

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

FÁBIO PIVA PELLIS

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS EM MADEIRA  
LAMINADA COLADA ARMADA**

Itapeva - SP  
2011

FÁBIO PIVA PELLIS

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS EM MADEIRA  
LAMINADA COLADA ARMADA**

Trabalho de Graduação apresentado no Campus Experimental de Itapeva - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira

Orientador: Prof. Dr. Julio Soriano

Itapeva - SP  
2011

P391d Pellis, Fábio Piva.  
Desempenho estrutural de vigas em madeira laminada colada armada / Fábio Piva Pellis -- Itapeva, 2011.  
41 f.; il.

Trabalho de Graduação do Curso Engenharia Industrial Madeireira apresentado ao Campus Experimental de Itapeva – UNESP, 2011.  
Orientador: Prof. Dr. Júlio Soriano  
Banca examinadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maristela Gava; Prof. Dr. Cláudio De Conti

Inclui bibliografia

1. Vigas. 2. Lâminas de madeira 3. Adesivos. I. Título. II. Itapeva - Curso de Engenharia Industrial Madeireira.

CDD 674.834

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UNESP – Campus Experimental de Itapeva.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS EXPERIMENTAL DE ITAPEVA

**DESEMPENHO ESTRUTURAL DE VIGAS EM MADEIRA  
LAMINADA COLADA ARMADA**

FÁBIO PIVA PELLIS

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO  
COMO PARTE REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**GRADUADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO  
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL MADEIREIRA

Prof. Dr. José Cláudio Caraschi  
Coordenador de Curso

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. Julio Soriano  
Orientador – Faculdade de Engenharia Agrícola / UNICAMP

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maristela Gava  
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Prof. Dr. Cláudio De Conti  
Campus Experimental de Itapeva/UNESP

Dedico este trabalho aos meus pais, meus irmãos e a todos que torceram por mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a minha família que deu todas as condições para a minha formação acadêmica.

Ao meu orientador, Julio Soriano, que aceitou me orientar e foi sempre pronto a responder minhas duvidas.

Ao meu irmão, Bruno, que participou de todo o desenvolvimento da tese, no planejamento, na produção e nos ensaios dos corpos-de-prova.

Aos meus amigos Helder Kenzo Kondo e Bárbara Barone Perez, que sempre estiveram ao meu lado, formando uma base sólida a qual nos apoiamos.

A equipe do laboratório da FEAGRI / UNICAMP, que abriram as portas dos laboratórios para a realização dos ensaios.

Aos meus amigos Bruno, Anderson, Marcellus e Ulysses, que foram grandes companheiros durante os cinco anos de faculdade.

A minha namorada Cintia que me aturou durante todo o período de stress gerado na monografia, sempre me incentivando e apoiando.

"Um homem nunca sabe aquilo de que é capaz  
até que o tenta fazer."  
Charles Dickens

## RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho estrutural de vigas de MLC e MLCA confeccionadas em *Pinus sp*, utilizando adesivo PU mono-componente na laminação e adesivo epóxi para a fixação das barras de aço. O desempenho mecânico foi verificado por meio de ensaios de flexão, sendo adotado o método da seção homogeneizada para se considerar as diferenças de propriedades mecânicas da madeira e do aço. O método da homogeneização de seção se mostrou eficaz para a obtenção da rigidez das peças em MLCA. Por meio da análise experimental, verificou-se que a rigidez apresentada pelas vigas em MLCA foi 91% superior quando comparada com a MLC.

**Palavras-chave:** Estruturas mistas, adesivo PU mono-componente, adesivo epóxi, seção homogeneizada.



## ABSTRACT

The objective of the present work was to evaluate Pinus' glued laminated timber (glulam) beams and steel reinforced glulam beams, using PU mono-component adhesive in lamination step and epoxy adhesive to bond steel bars. The mechanical performance was verified through bending test, and the adopted method based on homogenized section, to considerate the differences between wood and steel mechanical properties. The homogenization section method proved itself effective in obtaining the stiffness of the parts in MLCA. The stiffness of reinforced beams increased 91% in comparison with glulam beams, differing only 5.5 % from value of stiffness calculated.

