

## Metodologia experimental de ensaios de lajes mistas de bambu-concreto sem a presença de aço

### *Experimental methodology of testing of bamboo-concrete composite slabs without presence of steel*

Benedito Teodoro Neto, UEL, [benedito.btn@gmail.com](mailto:benedito.btn@gmail.com)

Felipe Augusto Favaretto Corbacho, UEL, [felipe.corbacho@hotmail.com](mailto:felipe.corbacho@hotmail.com)

Gilberto Carbonari, Doutor, UEL, [carbonar@uel.br](mailto:carbonar@uel.br)

Lucas Augusto Milani Lopes, Mestre, UEL, [lucasmilanilopes@gmail.com](mailto:lucasmilanilopes@gmail.com)

### Resumo

Com o alto gasto energético necessário para extrair os recursos naturais utilizados na construção civil, se faz cada vez mais necessário a busca de materiais sustentáveis com o objetivo de diminuir o impacto ambiental causado por esse setor. O bambu é visto como um material vantajoso em vários quesitos, como resistência mecânica, leveza, e crescimento rápido. Este trabalho tem como finalidade avaliar a viabilidade técnica e executiva de lajes mistas de bambu-concreto. Este inovador sistema, consiste em “vigotas” de bambu, da espécie *Dendrocalamus giganteus*, cortadas a meia-cana, e com placas de EPS que funcionam como elementos de enchimento. O sistema é solidarizado através de concretagem efetuada in loco, de forma análoga ao capeamento de lajes convencionais. A aderência entre o bambu e o concreto é potencializada através do uso de conectores de cisalhamento, também em bambu. No capeamento foi posicionada uma malha de distribuição também em bambu. Desta maneira o sistema dispensa a utilização de aço. No total, foram ensaiadas 6 lajes, sendo 3 com conectores de bambu a cada 5 cm e as outras 3 a cada 10 cm. Os ensaios foram monotônicos até a ruptura, com aplicação de carga em dois pontos, de modo que fosse possível a obtenção de resultados para fins comparativos com normas já existentes. A metodologia se comprovou eficiente e viável. As lajes apresentaram desempenhos satisfatórios, tanto em estado limite último (ELU) como de serviço (ELS), se mostrando um sistema com grande potencial para aplicação estrutural.

**Palavras-chave:** Bambu-concreto; Metodologia experimental; Laje mista; Sem aço

### Abstract

*With the high energy expenditure required to extract the usual elements used in civil construction, the search for sustainable materials is increasingly necessary in order to reduce the environmental impact caused by this sector. The bamboo seen as advantageous in several items such as mechanical strength, and fast growth. The purpose of research is evaluate the technical and executive feasibility of composite bamboo-concrete slabs. This innovative system consists in half-cut bamboo “joists”, of the species *Dendrocalamus giganteus*, interspersed with EPS plates, which function as packed items. The system is solidified through concreting carried out in loco, similar to the conventional slab capping. The adhesion between bamboo and concrete is enhanced through the use of shear connectors, made with bamboo. In the capping is positioned a distribution mesh also in bamboo. Thus, the system eliminates the use of steel. In total, 6 slabs were tested, 3 with bamboo connectors every 5 cm and the other 3 every 10 cm. The tests were monotonic until rupture, with load applied at two points, so that it was possible to obtain results for comparative purposes with existing standards. The methodology proved to be efficient and viable. The slabs presented satisfactory performance, both in ultimate limit state (ELU) and service (ELS), showing a system with great potential for structural application.*

**Keywords:** *Bamboo-concrete; Experimental methodology; Composite slab; No steel*

## 1. Introdução

Com o aumento populacional acelerado que a humanidade vem tendo, chegando a mais de 7,5 bilhões de pessoas habitando o planeta, associado ao acúmulo da população nas áreas urbanas, criam-se demandas que comprimem o sistema produtivo mundial e consequentemente o seu meio ambiente.

Com as cidades cada vez mais populosas, necessita-se de um melhor planejamento na construção de infraestrutura e habitações, pois a medida que a urbanização aumenta, o impacto da construção civil tende a ficar mais elevado. Levando-se em consideração o impacto social, econômico e ambiental dos setores da construção civil, a área tem um papel protagonista para o sucesso de um modelo ideal para a vida na sociedade.

Aprofundando-se nos impactos econômicos e ambientais, a construção civil tem se interessado ainda mais pela criação de novos métodos construtivos pela substituição de materiais presentes em seus processos construtivos atuais. Neste contexto, o bambu se apresenta como uma solução de grande potencial.

O bambu, por se tratar de um material renovável e com consumo de energia reduzido em sua cadeia de produção, cativa interesses sobre sua exploração na construção civil, tendo facilidade de adaptação em solos e climas diversos, crescimento relativamente acelerado e baixo custo de plantio (PEREIRA, 2006; BERALDO e PEREIRA, 2008).

Todas as características citadas não seriam totalmente suficientes se as propriedades mecânicas do bambu não fossem levadas em consideração. Tais propriedades sustentadas pelas relações de resistência mecânica, massa específica e rigidez ultrapassam materiais tradicionais na construção (BERALDO e CARBONARI, 2019), como madeira e o concreto, sendo que algumas espécies de bambu, podem ser comparadas até mesmo com o aço (CARBONARI, 2017).

