

PAINÉIS DE MADEIRA LAMINADA COLADA CRUZADA PARA LAJES: AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL MECÂNICA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE CONSUMO DE ADESIVO

*CROSS-LAMINATED TIMBER PANELS FOR SLABS: MECHANICAL EXPERIMENTAL EVALUATION
UNDER DIFFERENT CONSUMPTION OF ADHESIVE LEVELS*

Taienne Winni Paiz Ecker¹, José Luiz Miotto², Gabriel Turmina³

¹Mestre em Engenharia Civil, Professora na União de Ensino do Sudoeste do Paraná – UNISEP, Câmpus Francisco Beltrão, PR. E-mail: taienne_ecker@hotmail.com

²Doutor em Engenharia Civil. Professor na Universidade Estadual de Maringá – UEM. Maringá, PR. E-mail: jlmiotto@uem.br

³Engenheiro Civil. E-mail: thurmina@gmail.com.

RESUMO

O sistema construtivo em Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), ou *Cross Laminated Timber* (CLT), é visto como um novo conceito para a engenharia de estruturas, devido ao seu alto nível de pré-fabricação, redução no tempo de construção e possibilidade de construções de múltiplos pavimentos. Além disso, os painéis de CLT são feitos de material renovável e promovem construções com menor geração de resíduos, contribuindo, assim, para o desenvolvimento sustentável. Todavia, por ser um produto recente, é primordial a realização de estudos referentes ao seu desempenho estrutural. Com isso, esta pesquisa apresenta os resultados obtidos em ensaios de flexão de painéis de CLT para lajes, formados por três camadas ortogonais de lamelas de pinus, ligadas por adesivo poliuretânico monocomponente. A fim de avaliar a eficiência da colagem das lamelas, foram produzidos 12 painéis com diferentes quantidades de adesivo: 120 g/m², 160 g/m² e 200 g/m². Os painéis testados à flexão produzidos com 200 g/m² de adesivo mostraram melhor desempenho, com valores médios de 34,21 MPa para o módulo de ruptura e 10.200 MPa para o módulo de elasticidade, similares aos requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012, o que evidencia a influência da quantidade de adesivo aplicada no desempenho mecânico dos painéis.

Palavras-chaves: madeira laminada colada cruzada, ensaio de flexão, adesivo poliuretânico.

ABSTRACT

The construction system in cross-laminated timber (CLT) is seen as a new concept for structural engineering, due to its high pre-fabrication level, reduced construction time and the possibility of multi-floor constructions. In addition, CLT panels are made of renewable material and promote constructions with lower waste generation, contributing to sustainable development. However, being a recent product, it is essential to carry out studies related to its structural performance. Therefore, this paper presents the results obtained in bending tests of CLT panels for slabs, formed by three orthogonal layers of pinus lamellae, bonded by monocomponent polyurethane adhesive. In order to evaluate the bonding efficiency of adhesive, twelve panels were produced with different quantities of adhesives: 120 g/m², 160 g/m² and 200 g/m². The panels produced with 200 g/m² of adhesive showed better performance, with average values of 34.21 MPa for the modulus of rupture and 10,200 MPa for the modulus of elasticity, similar to those required by ANSI/APA PRG 320: 2012, which shows the influence of the amount of adhesive applied on the mechanical performance of the panels.

Keywords: Cross Laminated Timber, bending test, polyurethane adhesive.

1 – INTRODUÇÃO

Os produtos resultantes da industrialização da madeira incorporam cada vez mais tecnologia em sua produção. Com isso, estruturas com alto valor agregado e maior aproveitamento da madeira ganham espaço no mercado da construção civil. Como exemplo, podem-se citar os painéis de Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), ou *Cross Laminated Timber* (CLT), um produto recente no mercado e considerado por muitos pesquisadores como um novo conceito para a engenharia de estruturas, pois suas características permitem a produção de edificações de madeira a partir de painéis – tanto em paredes quanto em lajes –, constituindo-se em um sistema construtivo inovador.

Graças à sua estrutura laminar e sua versatilidade, os painéis de CLT fornecem novos horizontes na engenharia

de estruturas e trazem diversos benefícios, como o alto nível de pré-fabricação, redução no tempo de construção, baixa relação resistência/peso, possibilidade de construções de múltiplos pavimentos e bom isolamento térmico e acústico. Além disso, por serem feitos de material renovável, com baixa energia de produção, e por promoverem construções com menor geração de resíduos, os painéis de CLT contribuem para o desenvolvimento sustentável.

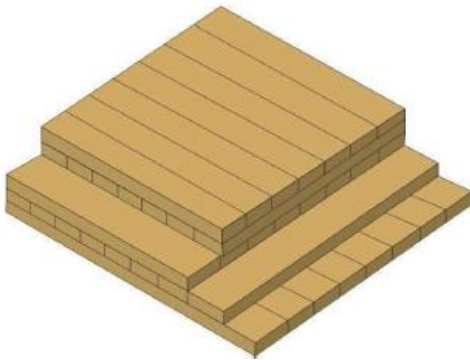
Vale ressaltar que o emprego da madeira, para fins estruturais ou não, deve ser realizado com economia e segurança, por isso é de suma importância o conhecimento de suas propriedades físicas e mecânicas. Assim, essa pesquisa busca avaliar o comportamento mecânico de painéis de CLT para pisos de edificações em ensaios de flexão baseados na norma ASTM 198:2009, conforme solicitado pela ANSI/APA PRG 320:2012, e analisar a

eficiência da colagem das lamelas por meio da variação da quantidade de adesivo aplicada nos painéis, bem como analisar seus modos de ruptura.