**Keywords:** Composite structures, adhesive PU mono-component. epoxy adhesive, section homogenized.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de MLC (Fonte: <a href="http://madeiraestrutural.wordpress.com">http://madeiraestrutural.wordpress.com</a> / (2009)) .....	3
Figura 2 – Seção e diagramas para MLCA .....	7
Figura 3- Esquema de flexão estática .....	9
Figura 4 - EMIC modelo: DL30000 –Catálogo EMIC.....	13
Figura 5 - Pórtico e aquisitor de dados dos ensaios.....	13
Figura 6 - Tabicagem das madeiras verdes .....	14
Figura 7 - Cavalete confeccionado para modelagem da viga .....	15
Figura 8 - Aplicação do adesivo Cascola PU .....	15
Figura 9 - Processo de colagem em andamento.....	16
Figura 10 - Abertura do sulco para acomodação dos vergalhões .....	17
Figura 11 - Execução e detalhe construtivo da viga MLCA.....	17
Figura 12 - Ensaios dos protótipos de vigas.....	18
Figura 13 - Força x deslocamento MLC .....	19
Figura 14 - Força x deslocamento MLCA .....	20
Figura 15 - Força x deslocamento MLC - MLCA .....	20
Figura 16 - Perfil de ruptura do MLC .....	24
Figura 17 - Perfil de ruptura do MLCA.....	24

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Médias dos resultados de ensaio.....	21
Tabela 2 - Módulos de elasticidade obtidos a partir do momento de inércia equivalente.....	21

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3.1. Madeira Laminada Colada .....	3
3.2. Madeira Laminada Colada Armada.....	5
3.3. Modelo de cálculo proposto para o comportamento de vigas de MLCA .....	6
3.3.1. MLCA com barras de aço tracionadas e comprimidas .....	7
3.3.2. Análise das Tensões Normais (Estados Limites Últimos E.L.U.) .....	8
3.3.3. Análise da flecha (Estados Limites de Serviço E.L.S.) .....	9
3.3.4. Análise do módulo de elasticidade .....	10
3.3.5. Análise da rigidez .....	10
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
4.1. Materiais .....	11
4.1.1. Madeira .....	11
4.1.2. Adesivos.....	11
4.1.3. Aço .....	12
4.1.3. Equipamentos .....	12
4.1.4. Ensaio .....	12
4.2. Métodos.....	14
4.2.1. Preparação das lâminas para a colagem .....	14
4.2.3. Preparação dos berços de colagem.....	14
4.2.4. Preparo dos adesivos e processo de colagem.....	15
4.2.5. Ensaio.....	17
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	19
5.1. Desempenho estrutural .....	19
5.2 Aspectos da exeqüibilidade.....	23
5.3. Aspectos das rupturas.....	24

6. CONCLUSÃO.....	25
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 26	
APÊNDICE.....	27
ANEXO.....	28

## 1. INTRODUÇÃO

Peças estruturais de madeira serrada são usadas amplamente na construção civil com alguns inconvenientes, tais como limitações de dimensões que muitas vezes se dá por problemas logísticos ou de extração, alto teor de descarte por defeitos intrínsecos, como a presença de nós e trincas. A Madeira Laminada Colada (MLC) é uma alternativa a esses problemas, pois consiste em solidarizar lâminas de madeira com pequenas espessuras, previamente selecionada, por adesivos específicos até atingir as dimensões desejadas.

A Proposta do MLC é um uso racional para a madeira, utilizando peças menores que normalmente não serviriam para o uso estrutural, que proporciona peças com dimensões finais que não seriam encontradas na natureza e/ou nas bitolas comerciais de peças serradas.

Buscando maior economia no uso dos recursos naturais, surgiram técnicas que unem ao MLC algum outro material, como aço, concreto, fibra de vidro etc., com a prerrogativa de se aproveitar as melhores características e propriedades do elemento estrutural.

Neste trabalho buscou-se avaliar o desempenho estrutural do MLC comum com o MLC reforçado com barras de aço, a ser designado de madeira laminada colada armada (MLCA), empregando-se o método da seção homogeneizada, por analogia ao concreto armado, que utiliza o mesmo princípio de monolitismo.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é avaliar o desempenho estrutural e a exequibilidade de vigas em madeira laminada colada (MLC) armadas com barras de aço (MLCA), tendo os seguintes objetivos específicos:

- Avaliação dos aspectos construtivos, como seleção de materiais utilizados, métodos de construção das vigas.
- Avaliação do desempenho mecânico, comparando-se o comportamento estrutural de vigas MLCA com vigas MLC, ambas com a mesma seção transversal e mesmo comprimento. Serão avaliados os estados limites decorrentes da rigidez de cada sistema, quanto à carga máxima admissível e o deslocamento vertical (flecha);
- Verificação do modelo proposto para a presente análise de flexão estática, com base no método da seção homogeneizada.