No Brasil foram elaboradas duas normas técnicas específicas sobre bambu, e que estão em consulta pública - <https://www.abntonline.com.br/consultanacional/> (ABNT NBR 16828-1, 2020, ABNT NBR 16828-2, 2019). Entretanto, lajes mistas de bambu com concreto, que trata o presente trabalho, não estão contempladas nas referidas propostas de normalização. São poucos trabalhos nesse tema, onde se destaca a pesquisa desenvolvida por Ghawami (2005), que ensaiou lajes mistas de bambu com concreto. Posteriormente, nosso grupo de pesquisa reproduziu os mesmos ensaios (ACOSTA e CARBONARI, 2017). Ambos trabalhos concluíram que a seção transversal adotada não proporcionou rigidez e resistência mecânica suficientes para utilização em edificações.

Desta forma, se fez necessário alterar a seção transversal, e incorporar um sistema de ligação entre as meias canas de bambu com o concreto, que estão detalhados nesse trabalho. Essa nova concepção de laje começou a ser utilizado nas pesquisas em 2017 pelo grupo de pesquisa “Bambu UEL” (CARBONARI et al, 2019; ROSSI, 2019), e que está em processo de patente pelo INPI (BR 10 2018 015711 6). Para que se utilize do bambu como material estrutural em edificações é necessário que se garanta a sua durabilidade de longo prazo, especialmente frente ao ataque de insetos. Para isso, o nosso grupo de pesquisa Bambu-UEL conseguiu sucesso utilizando um tratamento natural eficiente, que não agride o meio ambiente, com o tanino (CARBONARI e LIBRELOTTO, 2019). Desde 2013, os colmos tratados com o referido material natural, extraído da casca da árvore acácia negra, não apresentam nenhum ataque dos insetos nas fibras do bambu.

## 2. Materiais e métodos

Os objetos de estudo deste são lajes mistas com vigotas unidirecionais utilizando bambu da espécie *Dendrocalamus giganteus*, concreto, placas de EPS, e conectores de bambu. Foram estudadas um total de 6 lajes, todas com 310 cm de comprimento, 75 cm de largura e uma altura de 20 cm, como pode ser visto na Figura 1.

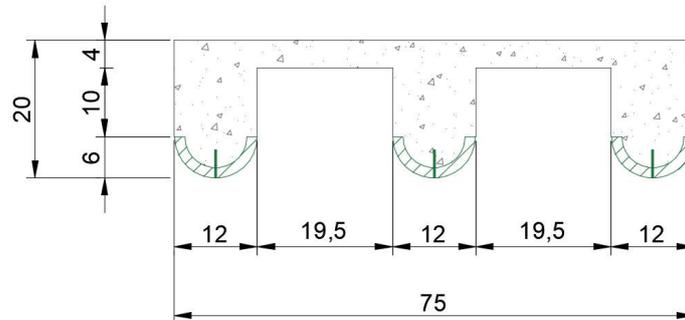


Figura 1: Seção transversal das lajes. Fonte: autores

Vale ressaltar que as medidas referentes aos diâmetros das meias canas são colocadas de forma genérica, pois, se tratando de um vegetal, os colmos de bambu sofrem alterações naturais de crescimento nas suas medidas de um colmo para outro. No total, foram ensaiadas 6 lajes, sendo 3 delas com conectores de bambu com 4 cm de comprimento e espaçamentos a cada 5 cm, e as outras 3 lajes com conectores também com 4 cm de comprimento, mas com espaçamentos a cada 10 cm.

### 2.1.Extração, seleção e medição dos colmos de bambu

Os colmos escolhidos para o corte foram marcados com um código de controle, para identificação perante os demais colmos. Como observado na Figura 2(a), os colmos foram cortados próximo a um de seus nós, sendo feita uma depressão em formato de V para facilitar o escoamento de água, preservando a moita contra um possível apodrecimento daquela região e permitindo o desenvolvimento de novos brotos de bambu.

Após a retirada da moita do bambuzal (Figura 2-a), os colmos foram cortados em segmentos de 330 cm de comprimento, e transportados até o Laboratório de Estruturas da UEL. Na sequência, iniciou-se o processo de preparação das meias-canais, efetuando corte longitudinal dos referidos segmentos de colmo com o auxílio de uma serra de mesa, observado na Figura 2(b). Com isso, foi padronizando o corte do setor semicircular (meias-canais) com uma altura fixa de 6 cm, independente dos diâmetros dos colmos, evitando com isso a diferença de altura entre as meias-canais, como observado em trabalhos anteriores.

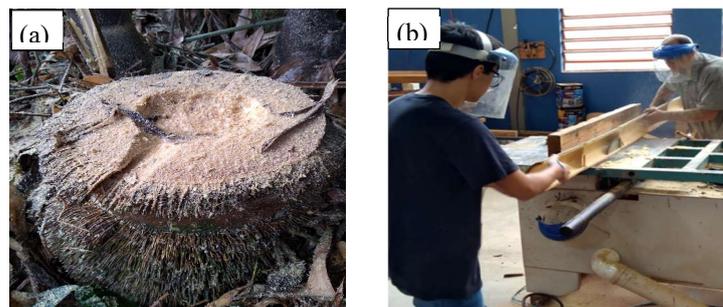


Figura 1 – Extração e corte dos colmos de bambu. Fonte: autores

Após aproximadamente 3 dias do corte, foi aplicado o inseticida/cupimcida JimoCupim®. Posteriormente à aplicação do referido produto, as meias-canãs foram espalhadas e mantidas no laboratório por dois dias, com o ambiente fechado. Tal procedimento foi repetido 15 dias após a primeira aplicação.