2 – CROSS LAMINATED TIMBER

A Madeira Laminada Colada Cruzada (MLCC), ou *Cross Laminated Timber* (CLT), é um produto de madeira projetado em forma de placa que pode ser utilizado tanto como elemento de parede quanto de laje (BRANDNER, 2013). Como pode ser observado na Figura 1, os painéis de CLT são compostos por camadas de lamelas de madeira orientadas transversalmente às camadas adjacentes. Essa laminação cruzada reduz significativamente os efeitos de retração e inchamento do material devido às variações de umidade e resulta em um elemento de placa com expressivas propriedades de rigidez em diferentes direções (KUILEN *et al.*, 2011; STEIGER; GÜLZOW; GSELL, 2008).

Figura 1 – *Cross Laminated Timber*

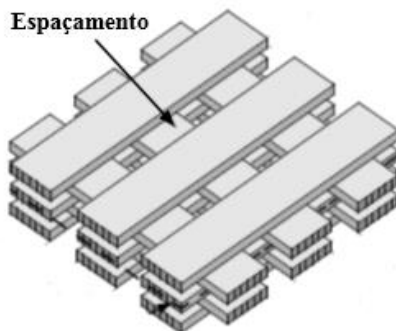


Fonte: Mallo e Espinoza (2015).

Segundo Mohammad *et al.* (2012), para se obter capacidades estruturais específicas, configurações especiais podem ser adotadas, em que camadas consecutivas são colocadas na mesma direção, a fim de proporcionar uma camada dupla. Ressalta-se, ainda, que as camadas adjacentes também podem ser dispostas em orientações diferentes de 90 graus.

Há também algumas configurações não muito comuns, que permitem a existência de espaços entre as lamelas de cada camada, como pode ser observado na Figura 2. Nesse caso, o comportamento mecânico de painéis de CLT varia com o tamanho das aberturas (ASHTARI, 2012).

Figura 2 – Painel de *Cross Laminated Timber* com abertura



Fonte: Adaptado de Ashtari (2012).

Normalmente são utilizados como adesivo os poliuretanos (PUR), que são fabricados sem adição de solventes ou de formaldeído, mas também podem ser empregados os adesivos: melamina-ureia-formaldeído (MUF), fenol-resorcinol-formaldeído (PRF) e emulsão polímero isocianato (EPI) (CRESPELL; GAGNON, 2010; WANG; PIRVU; LUM, 2011). Segundo Ashtari (2012), também se pode fazer uso de conectores mecânicos, tais como pregos, cavilhas ou parafusos, o que é pouco comum na prática.

A colagem das faces estreitas das lamelas de uma mesma camada é opcional, e traz vantagens no que diz respeito ao comportamento ao fogo, desempenho acústico e estanqueidade do ar. No entanto, esse procedimento pode criar restrições por causa de tensões internas devido a inchaço e retração, ocasionados pela variação climática. Assim, essas vantagens são limitadas (BRANDNER, 2013).

O adesivo deve ser espalhado sobre a superfície da madeira o mais uniformemente possível. No entanto, isso pode ser difícil de controlar. Pouco adesivo leva a uma ligação ineficiente. Um pouco de excesso pode ser tolerado, mas muito resulta em desperdício e pode escorrer para fora do painel (CHEN, 2011).

Para garantir um melhor desempenho do adesivo e para evitar variações dimensionais e fendas superficiais, o teor de umidade adequado para a madeira é $12\% \pm 3\%$. Além disso, a norma americana ANSI/APA PRG 320:2012 recomenda a seleção de espécies de madeira com densidade superior a $0,35 \text{ g/cm}^3$.

Em geral, os painéis de CLT são compostos por um número ímpar de camadas, normalmente de três a sete, e por razões técnicas possuem espessura limitada em 500 mm (KUILEN *et al.*, 2011). Segundo Thiel e Schickhofer (2010), comumente são utilizados painéis de 3 e 5 camadas para paredes e painéis de 5 e 7 camadas para lajes. Painéis de 9 ou mais camadas são utilizados para fins especiais de elevado carregamento.

De acordo com FPInnovations (2011), a espessura das lamelas pode ser de 10 mm a 50 mm e a largura de 60 mm a 240 mm. Porém, segundo a ANSI/APA PRG 320:2012, a espessura das lamelas deve estar entre 16 mm e 51 mm, em que a largura na direção principal deve ser maior que 1,75 vezes a espessura e na direção secundária maior que 3,5 vezes a espessura.

As dimensões dos painéis podem variar de acordo com os fabricantes, mas as larguras típicas são de 0,6 m, 1,2 m e 3,0 m, podendo chegar a 5,0 m em casos específicos, enquanto que o comprimento pode ser de até 18,0 m. Deve-se ressaltar que o transporte pode impor limitações ao tamanho do painel de CLT (FPINNOVATIONS, 2011).

O processo de fabricação dos painéis de CLT envolve, basicamente, as seguintes etapas: seleção da madeira serrada, classificação visual e mecânica das lamelas secas, aplainamento das lamelas, realização de cortes ou emendas dentadas (*fingerjoints*) se necessário, colagem nas faces estreitas das lamelas de uma mesma camada (opcional), organização e colagem das camadas, prensagem do painel, acabamentos, embalagem e transporte (BRANDNER, 2013; WANG; PIRVU; LUM, 2011).

