

Resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu: Influência da pressão de colagem

Shear strength of bamboo-bamboo connection: gluing pressure Influence

Edgar Vladimiro Mantilla Carrasco¹, Mônica Azevedo Smits²,
Judy Norka Rodo Mantilla³

¹ Escola de Arquitetura – TAU/UFMG, Belo Horizonte, MG. mantilla@dees.ufmg.br

² Escola de Engenharia – DEES/UFMG, Belo horizonte, MG. azevedosmits@gmail.com

³ Faculdade de Engenharia e Arquitetura – Universidade FUMEC, Belo Horizonte, MG. judy.mantilla@fumec.br

RESUMO

Os objetivos deste trabalho são determinar a pressão de colagem e a influência da superfície na eficiência da ligação colada de bambu-bambu. A pressão de colagem foi definida em 7 tratamentos de zero, 2,5, 3,75, 5, 6,25, 7,50 e 8,75MPa. Para isso foram confeccionados corpos de prova composto de laminas de bambu, *Philostachys pubens*, com adesivo bi componente resorcinol formoldeído. As características mecânicas de maior influência na ligação adesiva bambu-bambu são a resistência ao cisalhamento e o módulo de deslizamento ou coeficiente de deslizamento. Estas características são influenciadas pela pressão e pela superfície de colagem. Para análise da influência da superfície de colagem foram confeccionados corpos de prova com três tratamentos casca-miolo, casca-casca e miolo-miolo. A resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu apresentou melhor comportamento com a pressão de 2,5MPa. A combinação de superfície de colagem não influencia na resistência da ligação; assim é possível utilizar qualquer combinação.

Palavras-chave: bambu, adesivo, pressão, ligação, superfície de colagem.

ABSTRACT

The objective of this work is to determine the bonding pressure and the influence of the surface on the efficiency of the bamboo-bamboo bonding. The sizing pressure was defined as 7 treatments of zero, 2.5, 3.75, 5, 6.25, 7.50 and 8.75MPa. For this, test specimens composed of bamboo slides, *Philostachys pubens*, with bi-component resorcinol formaldehyde adhesive were made. The mechanical characteristics of greatest influence on adhesive bonding are shear strength and slip modulus. These characteristics are influenced by the pressure and the bonding surface. In the determination of the influence of the bonding surface, specimens were prepared with three treatments: shell-core, shell-shell and core-core. The shear strength of the bamboo-bamboo bond showed better behavior at 2.5MPa pressure. The combination of sizing surface does not influence the bond strength; so any combination can be used.

Keywords: bamboo, adhesive, pressure, connection, bonding surface.

1. INTRODUÇÃO

O emprego do bambu na fabricação de elementos estruturais a serem utilizados na construção civil só foi possível com o surgimento de colas de alta resistência, onde o sistema laminado-colado começou o seu grande progresso.

Laminação por definição são pequenos pedaços de bambu colados entre si, formando um único elemento com função estrutural. O Bambu Laminado Colado (BLC), é um produto engenheirado, composto de bambu com adesivo. A sua utilização depende diretamente do tipo de adesivo utilizado. As lâminas produzidas na sua confecção são tratadas, unidas e coladas com resinas sob temperatura e pressão específica. A aplicação de pressão produzirá enchimento dos poros e deslocamento de ar da interface do aderente (penetração). Essa pressão também é necessária para se obter uma linha adesiva fina e resistente.

LIMA e DIAS [1], investigaram o BLC, confeccionado com dois tipos de adesivos, Cascophen e Cascorez, prensados a frio com pressão de colagem de 6,2MPa. As tensões de ruptura do material, colado com adesivo Cascophen, apresentaram-se superiores às do material colado com adesivo Cascorez.

Já [2], avaliou o BLC, também utilizando dois tipos de adesivos comerciais, indicados para prensagem a frio e pressão de colagem de 2MPa. Observaram que o BLC feito com resorcinol-formaldeído se mostrou mais estável dimensionalmente do que o feito com ureia-formaldeído.