## 2.2. Preparação das meias-canãs e malhas de bambu

As dezesseis meias-canãs selecionadas na etapa anterior foram identificadas em trios, marcadas e perfuradas de acordo com os pontos onde seriam fixados os conectores. O diâmetro e altura dos conectores foram fixados em 5 mm e 4 cm, respectivamente, assim como a profundidade que adentram à parede interna do bambu, fixada em 7 mm. Torna-se importante ressaltar que nas extremidades das meias-canãs, a distância entre o fim da meia-canã e o primeiro conector deve ser igual à metade do espaçamento normal daquela respectiva meia-canã, com objetivo de manter as propriedades mecânicas uniformes entre os conectores e concreto. Os dois tipos de espaçamento entre os conectores foram de 5 cm e 10 cm.

A malha de bambu da espécie da espécie *Dendrocalamus giganteus* foi composta por filetes retirados no mesmo dia do corte e regularização do raio das meias-canãs, sendo esses filetes a parte excedente das meias-canãs, visando sempre obter maior aproveitamento de todo o colmo de bambu que foi usada no processo deste trabalho.

As malhas também foram regularizadas para terem uma espessura máxima padrão de 1 cm, variando nas direções transversal e longitudinal de acordo com a forma natural de cada colmo utilizado. As mesmas foram separadas e tratadas com o mesmo inseticida/cupimcida utilizado nas meias-canãs; a ligação dos filetes foi feita através da amarração com barbante de sisal, composto natural sustentável. A distância entre os filetes foi estipulada em 15 cm, formando uma malha de 15 x 15 cm, como mostra a Figura 3.



Figura 3 - Malha de filetes de bambu, amarradas com barbante de sisal. Fonte: Autores

## 3. Montagem e concretagem das lajes

Começando pela montagem das formas, para limitar as medidas da laje e também para auxiliar no nivelamento correto, as formas foram posicionadas e pregadas para que o espaço interno de menor lado tivesse 75 cm de largura, largura máxima do pórtico de ensaio do laboratório. E o maior lado interno com 310 cm na direção longitudinal as meias-canãs.

Foram posicionadas então em uma sequência construtiva, quatro caibros distanciados aproximadamente de forma semelhante entre si; sobre eles as formas, posicionou-se então no interior da forma, os calços e as meias-canas sobre os calços. Em seguida foram posicionadas as placas de EPS nos vãos das meias-canas, sendo que cada placa de EPS possui as dimensões de 60 cm de comprimento, 20 cm de largura e 10 cm de altura. Com os itens principais da laje posicionados, os travamentos laterais e superiores foram feitos através de caibros longitudinais e transversais, respectivamente. As Figura 4(a) e Figura 4(b) mostram os detalhes da montagem das lajes antes da concretagem.

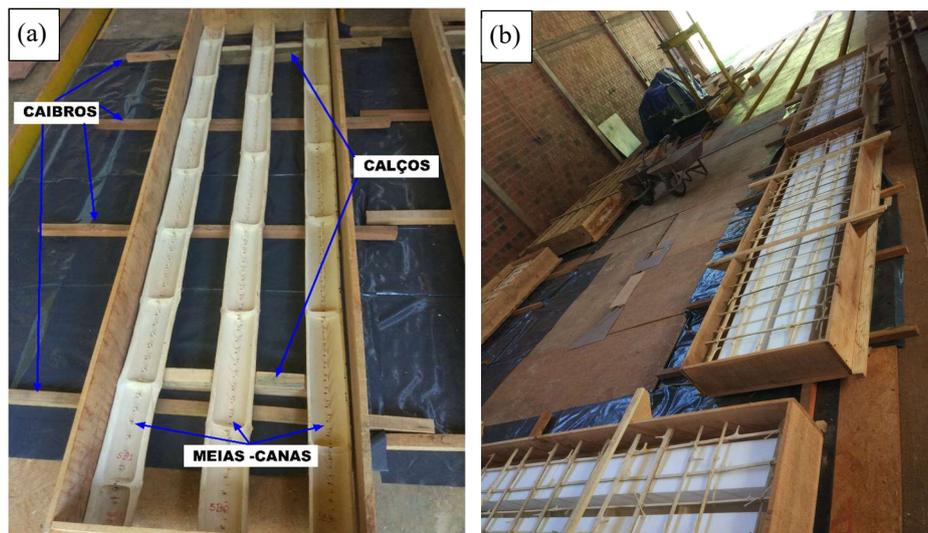


Figura 4 – Montagem das lajes antes da concretagem. Fonte: autores

Com a montagem pronta, procedeu-se então a concretagem das lajes. As características do concreto foram: concreto usinado com  $f_{ck} = 30$  MPa, slump test com mínimo de 120 mm. As lajes foram concretadas todas no mesmo dia, mostrando que a logística adotada na posição das lajes foi eficaz, visando rapidez e facilidade. Foi observado a eficiência da vedação entre forma e meia-cana através da fita adesiva do tipo kraft, com uma estanqueidade satisfatória. A Figuras 5(a) e 5(b) ilustram as lajes concretadas.