Através da avaliação desses aspectos são apresentadas as principais vantagens e desvantagens na utilização da MLCA em relação à MLC no que diz respeito da economia de recursos e desempenho. Expondo, de maneira preliminar, algumas informações à respeito desta técnica, seus detalhes construtivos, limitações e características do produto acabado, visto que a técnica de madeira laminada colada armada ainda é pouco difundida.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A madeira é um material muito utilizado na construção civil, por suas propriedades físicas e mecânicas, bem como pela possibilidade dos cultivos de espécies de reflorestamento. No entanto, esse material de origem natural apresenta algumas características inerentes de ser heterogêneo, tendo variações em suas propriedades, seja por espécie, pelo teor de umidade ou pela orientação das fibras.

Ao longo do tempo uma série de técnicas foram desenvolvidas com intuito de aumentar a homogeneidade e por consequência aumentar a confiabilidade e a performance de peças deste material, dentre as quais se destacam a técnica da Madeira Laminada Colada.

#### 3.1. Madeira Laminada Colada

A Madeira Laminada Colada (MLC) é um tipo de produto constituído por várias lamelas de madeira unidas por processo de colagem, tanto no topo quanto nas faces. As peças de MLC estão presentes em vários segmentos, como alternativa ao uso de madeira maciça, desde movelaria até elementos estruturais de construções de grande porte (Figura 1).



Figura 1 - Estrutura de MLC (Fonte: <http://madeiraestrutural.wordpress.com> / (2009))



A técnica de construção do MLC teve origem, segundo RUSSEL et al. (1999), com o mestre carpinteiro suíço *Otto Karl Frederich Hetzer*, em 1906, que decidiu fazer a colagem de peças de madeira utilizando cola de caseína em substituição à ligações metálicas como parafusos, rebites e braçadeiras. Com o desenvolvimento das colas sintéticas a partir de 1940, o MLC passou a ser mais difundido ganhando tanto em popularidade quanto em qualidade.

Dentre os adesivos mais utilizados para a confecção de peças de MLC, segundo AZAMBUJA (2006), destacam-se:

**Fenol-Formaldeído** – adesivo líquido sintético, à base de resorcinol-formol, em solução aquosa/alcoólica, apresenta alta resistência mecânica, química e asintérmica.

**Resinas à base de Melamina Uréia Formaldeído (MUF)** – Esta resina líquida à base de melamina-formol, que é apresentada em solução aquosa, resistente à água.

**Adesivos Cascorez resistente à umidade** – Adesivo em emulsão aquosa à base de poliacetato de vinila (PVAc.), apresentando resistência a elevadas temperaturas e a umidade.

**Wonderbond**– Adesivo em emulsão aquosa “EPI”, fluído, ideal para colagens que necessitem de resistência a água.

**Poliuretano de Óleo de Mamona** – A resina é do tipo bicomponente, de cura a frio, ainda produzida em escala experimental.

Além dos adesivos citados anteriormente tem-se a Cascola PU que foi lançada no mercado nacional no início de 2010, para atender a demanda de profissionais como marceneiros, pedreiros e pequenas indústrias é o primeiro adesivo estrutural da linha Cascola. É um adesivo a base de poliuretano com cura à umidade do ambiente, é ideal para colagens em ambientes externos, por ser a prova d’água.

Há também outros produtos a base de PU mono-componente disponíveis no mercado que são disponibilizados para indústrias especializadas. Este tipo de cola tem um tempo de secagem em aberto (*pot-life*) desde cinco minutos até uma hora.

Segundo ZANGIÁCOMO (2002) as principais vantagens ao se optar pelo uso do MLC são várias, dentre as quais grande liberdade de trabalhar com formas variadas que atendam inúmeras aplicações, viabilizando projetos em estruturas de coberturas, elementos de pontes, edificações, embarcações, entre outras. Destaca,

ainda, o aproveitamento das partes menos nobres da tora, como ripas, ripões e pranchas que não possuem função estrutural, para a composição de uma peça de maior valor econômico e estrutural, como vigas, arcos, pilares etc.