Para a fabricação do BLC, no trabalho de PAES et al. [3], também foram utilizados dois adesivos, PVA e resorcinol-formol, com pressão de colagem de 2,18MPa. O adesivo à base de resorcinol-formol proporcionou ao BLC maior resistência à umidade, quando comparado àquele à base de acetato polivinílico.

Não foi surpresa o resultado obtido por [1], como também por [2], tendo em vista que o adesivo Cascophen, uma resina resorcinol, tem aderência química e mecânica por aproximação. Já o adesivo Cascorez tem apenas aderência mecânica. Dessa forma, para o Cascophen os resultados apresentados da resistência ao cisalhamento foram maiores, independentemente da pressão aplicada.

A utilização de adesivo numa ligação apresenta várias vantagens sobre outros tipos de ligações, tais como: possibilita a distribuição de esforços em áreas mais amplas, viabiliza ligações mais leves, a linha adesiva funciona como barreira contra a umidade, permite unir materiais diferentes e viabiliza uma execução rápida e econômica. Na formação das ligações adesivas, a natureza do material determina a seleção do adesivo e a forma da sua execução. A escolha do adesivo mais compatível, de maior resistência mecânica e mais fácil de trabalhar é fundamental para a qualidade da ligação bambu-bambu. A principal diferença dessa junção para as restantes é o uso do bambu como o único material além da cola [1].

Segundo [4], conhecer as propriedades dos adesivos é muito importante para sua aplicação. Na avaliação do adesivo, devem ser considerados fatores desde sua elaboração até sua cura. Dentre estes fatores os mais importantes são: adesão, tipo de armazenamento, vida útil após sua preparação, tempo de cura e penetração. Hoje, a adesividade se baseia nas forças de ligação ao nível molecular entre as macromoléculas dos adesivos e dos aderentes. A força de adesão é devida as ligações químicas primárias (interatômicas) e secundárias (inter moleculares). As forças originadas pelas ligações primárias são de natureza eletrônica (ligação entre átomos e íons). As ligações atrativas secundárias são de natureza eletrostática ou magnética, associam as moléculas entre si de maneira razoavelmente forte, mas não o suficiente para formar uma nova cadeia química, uma molécula. As ligações secundárias mais significativas para resistência da ligação são as forças de polarização e as pontes de hidrogênio. Deve ser considerado o aspecto de reciprocidade do conjunto adesivo-aderente. De modo geral pode-se dizer que os adesivos preparados com polímeros naturais, de origem animal e vegetal, (amido, soja, goma-resina, caseína, celulose e derivados, alguns polímeros sintéticos, etc.) são fortemente polares. Em oposição situam-se os produtos não polares: borracha, elastômeros e certos adesivos sintéticos. No ramo de adesivos industriais modernos há grupos de resina e polímeros possuindo polaridades intermediárias. Pode-se mencionar de maneira especial os adesivos baseados em resinas de ureia e melanina, fenol e resorcinol, polímeros vinílicos, polímeros acrílicos. Quanto aos materiais aderentes, os mais polares são as madeiras e seus derivados, papel, papelão e a maior parte dos tecidos, principalmente por causa da estrutura da celulose. Para que essas forças possam agir adequadamente, tendo em vista alcançar o melhor resultado na ligação, é necessário considerar todos os fatores, quer da superfície do aderente, quer das características e da técnica de aplicação do adesivo. Entre estes fatores pode ser citado: a compatibilidade do adesivo com o aderente, viscosidade apropriada, acabamento e limpeza da superfície do aderente, técnica adequada na aplicação do adesivo considerando a espessura da película, tempo de espera, tempo de secagem. As forças básicas da adesão química são devidas às ligações primárias. A utilização dos adesivos químicos reativos promotores de adesão só é justificável quando os adesivos convencionais não produzem adesão suficiente, pois seu alto custo, fraca estabilidade no armazenamento, vida breve e grande seletividade em relação ao aderente, os tornam inviáveis. Esta reação química, entretanto, reforça significativamente a força de adesão promovendo uma ligação muito mais resistente e durável.