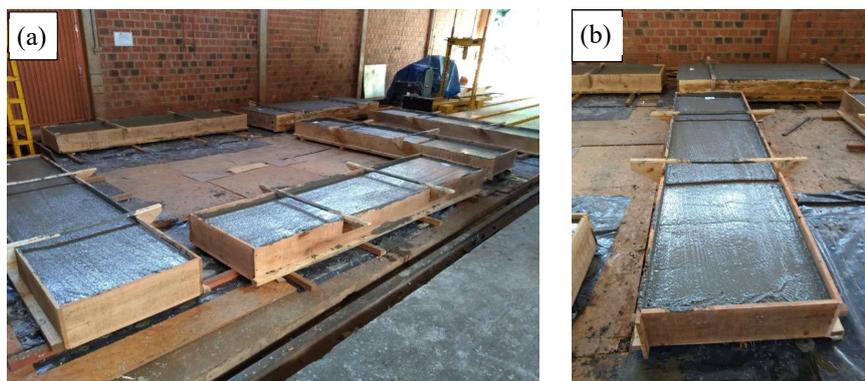


Figura 5 - Lajes recém concretadas. Fonte: autores

Foram moldados nove corpos de prova, com molde de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, para ensaio de resistência à compressão, seguindo NBR 5738. Três foram rompidos com 7 dias, outros três foram rompidos com 14 dias, e os últimos três aos 28 dias, véspera

do ensaio a flexão. Os corpos de prova, após 24 h de sua moldagem, foram imersos em tanque de cura, de acordo com NBR 5738.

Desta forma, as seções transversais das lajes ensaiadas apresentam a seção transversal, com todos os seus componentes, indicada na Figura 6.

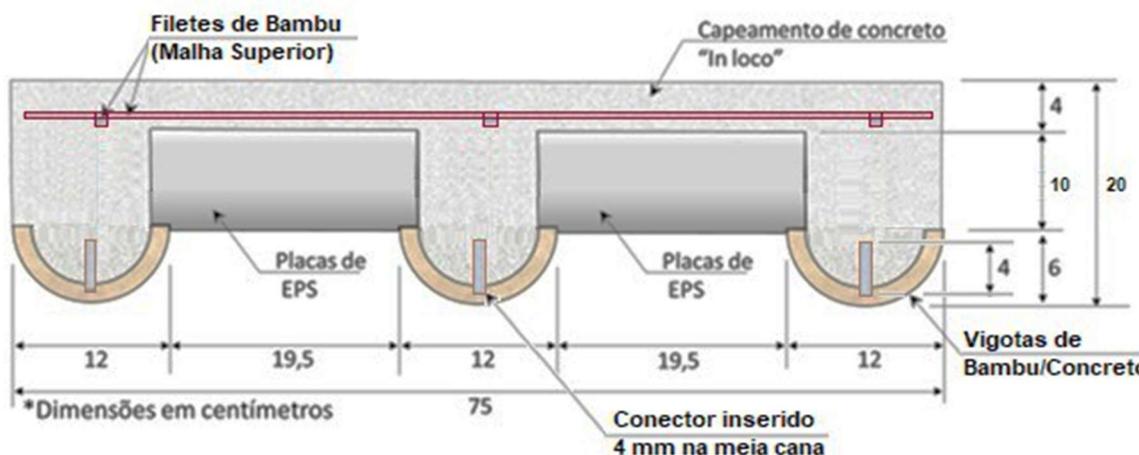


Figura 6 - Seção transversal com todos os componentes. Fonte: autores

#### 4. Procedimento de ensaio à flexão das lajes mistas bambu-concreto

O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente nas lajes, por meio de uma célula de carga, onde são registrados os valores da carga aplicada e os deslocamentos, até a sua ruptura. O método de ensaio de quatro pontos, utilizado neste trabalho, consiste em duas cargas concentradas aplicadas com distâncias iguais dos apoios, de 1 m, como ilustrado na Figura 7.