Segundo Kuilen *et al.* (2011), devido ao alto nível de pré-fabricação, as aberturas para portas e janelas já podem ser incluídas na fábrica, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Aberturas realizadas nas fábricas



Fonte: Costa (2013).

Segundo Mallo e Espinoza (2015), a *Cross Laminated Timber* é uma tecnologia de construção promissora, pois permite utilizar madeira de baixo valor agregado para aplicações de alto valor agregado, o que contribui para uma melhor utilização dos recursos florestais.

Como a madeira é um material heterogêneo com diversos defeitos naturais, é possível, durante o processo de fabricação, eliminar grandes defeitos e distribuir os pequenos defeitos ao longo de um grande volume, o que resulta em uma homogeneização do material. Também é possível utilizar lamelas com melhores propriedades mecânicas nas regiões mais solicitadas, a fim de um melhor desempenho estrutural. Com essas técnicas, membros estruturais de alta qualidade podem ser produzidos com a utilização de madeira de qualidade estrutural não muito restritiva (GSELL *et al.*, 2007; CRESPELL; GAGNON, 2010).

Segundo a FPInnovations (2011), as lamelas das camadas exteriores dos painéis de CLT utilizados como paredes são normalmente orientadas paralelamente às cargas verticais para se obter um aumento na resistência. No caso de painéis utilizados como lajes, as camadas exteriores são paralelas à direção principal da extensão.

O sistema construtivo em CLT dispõe de um enorme potencial para a construção civil, bem como para a sociedade como um todo. Ele tem sido estudado como uma nova solução para a construção de edifícios, além de ser ideal para reformas e modernização de edifícios existentes (BRANDNER, 2013).

Construída em 2010, a Universidade de Norwich, na Inglaterra, apresentada na Figura 4, é um exemplo de aplicação da CLT. A estrutura de três pavimentos e 9.000 m² foi construída em 16 semanas e o volume de madeira dessa edificação foi de 3.095 m³. Essa edificação conseguiu armazenar 2.476 toneladas de gás carbônico (CO₂) que seriam emitidos para a atmosfera (KLH UK, [201-]).

Figura 4 – Universidade de Norwich na Inglaterra



Fonte: KLH UK [201-].

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para a verificação do comportamento mecânico de painéis de CLT foram realizados ensaios de flexão, com base na norma americana ANSI/APA PRG 320:2012, avaliado-se a eficiência da colagem das lamelas por meio da variação da quantidade de adesivo aplicado nos painéis. A seguir, serão descritos os materiais e métodos utilizados para a produção e caracterização mecânica de painéis de CLT com três camadas ortogonais.

3.1 Materiais

Para a produção dos painéis de CLT foram utilizadas lamelas de madeira do gênero pinus e adesivo poliuretano monocomponente, sendo este último doado pela empresa Jowat Adhesives.

As lamelas possuíam espessura média de 2,15 cm, larguras entre 9 cm e 11 cm e comprimentos entre 300 cm e 320 cm, com teor de umidade de 16,11% e densidade aparente, corrigida para o teor de umidade de 12%, de 0,54 g/cm³. O valor médio da resistência à compressão paralela às fibras das lamelas foi de 42,58 MPa. Esses valores foram determinados por meio das prescrições da ABNT NBR 7190:1997.

As lamelas também foram classificadas visual e mecanicamente. A classificação visual das lamelas de madeira foi embasada em um estudo feito por Carreira (2003). Para a determinação do módulo de elasticidade à flexão (MOE), foram realizados ensaios de flexão estática segundo o eixo de menor inércia, com base na ASTM 4761:2011, em que obteve-se um valor médio do MOE de 9.275,17 MPa, corrigido para o teor de umidade de 12%, com coeficiente de variação de 23,44%.

Em relação ao adesivo, foram realizados, com base na ABNT NBR 7190:1997, testes de cisalhamento da lâmina de cola na direção paralela e normal às fibras das lamelas, com quantidade de adesivo correspondente a 200 g/m². No primeiro caso, os corpos-de-prova apresentaram um valor médio de resistência ao cisalhamento de 8,42 MPa; no segundo caso esse valor foi de 3,02 MPa, 64% inferior.

3.2 Produção dos painéis

Segundo a norma ANSI/APA PRG 320:2012, os corpos-de-prova para o ensaio de flexão devem apresentar largura superior a 305 mm e o vão central deve ser de, aproximadamente, 30 vezes a espessura do elemento.

Assim, foram confeccionados 12 painéis com três camadas ortogonais, a fim de determinar seus respectivos módulos de ruptura (MOR) e módulos de elasticidade (MOE), bem como analisar seus modos de ruptura. As lamelas classificadas visual e mecanicamente foram distribuídas de modo que resultasse em equilíbrio nos módulos de elasticidade das camadas externas dos painéis. Nas camadas internas buscou-se a utilização de lamelas com módulos de elasticidade relativamente menores. Os painéis também foram confeccionados com a intenção de equiparar as lamelas de uma mesma camada com base em sua classificação visual.

A confecção dos painéis foi realizada em uma fábrica de portas na cidade de Renascença – PR, e durante todo o processo de montagem, foram utilizadas luvas, óculos e máscaras de proteção. Antes da aplicação do adesivo, passava-se um jato de ar comprimido nas lamelas a fim de retirar a poeira da superfície a ser colada e, em seguida, as lamelas eram umedecidas com névoa de borrifação de água, conforme indicação do fabricante (Figura 5). Com as lamelas limpas e umedecidas, foi aplicado o adesivo de poliuretano monocomponente com auxílio de um rolo e, em seguida, foram dispostas as lamelas da camada adjacente, como observado na Figura 6. Esse procedimento foi repetido para a camada seguinte. As lamelas de uma mesma camada não foram coladas entre si.