A seleção das peças que compõem o MLC, segundo ZANGIÁCOMO (2002), possibilita a eliminação de defeitos. Desta forma a peça composta tende a ser mais homogênea diminuindo, assim, pontos críticos suscetíveis a falhas tais como, rachaduras, descolamento de nós etc., além de possuir menor tensão residual do que uma peça maciça.

As características apresentadas pela MLC já são suficientes para garantir competitividade com estruturas metálicas e de concreto armado, principalmente pelo fato da matéria prima ser renovável e, ainda, com a tecnologia atual poder maximizar o rendimento da madeira.

### **3.2. Madeira Laminada Colada Armada**

Dentre as técnicas de reforços utilizadas para conferir maior resistência às peças de madeira, no fim do século XX surgiu uma técnica complementar ao MLC, cujo principal intuito era reforçar as peças com algum tipo de metal (alumínio, cobre bronze e aço), a esta técnica deu-se o nome de madeira laminada colada armada.

Dentre os trabalhos pioneiros nesta técnica, tem-se MARK (1961) e SLIKER (1962), citados por LUCA e MARANO (2006), onde foi empregado como reforço peças de alumínio. Já autores como LANTOS (1970), STERN e KUMAR (1973), citados por LUCA e MARANO (2006), estudaram aço é usado como reforço.

Autores como KRUEGER e EDDY (1974), citados por LUCA e MARANO (2006), dedicaram esforços na avaliação da ancoragem destes reforços, sendo primeiros a aplicar adesivo epóxi para a fixação dos reforços metálicos.

Adesivos epóxis são resinas bi-componentes que tem ampla utilização na construção civil devido as suas propriedades de adesão em diversos tipos de materiais e propriedades mecânicas bem elevadas.

Essa técnica usa todos os fundamentos da MLC (tais como, adesivos, emendas etc.) agregando conceitos de reforços estruturais nas zonas tracionadas e comprimidas da peça, tendo como objetivo os seguintes ganhos:

- Incremento no módulo de elasticidade global da peça;

- Aumento na capacidade de carga pela dimensão do vão livre, quando comparado com peças de MLC;
- Aumento na capacidade de carga por altura da viga, quando comparado com peças de MLC;

Essas vantagens na prática resultam em economia da matéria prima base (madeira e adesivo de laminação), ainda que se pese o custo do vergalhão metálico e do adesivo para a sua própria ancoragem.

Mais recentemente os autores LUCA e MARANO (2006) pesquisaram o reforço do MLC de “White Spruce” com vergalhões de aço utilizando o adesivo Purbond® para a ancoragem dos vergalhões, cujos resultados mostraram além do incremento no carregamento máximo e na rigidez, também a modificação do modo do colapso da peça estrutural, tornando-se menos repentino, portanto menos frágil, que quando comparado com vigas de MLC sem qualquer tipo de reforço.

### **3.3. Modelo de cálculo proposto para o comportamento de vigas de MLCA**

Com o objetivo de se avaliar o comportamento de protótipos de MLCA confeccionados para este trabalho, propôs-se um modelo de cálculo para o dimensionamento das peças confeccionadas em MLCA. O Modelo consiste na analogia do método da seção homogeneizada, o qual é empregado para o dimensionamento de peças fletidas de concreto armado. Para o Estádio 1 (situação na qual a peça de concreto armado não apresenta fissuras), graças ao monolitismo, os diagramas de tensão e deformações são lineares. O método da seção homogeneizada consiste na substituição das áreas de aço por áreas equivalentes de concreto, ou seja, com as mesmas resistências.

Assim, analogamente às peças de concreto armado, o aço e a madeira do MLCA encontram-se aderidos de maneira monolítica, ou seja, completamente solidarizados. Desta forma, procede-se o cálculo considerando-se que tanto na região tracionada quanto na região comprimida da seção transversal haverá contribuição da MLC e também das barras presentes.

Para tanto, com base no modelo da seção homogeneizada, Estádio 1, para concreto Armado, apresentado por Camacho(2005), foram desenvolvidas as expressões do item (3.3.1) para o MLCA.