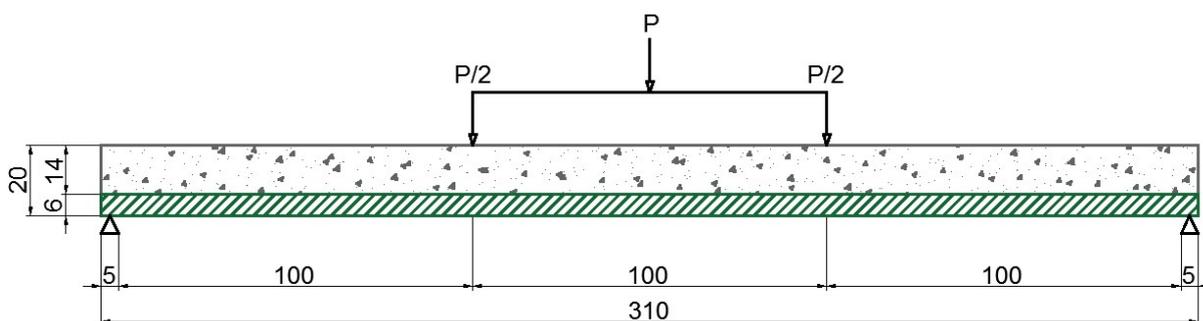


Figura 7 - Modelo de ensaio de flexão em quatro pontos. Fonte: autores

Para a medição dos deslocamentos durante a aplicação da carga foram utilizados três transdutores de deslocamento (LVDT). Além destes, foram posicionados dois relógios comparadores (RC), para comparação em vídeo da sincronia de deslocamentos na laje. Os três LVDTs eram da marca "KYOWA", sendo dois deles do modelo "DT-50A" caracterizado por possuir amplitude máxima de medição igual a 50 mm, os mesmos foram posicionados um em cada extremidade da laje. Já o terceiro LVDT, este do modelo "DT-100A" caracterizado por possuir capacidade máxima de medição igual a 100 mm, foi posicionado no centro da laje, pois é o ponto da estrutura em que ocorreria o maior deslocamento vertical garantindo a medição caso o deslocamento ultrapassasse o valor de 5

cm. A figura 8a mostra a posição dos LVDTs e relógios comparadores Figura 8a, juntamente com a visão geral Figura 8b do sistema para ensaio pronto.

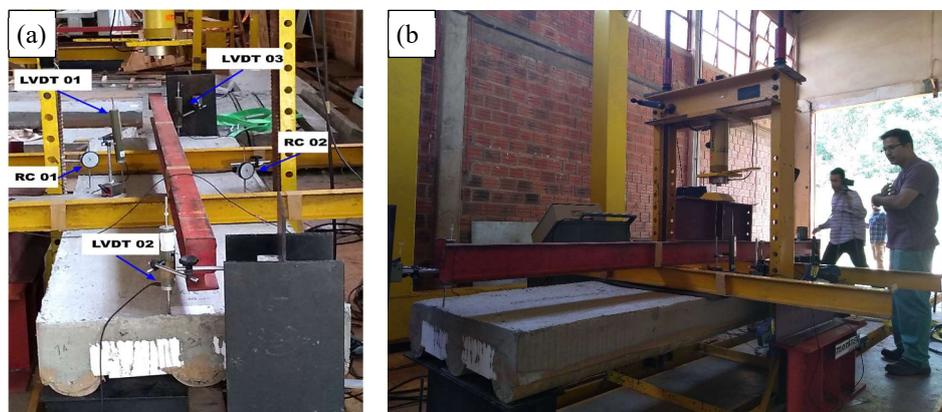


Figura 8 - Posicionamento dos LVDT's e relógios comparadores(a) e visão geral(b). Fonte: autores

## 5. Análise dos gráficos carga x deslocamentos medidos dos ensaios das lajes

As curvas obtidas para cada uma das lajes podem ser melhor interpretadas e analisadas em três partes. No Gráfico 1 são apresentadas cada uma das três fases do gráfico típico medido da carga x deslocamento das lajes ensaiadas.

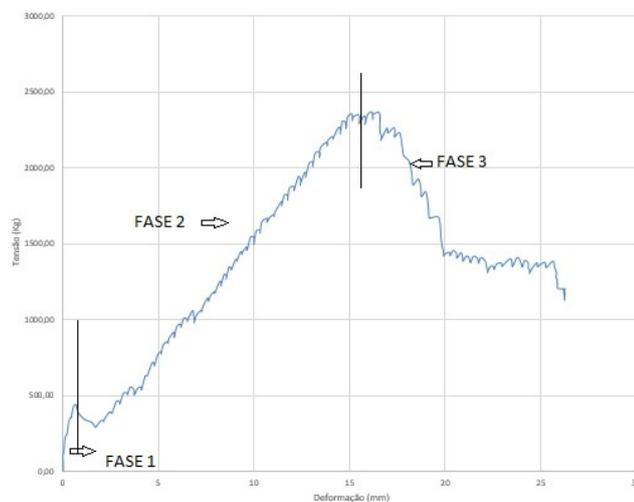


Gráfico 1 - Fases da curva Carga x Deslocamento típica das lajes. Fonte: autores

Na primeira parte da curva, têm-se a chamada Fase 1, conforme a Lei de Hooke. Na segunda parte tem-se a chamada Fase 2, que também é linear e é iniciada após os conectores de bambu se deslocarem dentro da estrutura; tais conectores se deslocam, porém ainda continuam mantendo sua função. Na terceira parte da curva, chamada Fase 3, ocorre após o rompimento da estrutura, podendo-se observar que os conectores já não possuem mais contato com a parte de concreto da estrutura, perdendo totalmente sua função.

Na Figura 9 é apresentado o comportamento dos conectores de bambu em cada uma das Fases citadas acima, ficando evidente a variação da posição dos conectores.