Os avanços tecnológicos ocorridos no final do século XX englobando os processos produtivos, a redução dimensional dos componentes e o surgimento de novos materiais vêm contribuindo para uma maior versatilidade de matérias-primas na manufatura de produtos industrializados. Dessa forma, o uso de substâncias adesivas com a finalidade de unir elementos de madeira (no caso da pesquisa, o bambu) promove a obtenção de peças com dimensões maiores, para vencer grandes vãos, e com a possibilidade de executar formatos retos e curvos, superiores a aquelas obtidas diretamente do vegetal [3].

Com a formulação dos adesivos sintéticos, conseguiu-se aperfeiçoar a indústria dos compensados de materiais orgânicos, tanto para estrutura quanto para acabamentos. Produtos fabricados com material inadequado comprometem a resistência e a aparência das peças comercializadas. O adesivo estrutural corresponde

ao item de maior custo na fabricação da peça laminada colada, [5].

Foi comprovado pelos pesquisadores mencionados que independente da espécie de bambu investigada, a aplicação de adesivos na superfície do laminado melhora consideravelmente sua estabilidade dimensional, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e o módulo de ruptura. Entretanto, para que o adesivo produza uma ligação resistente, deve-se analisar seu comportamento junto ao aderente. Através do preparo e uniformidade das lâminas, e aplicação de adesivo, no caso do BLC, é possível resultar em um material promissor voltado para a engenharia, tendo possibilidades de ter alta resistência mecânica.

É essencial para o sucesso da implementação da tecnologia o controle sistêmico de toda a cadeia de produção do BLC. Isso inclui desde o controle da umidade à uniformização das ripas do bambu, assim como criar os parâmetros de prensagem, de secagem, investigação da melhor superfície e definição do uso do adesivo mais apropriado para o objetivo em questão. A qualidade da colagem é fundamental para se obter um produto com elevado desempenho estrutural, para isso é necessário o estudo da pressão de colagem e a superfície a ser colada.

O bambu tem se apresentado cada vez mais promissor como um material na engenharia, com elevadas propriedades mecânicas, qualidades apropriadas para materiais processados. O BLC representa o uso eficiente do material, onde ele é projetado para ser mais resistente e possibilitando dimensões maiores que as do colmo de bambu. Assim, o objetivo deste trabalho é determinar a pressão de colagem e a influência da superfície (casca-miolo, casca-casca, miolo-miolo) na eficiência da ligação colada de bambu-bambu. Isto é, para se obter maior resistência ao cisalhamento e módulo de deslizamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Bambu

O bambu utilizado foi o Mosso da espécie *Phyllostachys pubescens*. É uma gramínea pertencente à família Poaceae, subfamília Bambusoideae com mais de 1.250 espécies e 75 gêneros [6]. Foi utilizada a parte do meio do colmo do bambu, de 3 a 4 anos de idade, com três metros de comprimento, colhidas e tratadas na cidade de São Paulo, Brasil. O diâmetro externo do colmo do bambu variou de 12 a 14 cm, com a espessura da parede de 0,7 a 1,0 cm e com a média de espaçamento entre nós de 35 cm.

Para a confecção dos corpos de prova, foram utilizados 7 colmos de diferentes bambus da mesma espécie, sendo o sétimo como reserva, foram retirados conjuntos de amostras da parede de bambu para todos os experimentos.

2.2 Adesivo

O adesivo utilizado foi o resorcinol formoldeído, conhecido comercialmente como CASCOPHEN. Ele é aplicado como material ligante, passa do estado líquido para o sólido e às vezes reage com a celulose do bambu, formando um só elemento. O CASCOPHEN RS-216-M é uma resina sintética à base de resorcinol-formol, apropriado para confecção de chapas de compensado, madeira laminada colada e estruturas. O adesivo se mostra muito eficiente ao cisalhamento, à tração e é a prova de água. Ele é utilizado com o endurecedor FM-60-M. A espessura na linha adesiva e a pressão determinam a máxima resistência e a rigidez na junta adesiva. A linha adesiva deve ser a mais fina possível, sem faltar adesivo na ligação. A consistência do adesivo deve ser adequada para ser derramada no aderente com espessura desejada. O adesivo foi aplicado nas duas superfícies das laminas de bambu a serem colados. Para uma boa colagem, a umidade do bambu deve estar de 8 % a 12%. O adesivo deve ser preparado numa razão de mistura resina/pó endurecedor de 5:1, e o tempo para cura é de 24 horas.

