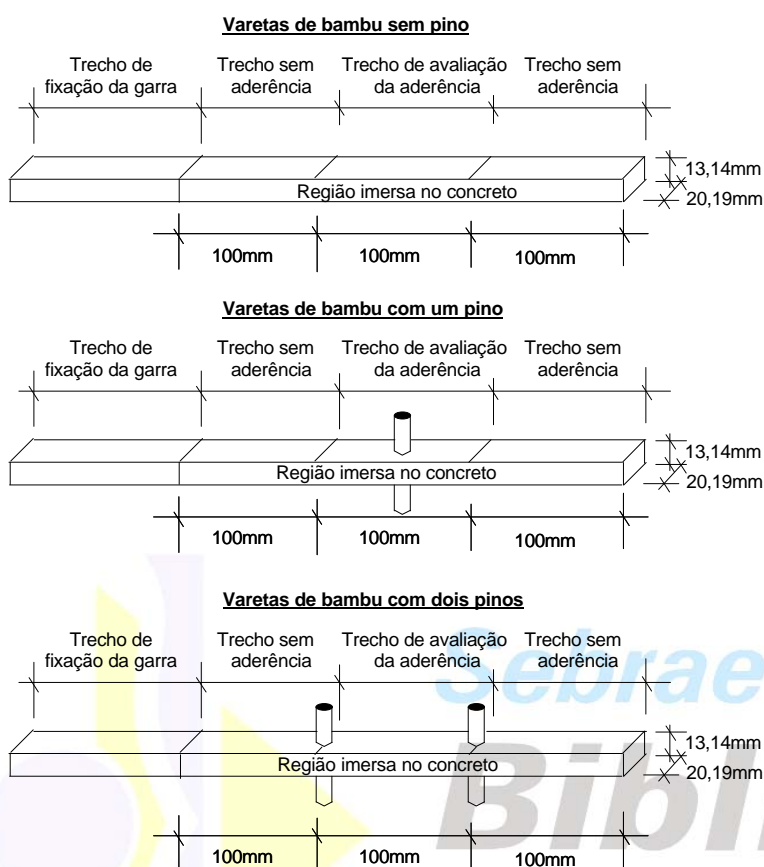


Figura 2. Características dos corpos-de-prova

A preparação e as características dos corpos-de-prova foram iguais as da 1^o fase da investigação. Nessa fase utilizaram-se varetas com seção transversal retangular com espessura e largura médias de 13,14 mm e 20,19 mm, respectivamente e concreto com resistência média à compressão de 25 MPa. No trecho dos 10 cm das varetas, foram feitos furos de 8 mm de diâmetro para cravação dos pinos. Os pinos de aço e bambu possuíam diâmetro de 8 mm e comprimento de 50 mm. Objetivando-se quantificar apenas a parcela da aderência mecânica gerada pelos pinos, corpos-de-prova com pino e sem aderência também foram feitos. Nesses, seguiu-se o mesmo procedimento anteriormente descrito; contudo, a aderência por adesão nos 10 cm centrais das varetas de bambu foi anulada por meio de graxa e camadas sucessivas de papel. Na Figura 2 apresentam-se detalhes das hastes de bambu.

Os corpos-de-prova da 2^o fase foram nomeados de acordo com as letras iniciais das variáveis estudadas. Deste modo, os corpos-de-prova com um e dois pinos de aço e com

aderência na região central das varetas foram nomeados de 1PACA e 2PACA, respectivamente; os com um e dois pinos de bambu e com aderência na região central das varetas foram nomeados de 1PBCA e 2PBCA, respectivamente; com um pino de aço e sem aderência na região central das varetas 1PASA; e finalmente, com um pino de bambu e sem aderência na região central das varetas de 1PBSA.

Ensaio e instrumentação

Os corpos-de-prova foram ensaiados em uma prensa hidráulica com rigidez elevada. Para tanto, desenvolveu-se uma gaiola de reação em aço 1020 para ensaio dos corpos-de-prova na prensa. A gaiola era composta por duas peças básicas: uma inferior para fixação dos corpos-de-prova e uma superior para acoplagem da célula de carga. A parte inferior da gaiola era composta por uma chapa de aço de 25,4 mm de espessura, na qual foram soldadas 4 barras de aço de 19 mm de diâmetro para união da parte inferior à superior. Nessa foi realizado um furo de 40 mm de diâmetro para passagem das varetas de bambu a serem fixadas à garra ativa da prensa hidráulica. A peça superior era constituída de uma chapa de aço de 25,4 mm de espessura, na qual era fixada a peça inferior da gaiola. Ainda, na peça superior foram soldadas 4 barras de aço de 10 mm de diâmetro, que atravessavam todo o bloco reativo da máquina de ensaio. Acima do bloco reativo, fixaram-se, às quatro barras, duas chapas menores de 12,5 mm de espessura dentre as quais foi disposta uma célula de carga com capacidade de força de 100 kN. Entre a chapa inferior da gaiola e a base do cilindro de concreto, foi disposta uma placa de neoprene para uma melhor distribuição das forças. Um medidor de deslocamento mecânico com sensibilidade de 0,01 mm e curso de 50 mm foi utilizado para medir os deslocamentos relativos entre o concreto e o bambu. O medidor de deslocamento foi fixado ao bloco cilíndrico de concreto por meio de uma base magnética e de presilhas de aço. Cuidados foram tomados para evitar qualquer contato entre o medidor de deslocamento e a gaiola metálica. Esse procedimento teve como objetivo evitar que deslocamentos parasitas, oriundos da acomodação da gaiola e do cilindro de concreto, interferissem nas leituras dos deslocamentos. Na Figura 3, apresentam-se detalhes do sistema de reação desenvolvido para o ensaio de arrancamento.

A força de arrancamento foi aplicada de modo quase estático, monotonicamente com controle de força. As leituras dos instrumentos foram realizadas manualmente a cada 0,20 mm de deslocamento. A duração média de cada ensaio foi da ordem de 10 min e esse era concluído quando o deslocamento relativo bambu-concreto atingia 5 mm. Após

ensaio, todos os blocos de concreto foram partidos ao meio por compressão diametral para análise da superfície de aderência.