Figura 5 – (a) Limpeza e (b) umidificação da superfície

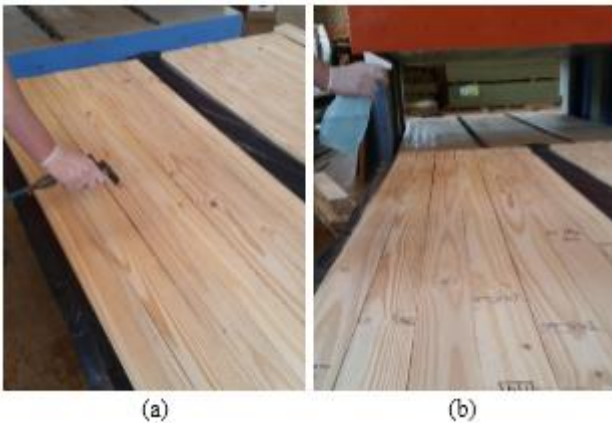
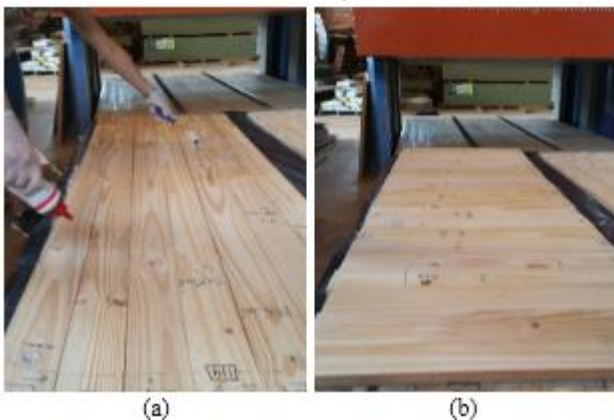


Figura 6 – (a) Aplicação do adesivo e (b) disposição das lamelas da camada adjacente



A fim de avaliar a eficiência da colagem das lamelas, optou-se pela variação da quantidade de adesivo aplicado, sendo elas: 120 g/m², 160 g/m² e 200 g/m². Observou-se que a quantidade de adesivo correspondente a 120 g/m² (recomendada pela empresa fornecedora) dificultava o processo de distribuição do adesivo sobre a superfície.

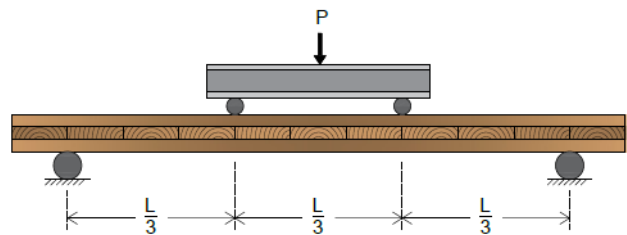
Após a montagem, os painéis foram prensados por meio de uma prensa hidráulica com pressão vertical de 1,2 MPa. Os painéis não foram prensados nas laterais.

Os primeiros painéis montados, com consumo de adesivo de 120 g/m², demoraram uma hora para serem colocados na prensa, todavia, o limite estipulado pelo fabricante é de 45 minutos. Isso ocorreu pela falta de experiência na montagem de painéis. Os demais painéis foram colocados na prensa antes desse tempo. O tempo de prensagem foi de 4 horas a frio, como indicado pelo fabricante. Os painéis produzidos foram cortados e acabados, formando 12 painéis para o ensaio de flexão.

3.3 Caracterização mecânica dos painéis

Os ensaios de flexão dos painéis de CLT foram realizados com base na norma ASTM 198:2009, conforme solicitado pela ANSI/APA PRG 320:2012, pelo método de carregamento de quatro pontos (*third-point load method*), apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Método de carregamento de quatro pontos



Os ensaios foram realizados nos laboratórios da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Dois Vizinhos, na máquina universal de ensaios da EMIC, modelo DL-30000, com capacidade de carga de 300 kN. Também foi necessário utilizar o pórtico de ensaios da UTFPR do Câmpus Pato Branco.

No ensaio de flexão, os painéis foram apoiados em cavaletes metálicos distanciados entre si por 1,95 m. Para a transferência da força nos painéis foram utilizadas vigas metálicas de seção I. Além disso, foram utilizados relógios comparadores para aferição dos deslocamentos verticais no centro dos painéis e nos pontos de aplicação das forças. O arranjo do ensaio de flexão está apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Arranjo do ensaio de flexão dos painéis



O *script* de ensaio foi baseado no Anexo B da ABNT NBR 7190:1997, com apenas um ciclo de carga e descarga. O MOE dos corpos-de-prova em que foram utilizados relógios comparadores foi determinado pela reta secante à curva força x deslocamento, definida pelos pontos correspondente a 10% e 50% da força de ruptura prevista.

Como os cavaletes não estavam apoiados na máquina e esta, por sua vez, não estava fixada no chão, a força máxima que poderia ser aplicada era de, aproximadamente, 20 kN (peso da máquina), caso contrário a máquina era levantada e se apoiava nos cavaletes, sem conseguir aplicar mais força. Como quatro painéis não romperam antes dessa força, foi necessário utilizar o pórtico de ensaios, apresentado na Figura 9, para determinar seus respectivos módulos de ruptura.