2.3 Corpos de prova

Os corpos de prova (CPs) utilizados para determinação das características mecânicas seguiram as prescrições das normas [9, 10, 11] e os rigorosos padrões dos requisitos e procedimentos dos laboratórios do Centro de Pesquisa Avançado da Madeira, Móveis e Novos Materiais (CPAM³).

Foram montados sete conjuntos de 18 CPs, compostos de três combinações diferentes: miolo com miolo (MM), miolo com casca (MC) e casca com casca (CC), totalizando 126 CPs, Figura 1. Os CPs foram dimensionados em função da espessura máxima da parede do bambu. Eles estavam compostos por quatro lâminas de bambu com 5 mm de espessura por 25 mm de comprimento e 25 mm de largura, coladas entre si, Figura 1.

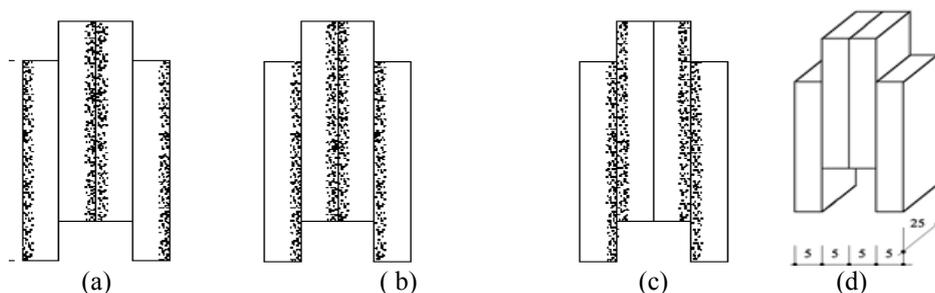


Figura 1: Combinação dos CPs: (a) MM; (b) MC; (c) CC e (d) Esquema do conjunto.

Para preparação dos CPs, primeiramente o colmo do bambu foi dividido em tiras e em seguida, cortado em pedaços para que fosse desengrossado e transformado em lâminas padronizadas, como mostra a sequência na Figura 2.

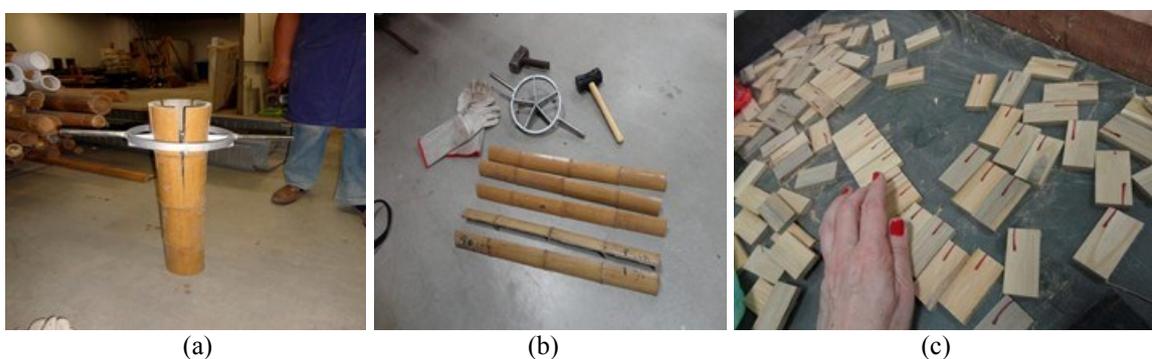


Figura 2: (a) Desdobramento do colmo; (b) Tiras e (c) Lâminas de bambu.

Com a finalidade de se obter a pressão ótima foram preparados CPs com a aplicação das seguintes pressões, em MPa: zero (sem pressão), 2,5, 3,75, 5, 6,25, 7,50 e 8,75.