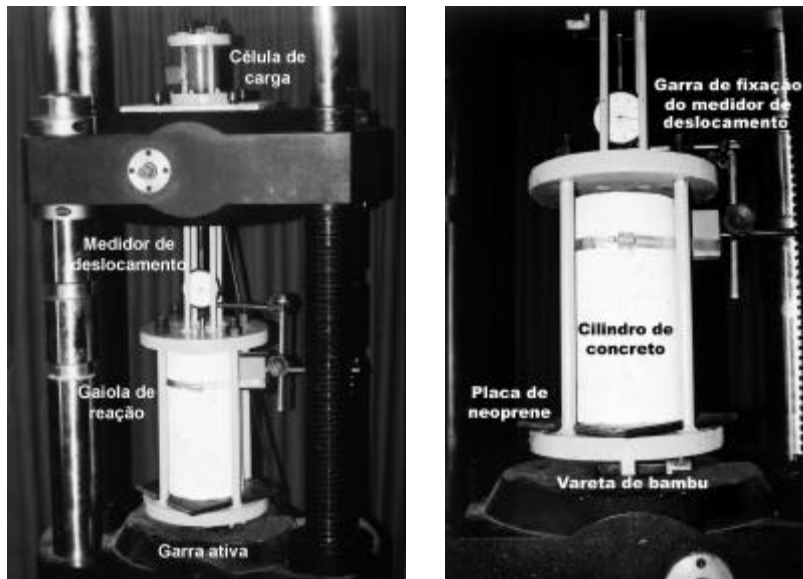


Figura 3. Detalhes do ensaio de arrancamento

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comportamento geral

As resistências dos concretos dos corpos-de-prova ficaram próximas das resistências pré-estabelecidas. Em todas as concretagens, os concretos apresentaram boa trabalhabilidade, com abatimento no cone de Abrams de $15 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$. Na Tabela 1, apresentaram-se as resistências médias e características dos concretos utilizados no dia dos ensaios de arrancamento.

O mecanismo de ensaio desenvolvido nesse trabalho mostrou-se adequado. A gaiola de reação apresentou elevada rigidez para a intensidade de força aplicada nos ensaios. Na grande maioria dos corpos-de-prova foi possível conduzir o ensaio até o deslocamento relativo bambu-concreto de 5 mm. Apenas em alguns corpos-de-prova com dois pinos de aço as varetas de bambu romperam à tração, quando o deslocamento relativo se aproximava daquele valor. Apesar desse fato, esses ensaios não foram comprometidos, uma vez que, os deslocamentos relativos já eram bem superiores ao valor utilizado para o cálculo das tensões de aderência, 0,1 mm. Nesses ensaios, as curvas tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto foram extrapoladas por meio de polinômios obtidos por análise de regressão sobre os dados dos ensaios.

O comportamento dos 6 corpos-de-prova utilizados na avaliação da eficiência da técnica utilizada para anular a aderência bambu-concreto nas extremidades das varetas foi semelhante. Não se constatou influência da resistência do concreto nesses corpos-de-prova e a tensão de aderência média calculada para o deslocamento de 0,1 mm foi de apenas 0,07 MPa. Observa-se que esse valor é praticamente desprezível.

Nas Figuras 4a e 4b, apresentam-se as curvas tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto para os diversos corpos-de-prova da 1ª fase da investigação. Ainda, na Figura 4b são apresentadas as curvas tensão de aderência vs. deslocamento relativo aço-concreto. Observa-se em todos os corpos-de-prova de bambu boa uniformidade no comportamento entre os diagramas das 10 réplicas. O comportamento dos diagramas de tensão de aderência vs. deslocamento do bambu-concreto é semelhante à curva de aderência do aço liso. Inicialmente, nota-se um trecho vertical, que se caracteriza pela parcela da aderência por adesão – estágio 1 ; em seguida, evidencia-se um pequeno pico de tensão e o início da aderência por atrito – estágio 2. A partir desse ponto verifica-se uma pequena queda da tensão de aderência, tornando-se constante até o deslocamento de 5 mm. Já nos diagramas das barras de aço, após o estágio 1 e 2, nota-se um aumento significativo da tensão de aderência aço-concreto devido à aderência mecânica.

Após ensaio, todos os corpos-de-prova tiveram o bloco cilíndrico de concreto partido ao meio por compressão diametral. Na Figura 5 apresentam-se fotografias das superfícies das varetas de bambu e de aço após ensaio da 1ª fase da investigação. Nas fotografias das varetas de bambu, constata-se regiões de pasta de concreto aderida ao bambu, caracterizando cisalhamento da pasta da região de interface bambu-concreto. O mesmo é observado para a vareta de aço; contudo, observou-se ao toque que a aderência desta pasta com o aço era maior que nas varetas de bambu. Em alguns, corpos-de-prova observou-se que fibras de bambu cisalharam das varetas e ficaram aderidas à massa de concreto.

Nas Figuras 6a e 6b apresentam-se as curvas tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto para os diversos corpos-de-prova. Novamente, observa-se boa uniformidade no comportamento entre os diagramas das 10 réplicas. Nos corpos-de-prova 1PACA, após o estágio 1 e 2, nota-se que o aumento da tensão de aderência devido à aderência mecânica não foi significativo. Analisando-se as varetas de bambu após ensaio (Figura 7) observa-se que este comportamento foi provocado por causa do esmagamento da parede do bambu em contato com o pino de aço. Deste modo, apesar

do pino de aço criar uma elevada aderência mecânica, essa não consegue se desenvolver efetivamente, uma vez que a resistência ao esmagamento da parede do furo do bambu é pequena.