Figura 9 – Pórtico de ensaios



O módulo de ruptura (MOR) foi determinado pela Equação 1, em que $P_{m\acute{a}x}$ representa a força máxima, em N; L o vão, em mm; e b e h a base e altura, em mm, da seção transversal do painel, respectivamente.

$$MOR = \frac{P_{m\acute{a}x}L}{bh^2} \quad (1)$$

O módulo de elasticidade à flexão aparente (MOE), desprezando-se a deformação por cisalhamento, foi calculado com base na Equação 2, em que P representa a força, em N; e Δ o deslocamento vertical máximo, em mm.

$$MOE = \frac{23PL^3}{108bh^3\Delta} \quad (2)$$

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores do módulo de ruptura e do módulo de elasticidade dos painéis, corrigidos para o teor de umidade de 12%, estão apresentados separadamente, de acordo com o consumo de adesivo, nas Tabelas 1, 2 e 3, em que são exibidos também os valores médios e característicos, e o coeficiente de variação. O valor característico foi considerado como 70% do valor médio para o módulo de ruptura, como indicado na ABNT NBR 7190:1997. Não foi possível determinar o módulo de elasticidade dos painéis P1, P4 e P6 devido a problemas ocorridos durante os ensaios com o armazenamento de dados. –

Tabela 1 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 120 g/m²

| PAINEL | MOR (MPa) | MOE (MPa) |
|-----------------------------|-------------|-----------------|
| P1 | 2,86 | – |
| P2 | 3,23 | 6.395,70 |
| P3 | 3,95 | 6.351,85 |
| P4 | 4,61 | – |
| Média | 3,66 | 6.373,77 |
| Valor característico | 2,56 | – |
| Coeficiente de variação (%) | 18,40 | 0,34 |

Tabela 2 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m²

| PAINEL | MOR (MPa) | MOE (MPa) |
|-----------------------------|--------------|-----------------|
| P5 | 19,77 | 9.913,72 |
| P6 | 15,83 | – |
| P7 | 11,24 | 9.457,33 |
| P8 | 13,61 | 9.622,84 |
| Média | 15,11 | 9.664,63 |
| Valor característico | 10,58 | – |
| Coeficiente de variação (%) | 20,78 | 1,95 |

Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos painéis com consumo de adesivo de 200 g/m²

| PAINEL | MOR (MPa) | MOE (MPa) |
|-----------------------------|--------------|------------------|
| P9 | 38,33 | 7.698,92 |
| P10 | 36,29 | 9.186,85 |
| P11 | 30,46 | 11.156,67 |
| P12 | 31,75 | 12.757,71 |
| Média | 34,21 | 10.200,04 |
| Valor característico | 23,95 | – |
| Coeficiente de variação (%) | 9,40 | 18,82 |

Os painéis com o consumo de adesivo de 120 g/m² apresentaram as menores propriedades de resistência e flexibilidade, o que pode ser explicado pelo fato de que baixa quantidade de adesivo provoca uma ligação ineficiente. Cabe ressaltar que apenas os painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² romperam na madeira, e os demais tiveram rompimento na linha de cola.

Os painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² apresentaram valores médios do módulo de ruptura 2,3 vezes maiores que os painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² e 9,3 vezes maiores que os painéis com consumo de adesivo de 120 g/m².

Os painéis com consumo de adesivo de 120 g/m² e 160 g/m² romperam na linha de cola, como mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Rompimento na linha de cola



Nos painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² foi possível observar rompimento na madeira. Os painéis P9 e P10 romperam na camada inferior na parte central, como apresentado na Figura 11. Já os painéis P11 e P12 tiveram ruptura nas suas extremidades, tanto na madeira quanto na linha de cola, como apresentado na Figura 12.

Figura 11 – Rompimento na madeira



Figura 12 – Rompimento na extremidade



4.1 Comparação com a norma ANSI/APA PRG 320:2012

Na Tabela 4 são mostrados os valores característicos mínimos requeridos pela ANSI/APA PRG 320:2012 para a resistência à flexão e módulo de elasticidade. As designações E1, E2, E3 e E4 indicam painéis de CLT classificados visual e mecanicamente e produzidos, respectivamente, com as espécies *Spruce-pine-fir*; *Douglas fir-Larch*; *Eastern Softwoods*, *Northern Species* ou *Western Woods*; e *Southern pine*. As designações V1, V2 e V3 indicam painéis classificados apenas visualmente e produzidos, respectivamente, com as espécies *Douglas fir-Larch*, *Spruce-pine-fir* e *Southern pine*.

Tabela 4 – Valores característicos requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012

| Classe | MOE (MPa) | MOR (MPa) |
|--------|-----------|-----------|
| E1 | 11.721 | 28,2 |
| E2 | 10.342 | 23,9 |
| E3 | 8.274 | 17,4 |
| E4 | 11.721 | 28,2 |
| V1 | 11.032 | 13,0 |
| V2 | 9.653 | 12,7 |
| V3 | 11.032 | 14,1 |