Os CPs retirados do colmo do bambu foram denominados como MM_i, MC_i e CC_i, sendo $i = 1$ até 7. Para colagem dos CPs e aplicação de pressão os CPs foram colocados em cantoneiras para evitar a flambagem do conjunto, na direção axial da montagem. Foram utilizados pedaços de madeira como gabarito para garantir o correto posicionamento dos CPs, quando submetidos à prensagem. Para a pressão, foi adaptada uma prensa hidráulica em um pórtico metálico. A fixação do conjunto foi feita com braçadeiras plásticas durante um período de 24 h, até sua retirada do sistema, a sequência está mostrada na Figura 3



Figura 3: Sequência de montagem dos CPs: (a) Preparo das cantoneiras para receber os CPs; (b) Uso de madeira como gabarito na montagem; (c) CPs nas cantoneiras e (d) CPs posicionados no sistema de prensagem.

2.4 Método

Os ensaios foram realizados nas instalações do Laboratório de Análise Experimental de Estruturas (LAEES) e o CPAM³ da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Para realização dos ensaios, foi utilizada uma célula de carga de 50 kN, calibrada até 30 kN, um medidor de deslocamento com sensibilidade de 0,001 mm, conectados ao sistema de aquisição de dados (SAD) da máquina universal da marca EMIC. Na Figura 4, é mostrada a configuração de ensaio. O CP posicionado na máquina universal, o medidor de deslocamento e a rótula universal para evitar a introdução de qualquer esforço indesejado.

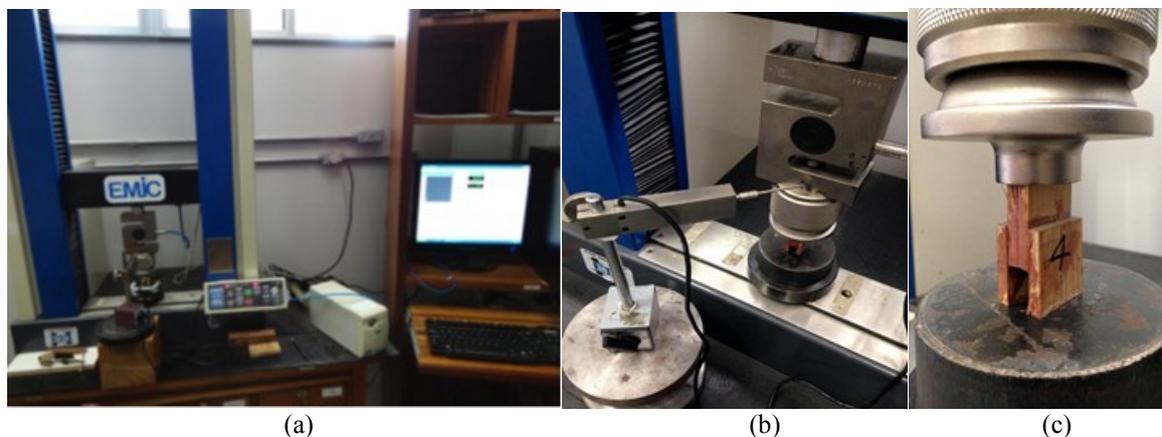


Figura 4: (a) Sistema conectado ao SAD; (b); Medidor de deslocamento e (c) Detalhe do CP e Rótula Universal.

Os ensaios foram realizados de acordo com as normas técnicas estabelecidas, em condições padronizadas, que permitam obter resultados de aplicação mais geral, e que possam ser utilizados e reproduzidos em qualquer lugar. Os ensaios de cisalhamento foram executados na máquina universal. Foi confeccionado um programa “script” na linguagem da máquina de ensaios para sua automatização. O ensaio foi realizado com carga monotônica crescente, com controle da carga equivalente a 10 MPa / minuto. A duração foi de 12 minutos. Antes de iniciar o ensaio, o CP foi medido com paquímetro, determinando-se a área colada e o comprimento da linha cola. Em seguida, o CP foi posicionado na máquina de ensaios, instrumentado e logo foi iniciado o experimento. No final do experimento o programa forneceu a tensão de cisalhamento na ruptura e os coeficientes de deslizamento de serviço (K_{serv}) e último (K_u).