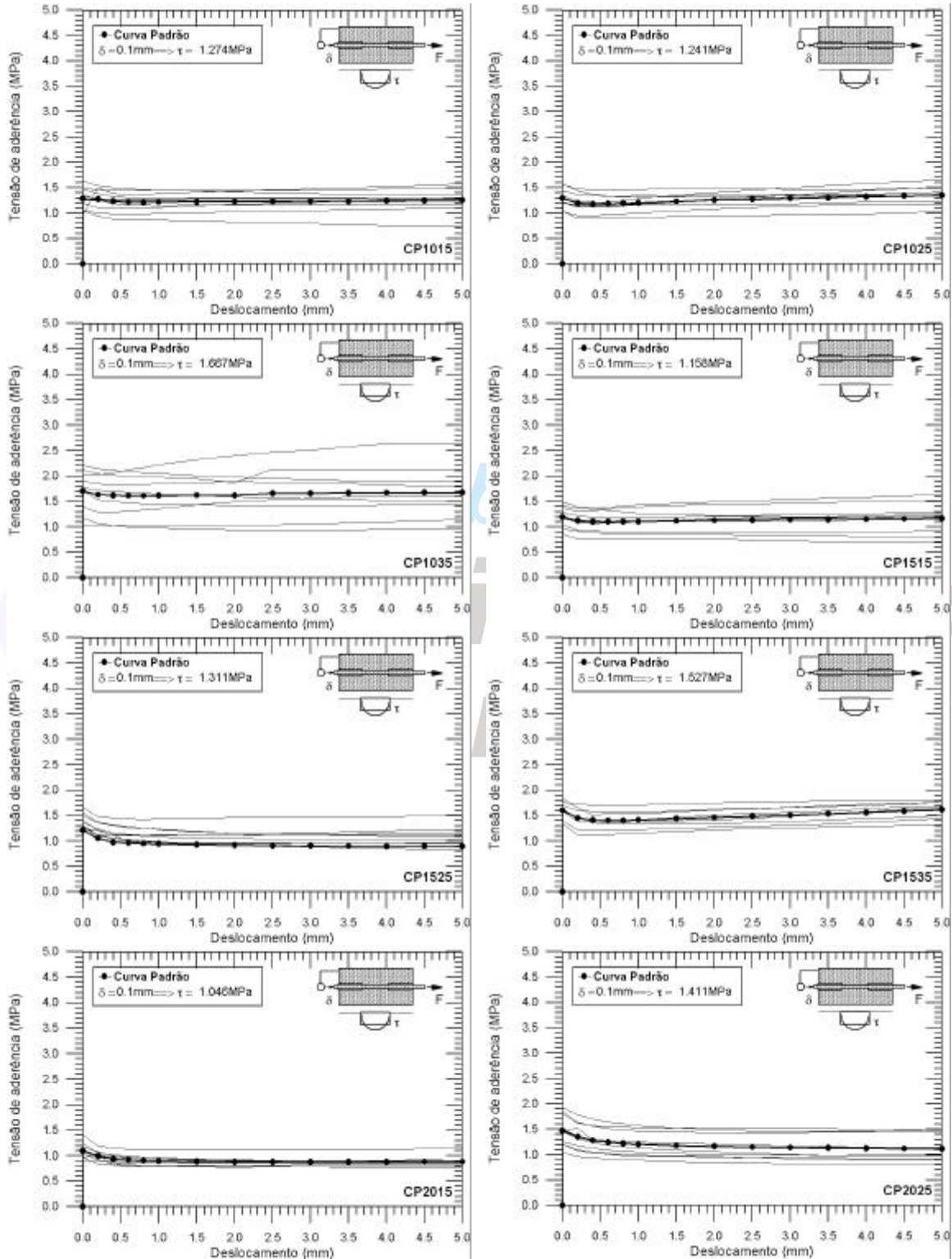


Figura 4a. Diagramas tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto para os diversos corpos-de-prova

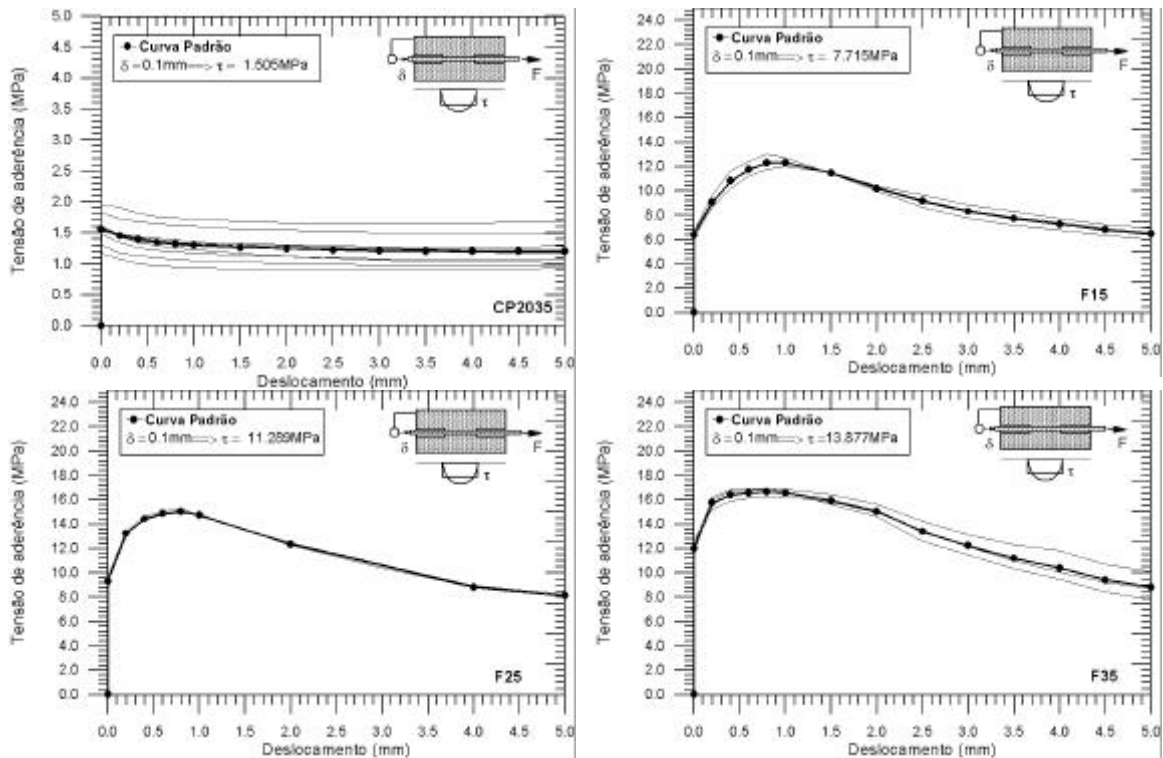


Figura 4b. Diagramas tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto para os diversos corpos-de-prova