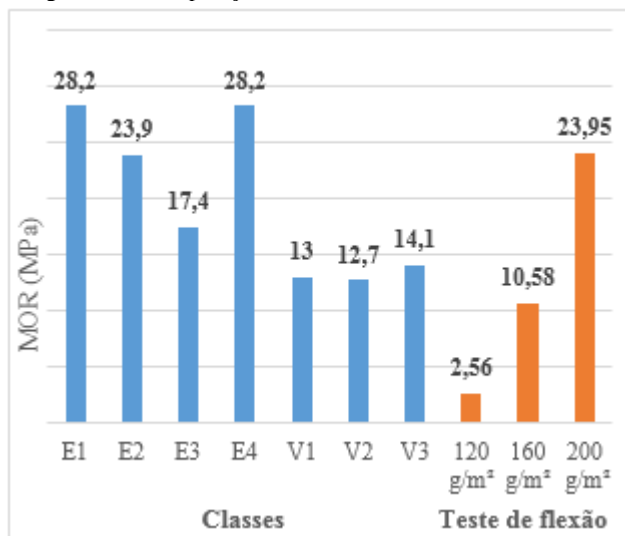
Percebe-se que o valor característico do módulo de ruptura obtido no ensaio de flexão para os painéis com consumo de adesivo de 120 g/m² são muito inferiores em relação aos valores característicos requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012, com diferenças superiores a 80%.

Quanto aos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m², o valor característico do módulo de ruptura se mostrou 62,5% inferior ao maior valor característico (28,2 MPa) e 16,7% inferior ao menor valor característico (12,7 MPa) requeridos pela norma.

Já os painéis testados à flexão, com consumo de adesivo de 200 g/m², apresentaram um valor característico do módulo de ruptura de 23,95 MPa, inferior apenas aos valores característicos das classes E1 e E4, com diferença de 15,1%.

No gráfico da Figura 13 é mostrada a comparação dos valores característicos do módulo de ruptura requeridos pela norma com os valores obtidos nos ensaios.

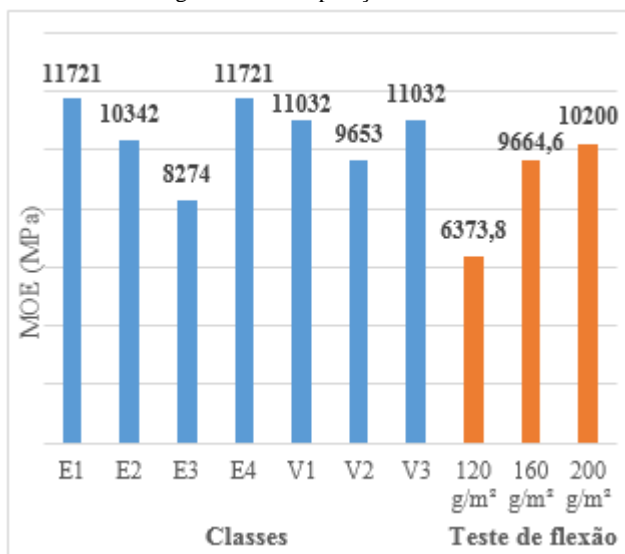
Figura 13 – Comparação dos valores característicos do MOR



Como citado, os valores característicos dos ensaios de flexão e cisalhamento dos painéis foram determinados com base na norma ABNT NBR 7190:1997, por isso, cabe ressaltar que embora sejam comparados valores característicos, os modelos de ensaio e cálculo da resistência característica são diferentes nas duas normas, e, portanto, pode ocorrer distorção nos resultados.

O módulo de elasticidade médio dos painéis testados à flexão com consumo de adesivo de 120 g/m², desprezando-se a deformação por cisalhamento, foi de 6.373,8 MPa, com diferenças entre 23% e 46% em relação aos valores requeridos pela norma ANSI/APA PRG 320:2012. Já o módulo de elasticidade médio dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² e 200 g/m² se mostraram similares aos requeridos pela norma, com diferenças inferiores a 23,3%, como observado no gráfico da Figura 14.

Figura 14 – Comparação do MOE



4.2 Comparação com os valores obtidos por outros autores

Czaderski *et al.* (2007, *apud* STÜRZENBECHER; HOFSTETTER; EBERHARDSTEINER, 2010) testaram à

flexão 24 painéis de CLT com três camadas de madeira conífera, espessura total de 70 mm, com diferentes configurações e tipos de carregamentos e obtiveram um valor médio do MOR de 27,3 MPa, com coeficiente de variação de 8,9%. Esse valor se mostra 1,8 vezes superior à média do MOR dos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² (15,11 MPa), mas 20,2% menor que a média do MOR dos painéis com consumo de adesivo de 200 g/m² (34,21 MPa) testados a flexão.

Alencar (2015) produziu 16 painéis de CLT com três camadas e diferentes combinações de lamelas de pinus e eucalipto, em que 4 deles foram fabricados apenas com madeira de pinus e apresentaram densidade média de 0,53 g/cm³, MOR de 48,3 MPa e MOE de 13.622 MPa. Os valores da densidade dos painéis se mostraram similares, entretanto, os valores do MOR e o MOE determinados pela autora foram efetivamente superiores aos obtidos neste trabalho. Destaca-se que Alencar (2015) utilizou o adesivo MUF para a fabricação dos painéis.

Zhou *et al.* (2014), produziram 45 painéis de CLT com três camadas de madeira conífera (*Picea mariana*), com diferentes larguras, e com a utilização de 300 g/m² de adesivo poliuretano bicomponente. Os autores obtiveram um resultado médio do módulo de elasticidade equivalente a 9.537 MPa, similar aos valores médios do módulo de elasticidade encontrados para os painéis testados à flexão com consumo de adesivo de 160 g/m² e 200 g/m².