O comportamento da ligação bambu-adesivo-bambu pode ser considerada como linearmente elástica. Assim o módulo de deslizamento (k) é o coeficiente da regressão linear da curva força x deslizamento relativo entre as peças do CP. Esta informação é essencial para o dimensionamento de peças de BLC.

Segundo [7], a rigidez da conexão (k), é denominada módulo de deslizamento. Este quantifica a resistência oferecida ao deslizamento relativo entre o adesivo e o bambu, quando a estrutura é carregada. O módulo de deslizamento pode classificar-se em de serviço (k_{serv}), para o estado limite de serviço e módulo de deslizamento último (k_u) para o estado limite último. O primeiro corresponde aos níveis de carregamento iniciais e o segundo pode ser considerado como $k_u = 2/3 k_{serv}$.

O k_{serv} e a resistência ao cisalhamento da ligação são parâmetros importantes para o dimensionamento das vigas mistas e laminados colados. Atualmente, não existe um ensaio de cisalhamento padrão para estruturas de bambu. Os pesquisadores utilizam as normas [9, 10, 11] com algumas adaptações.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 5 são apresentados os resultados de ensaio para os sete tratamentos de pressão de colagem de zero (sem pressão) à 8,75 MPa. No gráfico também é apresentado os valores médios e os respectivos desvios padrões.

Nota-se que, com o aumento da pressão, ocorre um aumento da tensão de ruptura. Da pressão zero para 2,5MPa, a tensão de ruptura praticamente dobra. De 2,5 até 5MPa, a tensão de ruptura mantém um mesmo padrão. A partir da pressão de 5MPa, há um decréscimo da tensão de ruptura, isso indica que o adesivo foi expelido e a ligação ficou empobrecida. A pressão de colagem melhora a resistência ao cisalhamento da ligação, no entanto, o aumento exagerado dessa pressão, acima de 2,5 MPa, não irá aumentar consideravelmente este parâmetro.

Pode-se dizer então que, para uma ligação colada de bambu-bambu, eficiente, tem que ser aplicada uma pressão mínima de 2,5 e máxima de 5MPa. Neste sentido, por questões práticas, foi adotada a pressão

mínima de 2,5 MPa.

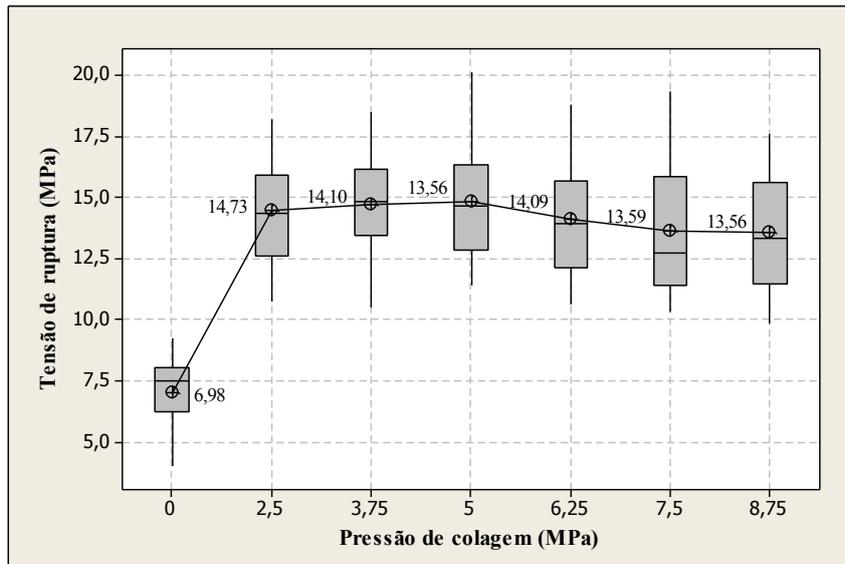


Figura 5: Relação da pressão de colagem com a tensão de ruptura.