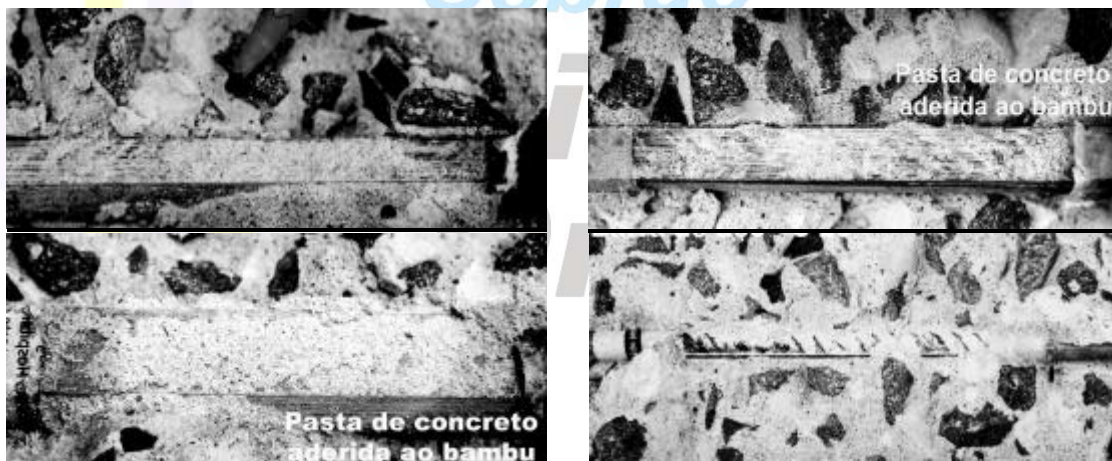


Figura 5. Aparência das varetas de bambu após o teste de arrancamento

Nos corpos-de-prova 1PBCA, a parcela de aderência mecânica só foi evidenciada para deslocamentos superiores a 1mm, mesmo assim, o aumento da tensão não foi significativo. Nesses corpos-de-prova, observou-se tanto esmagamento do pino de bambu quanto da parede do furo das varetas (Figura 7). Analisando-se os diagramas dos corpos-de-prova 1PASA e 1PBSA, observa-se que os pinos são responsáveis por uma parcela da aderência por adesão e atrito. O comportamento geral desses corpos-de-prova foi semelhante aos com aderência, tanto na forma dos diagramas como nos modos de colapsos; contudo, nota-se uma queda da tensão máxima para o deslocamento nulo. Ao se comparar os diagramas 2PACA com os 1PACA, verifica-se um aumento de 60%

na tensão para o ponto de deslocamento nulo, mantendo-se esse comportamento até o deslocamento de 5 mm. Para os diagramas 2PBCA e 1PBCA o comportamento foi similar aos com pinos de aço; contudo, o aumento relativo da tensão foi de aproximadamente 43%.

Tensão de aderência

Na Tabela 3 são apresentadas as tensões de aderência para cada tipo de corpo-de-prova ensaiado com as respectivas tensões médias e desvios-padrão. Objetivando-se analisar a influência das dimensões da seção transversal das varetas de bambu (fator X_1) e da resistência à compressão do concreto (fator X_2) realizou-se uma análise de variância sobre os valores das tensões de aderência apresentados na Tabela 3. Os graus de significância do efeito de cada fator foram testados para níveis de confiabilidade de 95% e 99%, usando-se o F teste. Na Tabela 4, apresentam-se os resultados da análise de variância realizada. Com base nesses resultados, observa-se que a influência das dimensões da seção transversal das varetas de bambu é insignificante para um nível de confiabilidade de 99%. Já a resistência do concreto mostrou-se significativa para um nível de confiabilidade de 99%. Nota-se que a interação entre os dois fatores estudados não apresenta significância para o mesmo nível de confiabilidade. Visando à obtenção de uma equação de correlação entre a resistência do concreto e a tensão média de aderência bambu-concreto, realizou-se uma análise de regressão múltipla não-linear com os dados apresentados na Tabela 3. A equação obtida apresentou coeficiente de correlação (R^2) de 73%, e é dada pela Eq.(4):

$$t_{bu} = 0,026977 \cdot f_{ck} + 1,420459 \quad \text{Eq.(4)}$$

na qual f_{ck} é a resistência á compressão característica do concreto em MPa. Observa-se que a tensão de aderência bambu-concreto varia linearmente com f_{ck} .

Na Tabela 3, apresentam-se as tensões de aderência para os ensaios de aderência da 2º fase da investigação. Comparando o valor médio da tensão de aderência dos corpos-de-prova utilizados na avaliação da eficiência da técnica utilizada para anular a aderência bambu-concreto nas extremidades (0,07 MPa) com os resultados das varetas com um pino de aço, um pino de bambu e sem aderência, observa-se que os pinos elevaram a tensão de aderência bambu-concreto, sendo responsáveis por um acréscimo de 0,89 MPa e 0,78 MPa, respectivamente. Subtraindo-se esses valores dos valores das tensões de aderência média dos corpos-de-prova 1PACA e 1PBCA, obtém-se para os

valores de 0,68 MPa e 0,53 MPa, respectivamente. Esses valores de tensões correspondem à parcela da tensão de aderência por adesão mais atrito, que em média foi de 0,60 MPa. Observa-se que a diferença entre estes valores para os dois tipos de pino foi pequena, considerando-se os desvios-padrão das amostras.