Sigrist e Lehmann (2014) ensaiaram 70 painéis de CLT de *Pinus radiata* com diferentes configurações e com aplicação de adesivo poliuretano monocomponente. Os painéis com três camadas e espessura total de 90 mm, sem classificação visual ou mecânica, apresentaram os valores médios de 25,5 MPa para o módulo de ruptura e 6.251 MPa para o módulo de elasticidade. Já os painéis com essa mesma configuração e com classificação visual apresentaram os valores médios de 35,4 MPa para o módulo de ruptura e 8.066 MPa para o módulo de elasticidade. Também foram testados painéis com essa mesma configuração, com classificação visual e mecânica, os quais apresentaram valores médios de 53,1 MPa para o módulo de ruptura e 12.567 MPa para o módulo de elasticidade.

O valor médio do MOR dos painéis testados à flexão com consumo de adesivo de 200 g/m² (34,21 MPa) se mostrou 35,6% inferior ao valor obtido por Sigrist e Lehmann (2014) para os painéis com classificação visual e mecânica (53,1 MPa), mas se aproximou do valor obtido para os painéis com classificação visual apenas (35,4 MPa).

Quanto ao MOE, os painéis com classificação visual e mecânica testados por Sigrist e Lehmann (2014) apresentaram um valor 23% superior aos painéis testados à flexão, nesta pesquisa, com consumo de adesivo de 200 g/m² (10.200 MPa) e 30% superior aos painéis com consumo de adesivo de 160 g/m² (9.664,6 MPa).

Nos gráficos das Figuras 15 e 16 são apresentados, respectivamente, os valores médios do módulo de ruptura e módulo de elasticidade obtidos nos ensaios de flexão dos painéis, em comparação com os obtidos por outros pesquisadores.

Figura 15 – Comparação dos valores médios do MOR

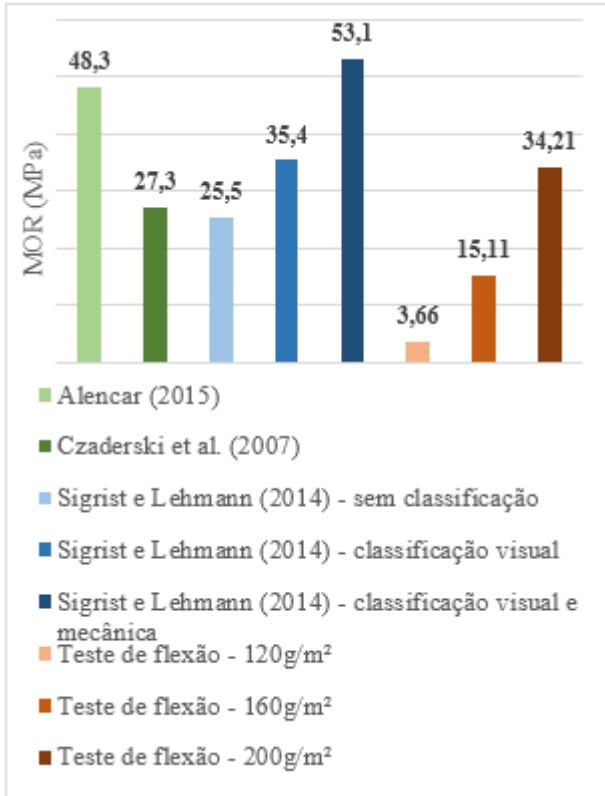
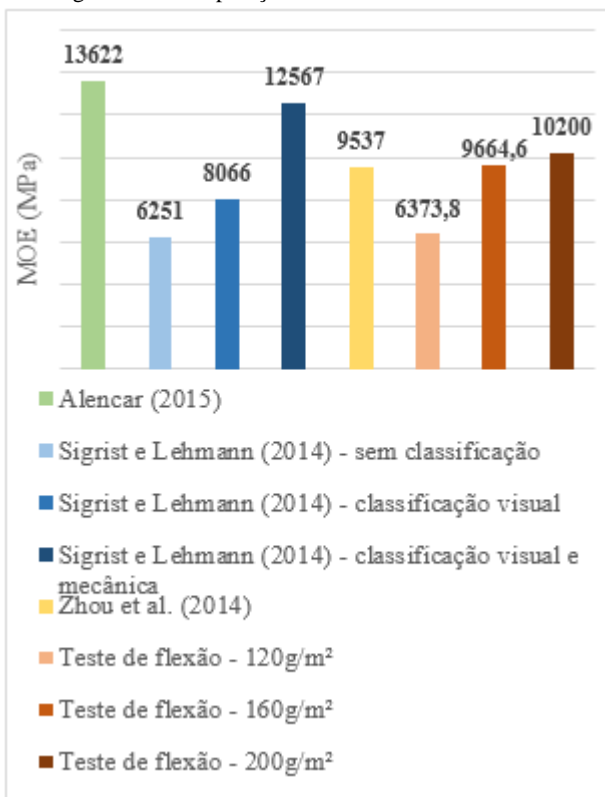


Figura 16 – Comparação dos valores médios do MOE



CONCLUSÃO

O sistema construtivo em *Cross Laminated Timber* pode ser considerado como um novo conceito para a engenharia de

estruturas, pois possibilita a construção de edificações de múltiplos pavimentos e pode ser utilizado tanto como elemento de laje quanto de parede, além de ser uma alternativa para o desenvolvimento sustentável.