Da mesma maneira é apresentado na Figura 6 o gráfico da relação do módulo de deslizamento de serviço em função da pressão de colagem.

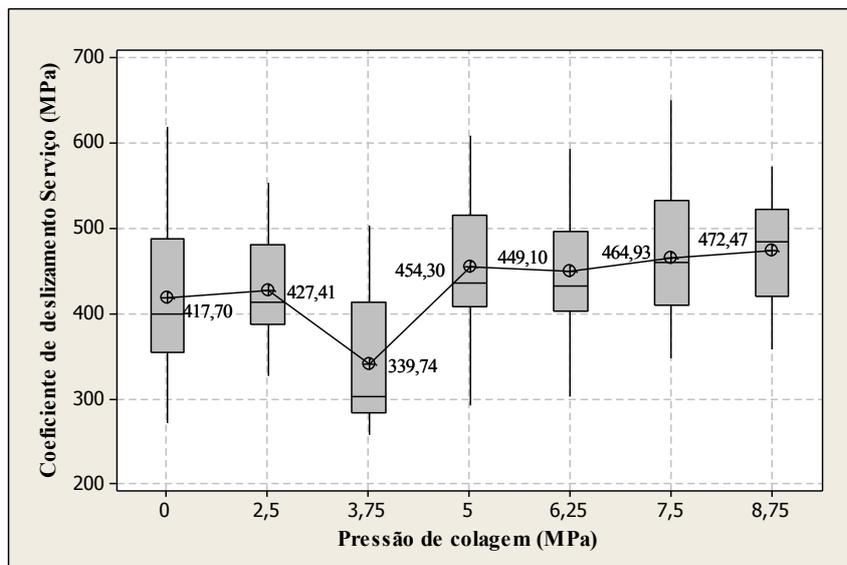


Figura 6: Módulo de deslizamento serviço em função da pressão de colagem.

Nota-se neste gráfico que na pressão de zero à 2,5MPa o valor do módulo de deslizamento aumenta muito pouco. Na pressão de 3,75MPa, ocorre um decréscimo muito grande do valor do módulo de deslizamento apresentando-se a princípio discrepante e com grande possibilidade de estar errado. Isto pode ser explicado pelo problema ocorrido durante a preparação dos CPs quando, da aplicação da pressão de 3,75 MPa, houve um pequeno deslizamento das peças coladas e os CPs ficaram comprometidos, entretanto percebe-se que na tensão de ruptura não houve influência nos resultados. Desta forma, não foi considerado este valor de pressão de colagem.

Como o aumento do módulo de deslizamento com o aumento da pressão de colagem é pouco representativo é possível determinar o módulo de deslizamento com qualquer pressão de colagem mesmo sem pressão.

Na figura 7, são apresentados todos os resultados dos CPs MC, MM e CC; a princípio nota-se que os valores médios são semelhantes e pode-se considerar que a superfície de colagem não influencia na resistência da ligação.

A combinação de superfície de colagem MC, miolo com casca, apresentou uma tensão de ruptura próxima de 12,7MPa, enquanto que a combinação MM, miolo com miolo, apresenta um pequeno ganho chegando nos 13MPa e o CC, casca com casca apresentou o valor de 12,3MPa.