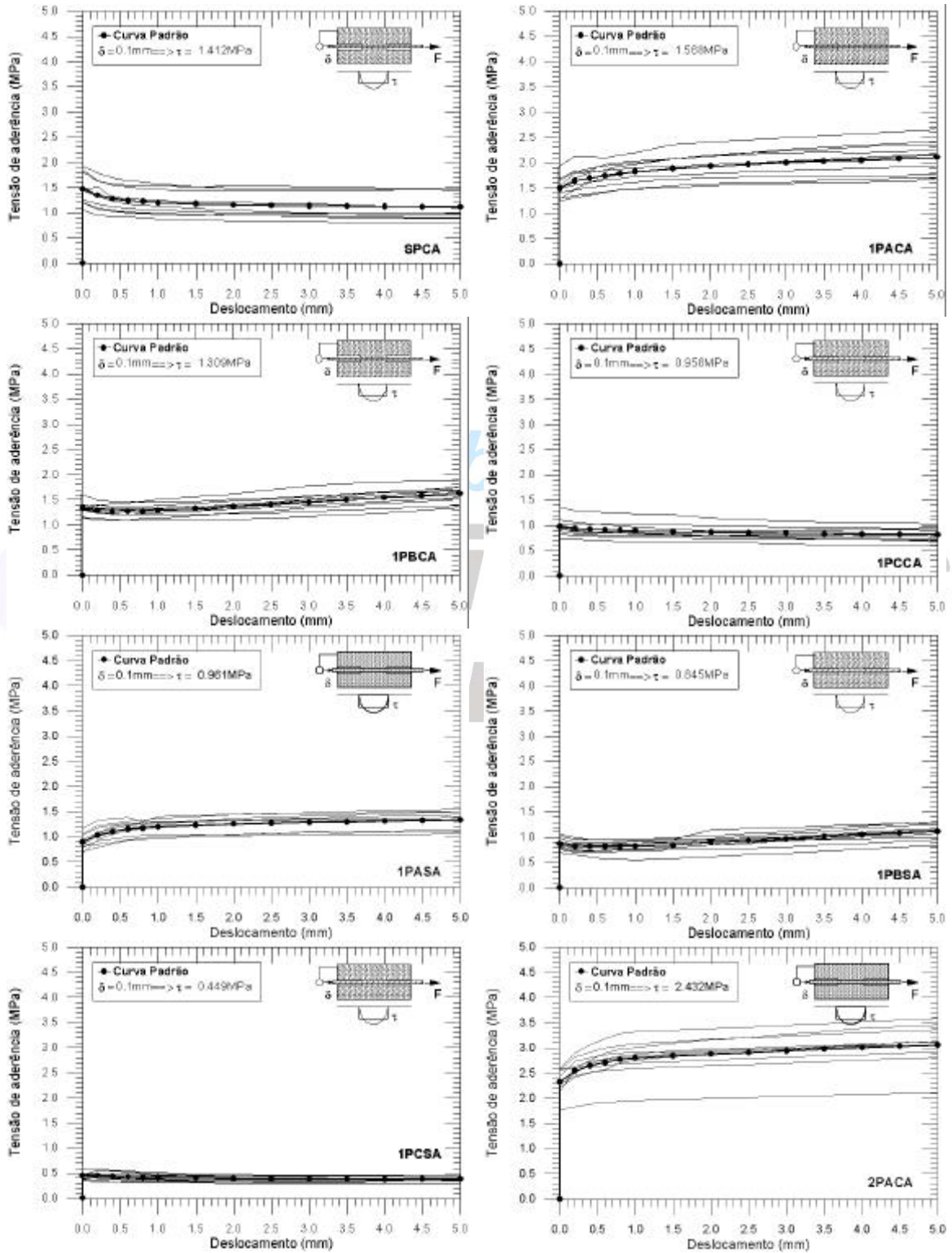


Figura 6a. Diagramas tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto para os diversos corpos-de-prova

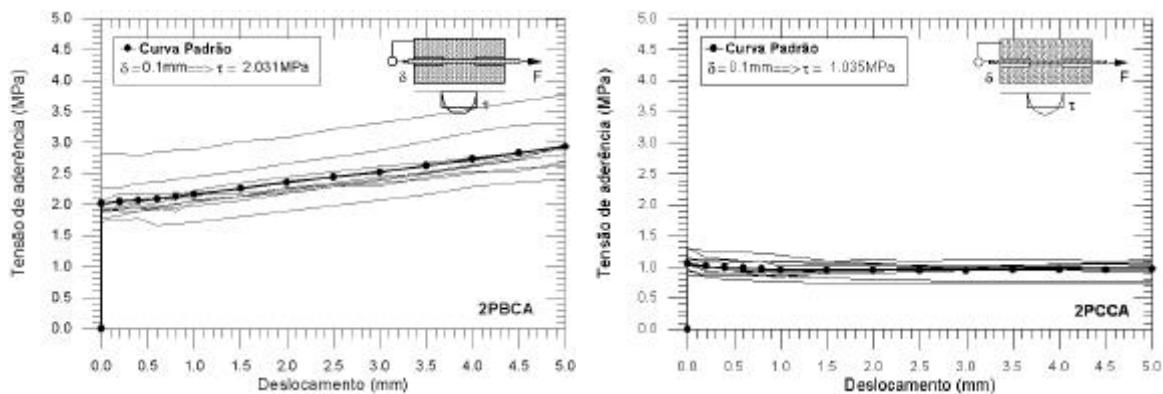


Figura 6b. Diagramas tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto para os diversos corpos-de-prova