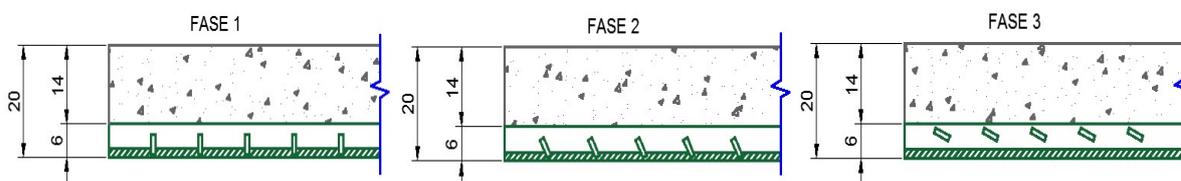


Figura 9 - Posicionamento dos conectores em cada uma das fases. Fonte: autores

## 6. Resultados e discussões

Todas lajes tiveram rupturas semelhantes, obedecendo um padrão dos mesmos mecanismos, ou seja, ocorrendo a falha nos conectores que fazem ligações dos colmos de bambu com o concreto, deslocamento relativo entre a parede do bambu e o concreto e aparição de rachaduras verticais na área próximas aos pontos de aplicação da carga.

Como as patologias foram semelhantes em todas as lajes, a Figura 2 mostra o posicionamento e ilustração das fissuras apresentadas por uma das lajes ensaiadas, no caso, a laje 5.

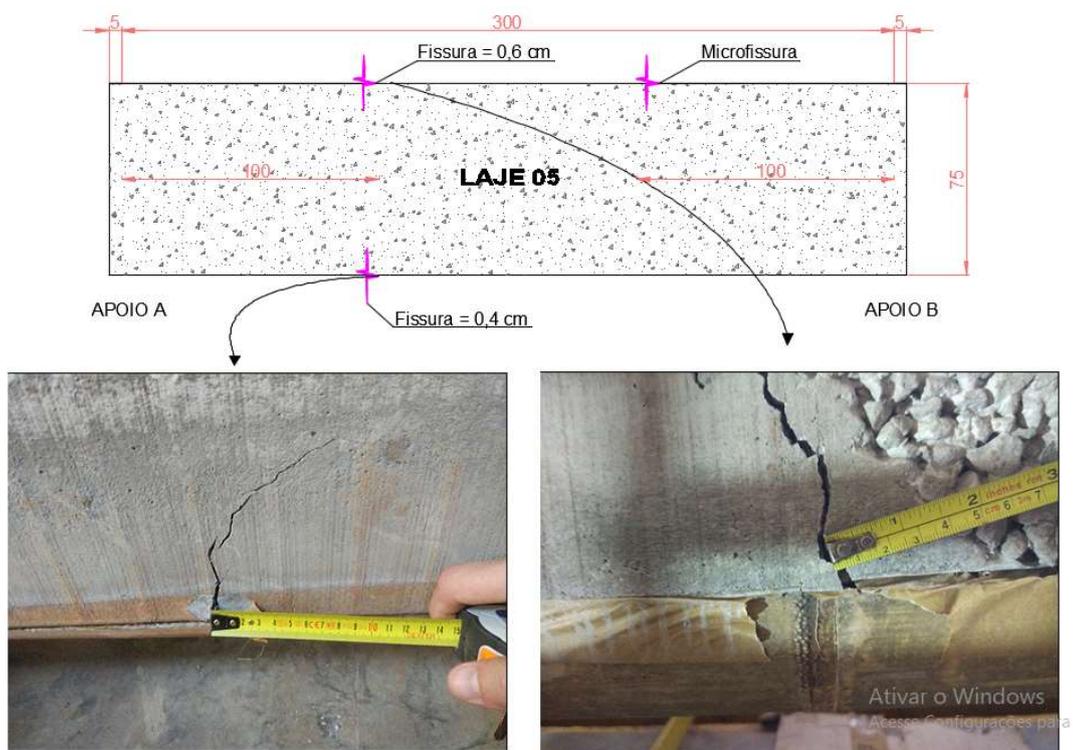


Figura 2 - Posicionamento e ilustração das fissuras da laje 05. Fonte: autores

Na

Figura 3 é possível observar o deslocamento relativo entre a meia-cana de bambu e a parte de concreto.



Figura 3 - Ilustração do deslocamento relativo da laje 05. Fonte: autores

As curvas carga x deslocamento apresentados no Gráfico 2 mostram os valores medidos nas seis lajes ensaiadas, onde em uma análise mais detalhada pode se observar o comportamento das curvas passando pelas fases 1, 2 e 3 já citadas anteriormente.