Todavia, por se tratar de um produto recente, é primordial a realização de estudos referentes ao seu desempenho estrutural, que considerem as características das madeiras brasileiras, especialmente aquelas produzidas em florestas plantadas, a fim de usar de forma adequada esse elemento estrutural. Análises experimentais são necessárias para auxiliar no desenvolvimento de abordagens analíticas que consigam descrever com precisão o comportamento deste elemento.

Por meio dos resultados desta pesquisa, evidencia-se a influência da quantidade de adesivo aplicada no desempenho mecânico dos painéis, e recomenda-se um consumo de adesivo igual ou superior a 200 g/m², pois baixa quantidade de adesivo promove uma ligação ineficiente.

REFERÊNCIAS

- ALENCAR, J. B. M. **Sistema construtivo em madeira laminada colada cruzada ou cross laminated timber (CLT): análise da viabilidade técnica da madeira com baixo valor agregado**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Metodologia de Projeto de Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI/APA PRG 320: Standard for performance-rated cross-laminated timber**. Tacoma, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D198-09: Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes**. Philadelphia, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM 4761-11: Standard test methods for mechanical properties of lumber and wood-base structural material**. Philadelphia, 2011.
- ASHTARI, S. **In-plane stiffness of cross-laminated timber floors**. 2012. 132 f. Thesis (Master on Applied Science), University of British Columbia, Vancouver, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190: Projeto de estruturas de madeira**. Rio de Janeiro, 1997.
- BRANDNER, R. **Production and technology of cross laminated timber (CLT): a state-of-the-art report**. Relatório – Institute of Timber Engineering and Wood Technology, Graz University of Technology, Graz, 2013.
- CARREIRA, M. R. **Critérios para classificação visual de peças estruturais de Pinus Sp**. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.
- CHEN, Y. **Structural performance of box based cross laminated timber system used in floor applications**. 2011. 237f. Dissertation (Doctor of Philosophy), University of British Columbia, Vancouver, 2011.

- COSTA, A. A. **Construção de edifícios com cross laminated timber (CLT)**. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil), Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.
- CRESPELL, P.; GAGNON, S. (Ed.). **Cross laminated timber: a primer**. [S.l.]: FPIInnovations, 2010.
- CZADERSKI, C.; STEIGER, R.; HOWALD, M.; OLIA, S.; GÜLZOW, A.; NIEMZ, P. Versuche und Berechnungen an allseitig gelagerten 3-schichtigen Brettsperrholzplatten. **Holz Roh Werkst**, v. 65, p. 383-402, 2007.
- FPIINNOVATIONS. Introduction to cross-laminated timber. In: **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Québec: Canadian, 2011. Cap. 1.
- GSELL, D.; FELTRIN, G.; SCHUBERT, S.; STEIGER, R.; MOTAVALLI, M. Cross-laminated timber plates: evaluation and verification of homogenized elastic properties. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, [S.l.], v. 133, n. 1, p. 132-138, Jan. 2007.
- KLH UK. **Norwich Open Academy**. Portfolio: Education [201-]. Disponível em: <<http://www.klhuk.com/portfolio/education/open-academy,-norwich.aspx>>. Acesso em: 22 jun. 2016.
- KUILEN, J. W. G. V.; CECCOTTI, A.; XIA, Z.; HE, M. Very tall wooden buildings with cross laminated timber. In: East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, 12, 2011, Hong Kong. **Proceedings...** Hong Kong: Elsevier, p. 1621-1628, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.204>.
- MALLO, M. F. L.; ESPINOZA, O. Awareness, perceptions and willingness to adopt cross-laminated timber by the architecture community in the United States. **Cleaner Production**, [S.l.], v. 94, p. 198-210, 2015.
- MOHAMMAD, M.; GAGNON, S.; DOUGLAS, B. K.; PODESTO, L. Introduction to cross laminated timber. **Wood Design Focus**, [S.l.], v. 22, n. 2, p. 3-12, Summer 2012.
- SIGRIST, C.; LEHMANN, M. Potential of CLT produced from non-structural grade australian *Pinus radiata*. In: World Conference on Timber Engineering, 13, 2014, Quebec. **Proceedings...** Quebec: WCTE, 2014. Não paginado.
- STEIGER, R.; GÜLZOW, A.; GSELL, D. Non destructive evaluation of elastic material properties of cross-laminated timber (CLT). In: Conference COST E53, 2008, Delft. **Proceedings...** Delft: TUDelft, 2008.
- STÜRZENBECHER, R.; HOFSTETTER, K.; EBERHARDSTEINER, J. Cross laminated timber: a multi-layer, shear compliant plate and its mechanical behavior. In: World Conference on Timber Engineering, 11, 2010, [Riva del Garda]. **Proceedings...** [Riva del Garda]: WCTE, 2010. Não paginado.
- THIEL, A.; SCHICKHOFER, G. CLTdesigner – a software tool for designing cross laminated timber elements: 1d-plate-design. In: World Conference on Timber Engineering, 11, 2010, [Riva del Garda]. **Proceedings...** [Riva del Garda]: WCTE, 2010. Não paginado.
- WANG, B.; PIRVU, C.; LUM, C. Cross-laminated timber manufacturing. In: FPIInnovations. **CLT Handbook: cross-laminated timber**. Revisão de Romulo C. Casilla, Y. H. Chui e Bob Knudson. Québec: Canadian, 2011. Cap. 2.
- ZHOU, Q.; GONG, M.; CHUI, Y. H.; MOHAMMAD, M. Measurement of rolling shear modulus and strength of cross laminated timber fabricated with black spruce. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 379-386, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.039>.