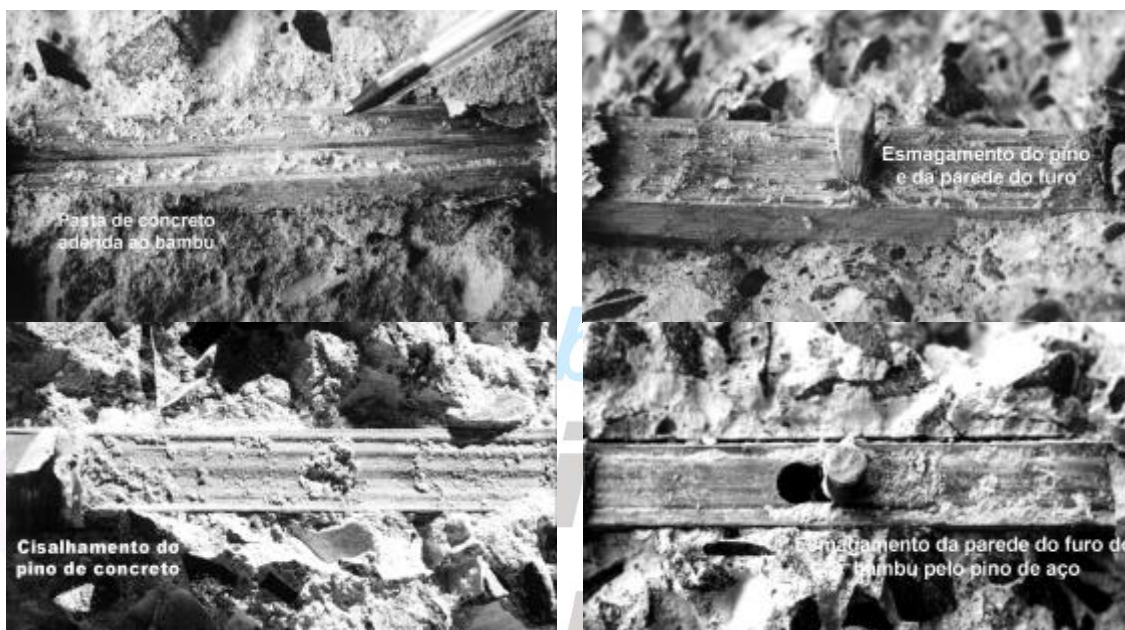


Figura 7. Aparência das varetas de bambu após o teste de arrancamento

Finalmente, considerando os corpos-de-prova com varetas de bambu de 2 cm de largura e resistência do concreto de 25 MPa ensaiados na 1ª fase, observa-se que esses apresentaram tensão média de aderência de 1,41 MPa, ou seja, 135% superior ao valor da tensão de aderência de adesão mais atrito obtido para os corpos-de-prova com pinos.

Ao contrário do esperado o efeito de superposição das tensões não ocorreu. Acredita-se que esse fato seja proveniente da presença do furo. Observa-se que as paredes paralelas às fibras das varetas de bambu apresentam uma permeabilidade inferior as paredes transversais. Isto faz com que haja uma maior absorção da água de amassamento do concreto na região do furo, comprometendo ainda mais a aderência bambu-concreto. Ainda, no caso dos corpos-de-prova com pinos de bambu esse efeito é mais intenso, uma vez que os próprios pinos também absorvem água.

Tabela 3. Tensões de aderência dos corpos-de-prova (MPa) obtidos nos ensaios

Tipo	Corpos-de-prova										$t_{bm} - s$
	CP1	CP2	CP3	CP3	CP5	CP6	CP7	CP8	CP9	CP10	
CP1015	0,991	1,020	1,243	1,150	1,315	1,426	1,472	1,226	1,310	1,585	1,27 – 0,19
CP1025	1,518	0,965	1,170	0,984	1,286	1,162	1,403	1,503	1,178	1,412	1,25 – 0,19
CP1035	2,082	1,116	2,020	1,625	1,873	1,340	1,029	1,750	2,176	1,642	1,66 – 0,39
CP1515	1,137	1,391	1,252	0,987	0,811	1,130	1,335	0,936	1,442	1,148	1,15 – 0,20
CP1525	1,216	1,465	1,197	1,210	1,567	1,429	1,312	1,300	1,207	1,133	1,30 – 0,14
CP1535	1,517	1,650	1,237	1,750	1,490	1,516	1,313	1,747	1,489	1,612	1,53 – 0,16
CP2015	0,890	1,303	1,145	1,125	1,025	1,056	0,906	0,986	0,978	1,101	1,05 – 0,12
CP2025	1,001	1,483	1,711	1,854	1,385	1,138	1,434	1,750	1,148	1,215	1,41 – 0,29
CP2035	1,778	1,239	1,497	1,410	1,523	1,516	1,933	1,499	1,120	1,540	1,50 – 0,23
1PASA	0,800	1,005	1,130	0,750	1,240	0,920	0,850	1,100	0,830	1,005	0,96 – 0,16
1PBASA	0,680	1,025	0,885	0,995	0,815	0,745	0,855	0,740	0,935	0,780	0,85 – 0,11
1PACA	1,520	1,325	1,440	1,755	1,275	1,370	1,730	2,025	1,585	1,655	1,57 – 0,23
1PBCA	1,290	1,265	1,370	1,350	1,380	1,555	1,285	1,330	1,120	1,145	1,31 – 0,12
2PACA	2,590	1,795	2,350	2,685	2,590	2,735	2,335	2,310	2,360	2,575	2,43 – 0,27
2PBCA	1,913	1,740	1,920	1,935	2,820	2,265	1,793	2,107	1,890	1,920	2,03 – 0,31

OBS.: t_{bm} é a tensão média de aderência e s o desvio-padrão.

Tabela 4. Análise de variância dos valores da tensão de aderência bambu-concreto

Variável	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Média dos quadrados	Fator (F_0)	Mínimo valor requerido para a significância do fator ($F_{0,01,n,89}$) e ($F_{0,05,n,89}$)	
Fatores principais						
X_1	0,23187	2	0,11593	0,7942	4,913	3,122
X_2	4,86510	2	2,43225	16,6636	4,913	3,122
Interações dos fatores						
$X_1 \wedge X_2$	1,36187	4	0,34047	2,3323	3,591	2,502
Resíduo	11,82437	81	0,14598	--		
Total	18,28320	89	--	--		

Outro fato que merece menção é que apesar de cravados sob pressão, os pinos de bambu não apresentavam seção transversal circular uniforme, visto que foram confeccionados manualmente. Isto pode ter gerado concentrações de tensões na parede do furo e deslocamento de corpo-rígido dos pinos. Deste modo, sugere-se um estudo específico para avaliar o efeito da absorção de água e da variação dimensional do bambu imerso na massa do concreto.