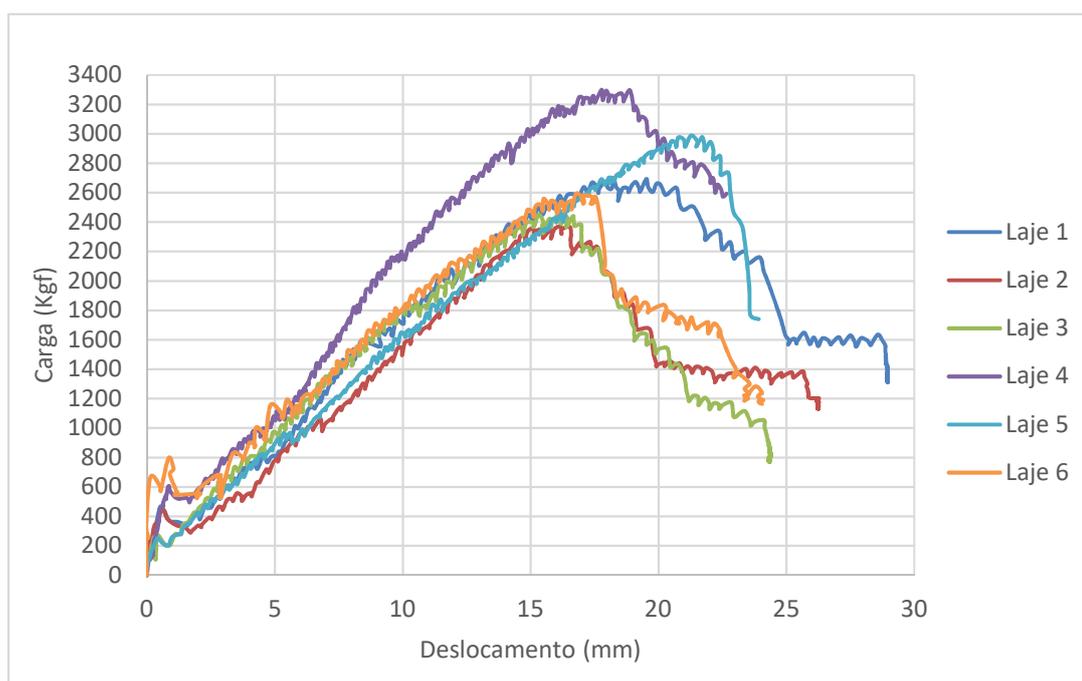


Gráfico 2 - Curvas Carga x Deslocamento de todas as lajes até a ruptura. Fonte: autores

Quando se analisa as curvas do ensaio de todas as lajes, percebe-se que as três fases de comportamento mecânico são claramente bem distintas. Afim de melhor esclarecer o comportamento desse mecanismo, para uma dessas fases, a Figura 12 ilustra com fotos reais do ensaio o comportamento dos conectores durante as fases.

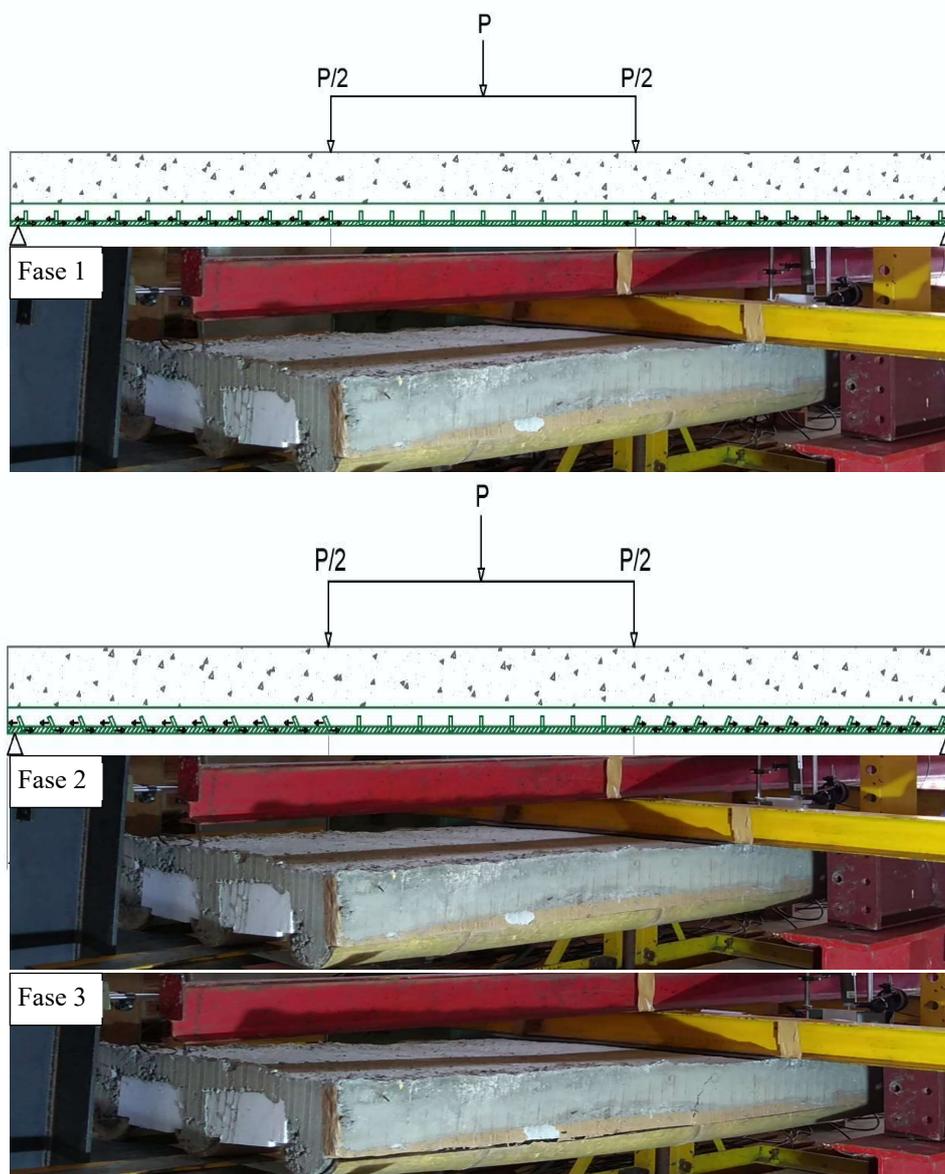


Figura 4 - Ilustração e fotos das fases 1, 2 e 3. Fonte: autores

Vale ressaltar que todas as lajes mostraram comportamento semelhante ao das imagens ilustradas na Figura 12. Nota-se que na parte central da laje não há o deslocamento entre a interface bambu-concreto, porque nessa região o esforço cortante interno entre os dois pontos de carga é nulo, não havendo tensões de cisalhamento nas seções transversais da laje.