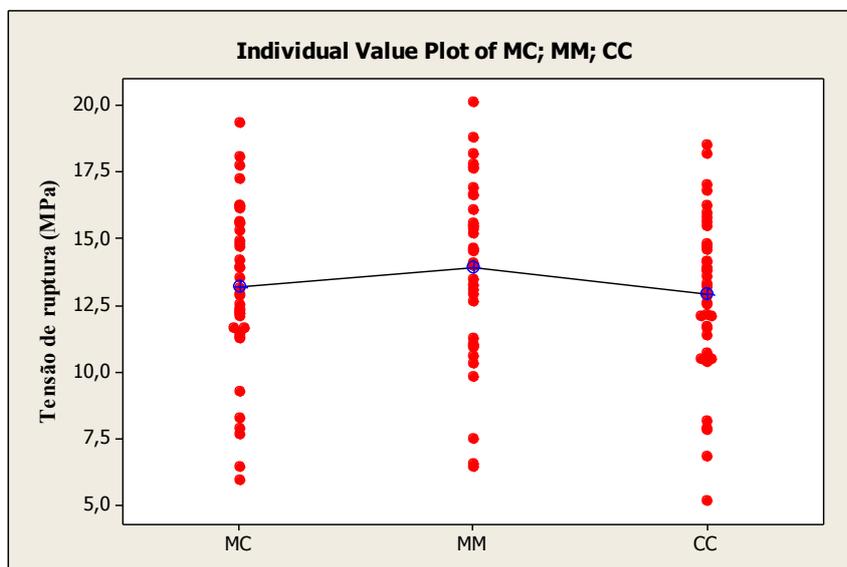


Figura 7: Combinação de superfície de colagem com a tensão de ruptura.

As combinações de superfície de colagem MC, miolo-casca e CC, casca-casca, deram semelhantes valores da tensão de ruptura e a combinação MM, miolo-miolo, deu um pouco acima da média devido ao fato de que os poros estão mais abertos, ocorrendo uma maior penetração do adesivo nas duas superfícies.

Fazendo uma análise estatística ANOVA de comparação das 3 séries de medida com 95% de confiabilidade e usando TUKEY, com intervalo de confiança de 5% comprova-se que, estatisticamente, os três tratamentos podem ser considerados iguais. Assim pode-se dizer que a superfície não influencia na resistência de cisalhamento.

4. CONCLUSÕES

A resistência ao cisalhamento da ligação bambu-bambu apresentou melhor comportamento no intervalo de pressão entre 2,5 a 5 MPa. Assim a pressão ideal de colagem definida é de 2,5 MPa. A combinação de superfície de colagem não influenciou na resistência da ligação bambu-bambu, assim é possível utilizar qualquer combinação.

5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro dado a esta pesquisa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] LIMA, J. H., DIAS, A. A. "Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bambu laminado e colado: análise teórica e experimental", *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 3, pp. 519-524, 2001.
- [2] RIVERO, L. A. *Laminado colado e contraplacado de bambu*, Dissertação de M.Sc., Engenharia Agrícola/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil, 2003.
- [3] PAES, J. B., OLIVEIRA, A. K. F., OLIVEIRA, E., LIMA, C. R. "Vigas mistas de madeira de reflorestamento e bambu laminado e colado: análise teórica e experimental", *Revista Ciência Florestal*, v. 19, n. 1, pp. 41-51, Jan. 2009.

- [4] CARRASCO, E. V. M., *Ligações Estruturais de Madeira e Adesivos*, Dissertação de M.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 1984.
- [5] KALIA, S., KAITH, B. S., KAUR, I. “Pretreatments of natural fibers and their application as reinforcing material in polymer composites. A review”, *Polymer Engineering & Science*, v. 49, n. 7, pp. 1253-1272, Jul. 2009.
- [6] LIESE, W., *The Anatomy of bamboo culms*, In: Report INBAR 204, International Network for bamboo and rattan. China, 1998.
- [7] MASCIA, N. T., LAHR, F. A. R. “Remarks on Orthotropic Elastic Models Applied to wood”, *Materials Research*, v. 9, n. 3, pp. 301-310, Mar. 2006.
- [8] OLIVEIRA, A. K. F., PAES, J. B., OLIVEIRA, E., LIMA, C.R. “Caracterização físico-mecânica de laminado colado de bambu (*Dendrocalamus giganteus*)”, *Ciência Florestal*, v. 19, n. 1, pp. 41-51, Jan. 2009.
- [9] ANÔNIMO (1997), NBR-7190: *Projetos de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [10] ANÔNIMO (2004), Eurocode 5: Design of timber structures, part 1–2, structural fire design. Belgium, CEN - European committee for standardization.
- [11] ANÔNIMO (2004), ISO 22157-1 Bamboo -- Determination of physical and mechanical properties -- Part 1: Requirements. Geneva, International Organization for Standardization.