Nos corpos-de-prova com dois pinos de aço e dois pinos de bambu verifica-se que a tensão de aderência foi maior que a dos corpos-de-prova sem pinos, em média de 73% e 44%, respectivamente. Ainda, considerando-se a parcela de aderência mecânica gerada por cada pino de aço e bambu (0,89 MPa e 0,78 MPa, respectivamente) e a parcela da aderência por adesão mais atrito (0,68 MPa e 0,53 MPa, respectivamente), as tensões de aderência médias para os 2PACA e 2PBCA calculada com esses valores são 2,46 MPa e 2,09 MPa, respectivamente. Observa-se que esses valores diferem dos valores das tensões apresentadas na Tabela 3 de somente 1,23% e 2,96%.

Tensão de aderência de cálculo bambu-concreto

Seguindo os procedimentos sugeridos pelos códigos normativos para aço-concreto, considerou-se que a tensão de aderência característica entre bambu-concreto segue uma distribuição Normal. Ainda, considerando uma probabilidade de apenas 5% dos valores serem inferiores ao esse valor característico, tem-se que a tensão característica de aderência bambu-concreto pode ser calculada com base na Eq.(5):

$$t_{bk} = t_{bm} - \frac{p \cdot s}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq.(5)}$$

na qual t_{bm} é a tensão de aderência média, s é o desvio-padrão da amostra, n é o número de leituras e p é um coeficiente estatístico que, para o quantil de 5%, é 1,645. Para calcular o valor da aderência de cálculo do bambu (t_{bd}) utilizou-se o coeficiente de segurança sugerido pelo Eurocode (1992) de 2,15 para o aço-concreto.

Na Tabela 5, apresentam-se os valores característicos e de cálculo da tensão de aderência para o bambu, obtidos dos ensaios experimentais da 1^o fase da investigação. Observa-se que as diferenças entre as tensões de aderência de cálculo do bambu e do aço liso calculados segundo Eurocode (1992), para concretos com resistência à compressão de 15 MPa, é em média de apenas 10%. Entretanto, elevando-se a resistência do concreto para 35MPa essa diferença aumenta para 30%.

Na Tabela 6, apresentam-se os valores característicos e de cálculo da tensão de aderência para o bambu com pinos. A cravação de um pino de aço e de bambu praticamente não geraram aumentos significativos na tensão de aderência de cálculo; contudo, observa-se que quando 2 pinos de aço e de bambu são introduzidos ocorre uma elevação da ordem de 80% e 50% na tensão de aderência de cálculo, respectivamente, e que obtém-se valores superiores aos das barras de aço liso. Entretanto, esse valores ainda são inferiores ao dos aços nervurados.

Na Tabela 6, apresentam-se os valores característicos e de cálculo da tensão de aderência para as barras de aço obtidas experimentalmente. Observa-se que esses valores foram em média 206% superior às calculadas segundo Eurocode (1992). Verifica-se ainda, que a resistência do concreto não tem influência significativa sobre a relação entre as resistências de aderência de cálculo teórica e experimental, sendo essa variação de apenas 3,9% em relação ao valor médio.

Tabela 5 – Tensões de aderência para o bambu e comparação com o aço liso (MPa)

<i>Tipo</i>	t_{bm}	t_{bk}	t_{bd}	<i>Tensão de aderência para a barra de aço lisa (t_{ad}) [16]</i>	t_{bd}/t_{ad}
CP1015	1,274	1,175	0,546	0,552	0,990
CP1025	1,258	1,154	0,537	0,744	0,722
CP1035	1,665	1,458	0,678	0,947	0,716
CP1515	1,157	1,051	0,489	0,552	0,885
CP1525	1,304	1,231	0,572	0,744	0,769
CP1535	1,532	1,445	0,672	0,947	0,710
CP2015	1,052	0,987	0,459	0,552	0,832
CP2025	1,412	1,261	0,586	0,744	0,788
CP2035	1,506	1,384	0,644	0,947	0,680

Tabela 6 – Tensões de aderência para o aço (MPa)

<i>Tipo</i>	t_{bm}	t_{bk}	t_{bd}	<i>Tensão de aderência para a barra corrugada (t_{ad}) [16]</i>	t_{bd}/t_{ad}
F15	7,715	7,161	3,331	1,077	3,093
F25	11,289	11,052	5,141	1,603	3,207
F35	13,877	13,694	6,369	2,213	2,878
1PACA	1,57	1,45	0,67		0,80
1PBCA	1,31	1,25	0,58		0,69
1PASA	0,96	0,88	0,41	1,63	0,49
1PBSA	0,85	0,79	0,37		0,44
2PACA	2,43	2,29	1,06		1,26
2PBCA	2,03	1,88	0,88		1,05

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado e discutido um estudo experimental sobre a aderência entre o concreto e varetas de bambu. Com base nesse estudo pôde-se tecer as seguintes considerações:

1 - A gaiola de reação desenvolvida apresentou desempenho satisfatório e a metodologia utilizada nos ensaios mostrou-se adequada, não havendo interferência de deslocamentos parasitas;

2 - O comportamento do diagrama tensão de aderência vs. deslocamento relativo bambu-concreto é semelhante ao diagrama do aço liso-concreto;

3 - A análise de variância mostrou que as dimensões da seção transversal das varetas de bambu não têm influência significativa na tensão de aderência bambu-concreto. Entretanto, verificou-se que, ao se elevar a resistência à compressão do concreto, eleva-se a tensão de aderência bambu-concreto para um nível de confiabilidade de 99%;