Em teoria, com o objetivo de projeto em laboratório, a colocação de conectores naquela região não se faria necessário, mas sabe-se que na prática o uso de lajes com esse sistema também sofrerá cargas distribuídas, assim se faz necessário a colocação dos conectores de forma uniforme por todas as meias canas.

Quando se analisa os processos de rompimento de todas as lajes, podem ser observadas algumas características de forma notória, como os ruídos oriundos da ruptura do bambu. Tal característica pode ser percebida através dos gráficos entre carga e deslocamento, onde há oscilações negativas nas curvas revelando o deslocamento dos conectores dentro da

estrutura, que mesmo após esses deslocamentos conseguem manter sua função. Isso ressalta a alta ductibilidade da estrutura.

Mesmo com as diferenças entre suas capacidades de cargas máximas até a ruptura, todas as lajes sofreram um comportamento considerado dúctil até o fim do carregamento, não sofrendo nenhuma ruptura brusca, ou seja, se mostrando adequado para aplicação estrutural.

## 7. Conclusões

Pela proximidade das curvas carga x deslocamento das seis lajes ensaiadas, torna-se possível concluir que a metodologia e materiais adotados neste trabalho foram adequados.

As cargas últimas e as rigidezes medidas nos ensaios permitem considerar que as lajes podem ser utilizadas como elementos estruturais de edificações.

É fundamental para ter resultados muito próximos entre as lajes que a altura das meias-canas seja fixada num único valor, independentemente dos diâmetros externos que tiverem.

Além disso, observa-se pelo longo trecho da Fase 2 das curvas carga x deslocamento que os conectores de bambu conseguem atender a ligação entre as meias-canas de bambu e o concreto, independentemente do espaçamento adotado (5 cm e 10 cm).

As lajes com espaçamento de 5 cm entre conectores apresentaram um comportamento mecânico superior aos das lajes com espaçamento de 10 cm, como era de se esperar.

No entanto, ainda é necessária uma quantidade maior de ensaios e experimentos para comprovar a sua aplicação estrutural, para atender as condições de ELS e ELU, inclusive frente as deformações de longa duração (retração e fluência).

## Agradecimentos

Aos técnicos dos Laboratórios do CTU pela colaboração na execução da metodologia, e ao Curso de Especialização em Engenharia de Estruturas-CTU-EUL pelo apoio financeiro.

## Referências

ACOSTA, C.; CARBONARI, G. Laje mista de bambu-concreto leve: Estudo teórico e experimental. In: V Encontro de Sustentabilidade em Projeto, 2017, Florianópolis. ENSUS 2017. Florianópolis: UFSC, 2017. v. 1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16828-1: **Estruturas de bambu - Parte 1: Projeto**. Em consulta pública. Rio de Janeiro, 2020. 31p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16828-2: **Estruturas de bambu – Parte 2: Determinação das propriedades físicas e mecânicas do bambu**. Em consulta pública. Rio de Janeiro, 2019. 17p.

BERALDO, A. L.; PEREIRA, M. A. R. **Bambu de corpo e alma**. Bauru: Canal6, 2008. 240p.

BERALDO, A.L.; CARBONARI, G.. **Capítulo 3 - Propriedades anatômicas, físicas, químicas e mecânicas do bambu e ensaios para sua determinação.** In: Fabiano Ostapiv; Lisiane Ilha Librelotto.. (Org.). Bambu: Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 1ed.Florianópolis: UFSC, 2019, v. 1, p. 1-204.

CARBONARI, G.; LIBRELOTTO, L. I. **Capítulo 6 - Tratamento e preservação dos colmos.** In: Fabiano Ostapiv; Lisiane Ilha Librelotto. (Org.). Bambu: Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável no Brasil. 1ed.Florianópolis: UFSC, 2019, v. 1, p. 1-204.

CARBONARI, G.; LOPES, L.A. M.; ROSSI, G.B.; PIEDADE, G.H.; LEITE, F.C.M.; ACOSTA, C.. **Lajes mistas de bambu-concreto pré-fabricadas com zero aço: são viáveis tecnicamente?** In: VII Encontro de Sustentabilidade em Projeto, ENSUS 2019. Florianópolis: UFSC.

CARBONARI, G., et al. Bambu: O aço vegetal. *Mix Sustentável*, Londrina, v. 3, n. 1, p. 17-25, 2017.

GHAVAMI, K. Bamboo as reinforcement in structural concrete elements. *Cement Concrete, Cement & Concrete Composites* 27 (2005) 637–649.

PEREIRA, M. A. Projeto Bambu: manejo e produção do bambu gigante (*Dendrocalamus giganteus*) cultivado na Unesp-Bauru e determinação de suas características físicas e de resistência mecânica. Relatório Fapesp (2003/14323-7), Bauru. 2006.

ROSSI, G. B.. Procedimento de ensaio de lajes pré-moldadas mistas de bambu-concreto, com conectores e placas de EPS. 2019. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Estruturas) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2019.