4 - A variação da tensão de aderência bambu-concreto em relação à resistência à compressão do concreto é linear;

5 - Em média geral, a tensão de aderência de cálculo entre o bambu e o concreto foi apenas 20% inferior à tensão de aderência entre o aço liso e o concreto. Esse valor indica que é possível a utilização de varetas de bambu em peças de concreto submetidas a esforços de flexão;

6 - Observou-se que para os corpos-de-prova com pinos, o efeito da superposição das parcelas referentes à tensão de aderência mecânica gerada pelos pinos e à tensão de aderência por adesão mais atrito gerada pela superfície das varetas de bambu não é válido;

7 - A tensão de aderência de cálculo do bambu sem pinos é apenas 30% inferior à das barras de aço liso;

8 - A cravação de dois pinos de aço e dois de bambu nas varetas elevou a tensão de aderência em 80% e 50%, respectivamente. Os valores da tensão de aderência de cálculo para estes corpos-de-prova foram superiores a do aço liso em 26% e 5%; e,

9 - Finalmente, observa-se que apesar dos bons resultados observados nos corpos-de-prova com pinos de aço e bambu, a utilização dessa técnica necessita de uma maior investigação, quando de sua aplicação em elementos estruturais de concreto armado. Isto se faz necessário, uma vez que, a introdução dos pinos reduz drasticamente a área da seção transversal resistente das varas de bambu. Assim, considerando uma vara de 2cm x 1cm e furos de 8mm de diâmetro, a capacidade de carga à tração das varas é reduzida em 40%.

LITERATURA CITADA

Argollo Ferrão, A.M e Freire, W.J. “Aderência entre bambu e concreto: teste de arrancamento com taliscas de *Bambusa tuldooides*”. In: 5º Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, Belo Horizonte. Anais...Belo Horizonte: EBRAMEM, v.2, 1995, pp.389-398.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR 5739:1994 - Ensaio de Compressão de Corpos-de-prova Cilíndricos de Concreto: Método de ensaio”. Rio de Janeiro, 1994, p.7.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBRNM248:2003 – Agregados: Determinação da composição granulométrica”. Rio de Janeiro, 2003, p.7.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBRNM52:2003 – Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente”. Rio de Janeiro, 1987, p.7.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBRNM53:2003 – Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”. Rio de Janeiro, 2003, p.7.

Beraldo, A.L. “Bambuceto - o uso do bambu como reforço do concreto”. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 16, 1987, Jundiaí. Anais... Jundiaí, SP: SBEA, v.2, 1987, pp.521-530.

Da Rosa, S. P. A. P. “Análise teórica e experimental de colunas de concreto armado com bambu”. Dissertação de mestrado - Departamento de Engenharia Civil - PUC/Rio, 2002, p.135.

Eurocode. “Design of concrete structures: Part 1: General rules and rules for buildings. London UK, 1992, p.252.

Fib. “Structural concrete - Textbook on behaviour, design and performance - Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code 1990”. Comité Euro-International du Beton, vol. 1, 1999, p.224.

Geymayer, H.G. e Cox, F.B. “Bamboo reinforced concrete”. Journal of the American Concrete Institute, v. 67, n.10, 1970, pp.841-846.

Ghavami, K e Hombeek, 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. Proceedings... São Paulo, v.1, 1981, pp.49-55.

Ghavami, K. “Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams”. Cement and concrete composites, London, n.4, v. 17, 1995, pp. 259-351.

Helene, P. e Terzian, P. “Manual de dosagem e controle do concreto”. Editora PINI, São Paulo, 1995, p.349.

Kurian, N. P. e Kalam, A. K. A. “Bamboo reinforced soil-cement for rural use”. Indian Concrete Journal. n. 51, 1977, pp.382-389.

Leonhardt, F. “Construções de concreto - Princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado”. Editado por Interciência LTDA, v. 1, Rio de Janeiro, 1977, p.305.

Lima Jr, H. C.; Xavier, A. C.; Barbosa, N. P.; Toledo Filho, R. D. “Aderência Bambu-Concreto”. In: II Congresso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora, 1996, Juiz de Fora. v. 1, 1996, pp. 312-323.

Lima Jr., H. C.; Dalcanal, P. R.; Willrich, F. L. e Barbosa, N. P. “Características mecânicas do bambu *Dendrocalamus giganteus*: análise teórica e experimental”. In International conference of sustainable construction into the next millennium: environmentally friendly and innovative cement based materials, João Pessoa, 2000, pp. 394-406.

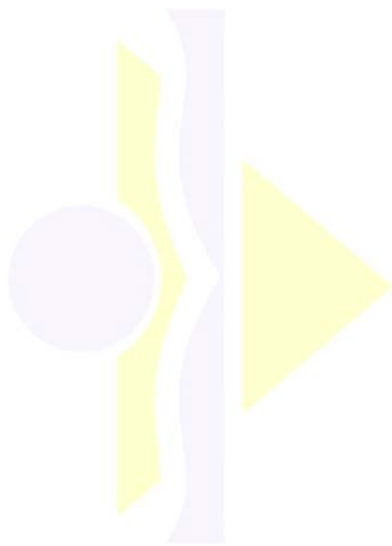
Lopes, W. G. R.; Freire, W. J. e Ferreira, G. C. S. “Ensaio de arrancamento e de empuxamento aplicados a taliscas de bambu”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.3, 2002, pp.504-510.

Macgregor, J.G. “Reinforced concrete, mechanics and design”. Edited by Prentice Hall, United States of America, 1997, p.939.

Montgomery, D. C. “Design and analysis of experiments”. Edited by John Wiley & Sons. New York, 1984, p.704.

Park, R. e Paulay, T. “Reinforced concrete structures”. Edited by John Wiley & Sons, Canada, 1975, p.769.

RILEM-FIP-CEB. “Bond test for reinforcing steel – 2. Pull-Out test. Matériaux et constructions, v.6, n.32, 1973, pp.102-105.



Sebrae
Biblioteca
On Line