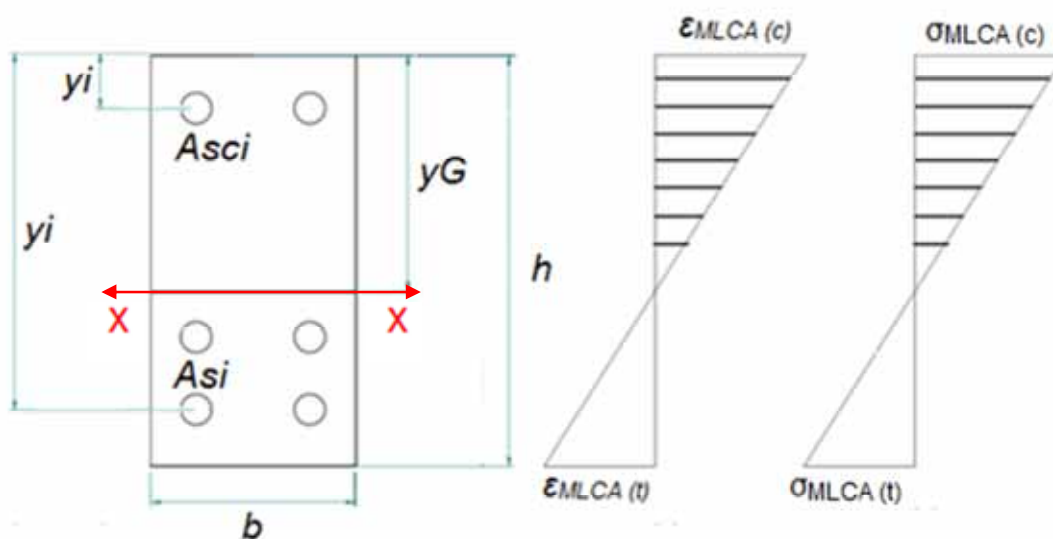
### 3.3.1. MLCA com barras de aço tracionadas e comprimidas

A rigidez de vigas MLCA, pelo método da seção homogeneizada, com a contribuição do MLC e das barras de aço presentes na seção transversal. Deve considerar no lugar da área de aço existente ( $A_s$ ), uma área de MLC equivalente ( $A_{eq}$ ), ou seja, uma área fictícia de madeira que suporte a mesma resultante ( $R_s$ ) que atua na área de aço ( $A_s$ ). As resultantes nas armaduras tracionadas e comprimidas são apresentadas nas Eqs. 1a e 1b, respectivamente.

$$R_{st} = A_s \varepsilon_s E_s = A_{eq,t} \varepsilon_{MLC} E_{MLC} \quad (1a)$$

$$R_{sc} = A_{sc} \varepsilon_s E_s = A_{eq,c} \varepsilon_{MLC} E_{MLC} \quad (1b)$$

Onde:  $A_s$  = Seção transversal da armadura tracionada;  $A_{sc}$  = seção da armadura comprimida;  $E_s$  = Módulo de elasticidade do Aço;  $E_{MLC}$  = Módulo de elasticidade da MLC;  $\varepsilon_{MLC}$  = Deformação específica da MLC.



a - Seção transversal    b - deformações    c - tensões normais

Figura 2–Seção e diagramas para MLCA

Essa equivalência é obtida a partir do fator  $\alpha_e'$ , denotado como sendo uma razão entre o módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do MLC (Eq. 2). Logo, tem-se as áreas equivalentes para as regiões tracionada e comprimida são obtidas conforme Eqs. 3a e 3b, respectivamente. A seção homogeneizada passa a ser representada por uma área equivalente  $A_{eq}$ , conforme a Eq. (4).

$$\alpha_e' = \frac{E_s}{E_{MLC}} \quad (2)$$

$$A_{s,eq} = \sum \alpha_e' A_{si} \quad (3a)$$

$$A_{sc,eq} = \sum \alpha_e' A_{sci} \quad (3b)$$

$$A_{eq} = b \cdot h + A_{s,eq} + A_{sc,eq} \quad (4)$$

Onde:  $A_{si}$  = área de cada barra que compõe a armadura tracionada;  $A_{sci}$  = área de cada barra da armadura comprimida;  $\alpha_e'$  = relação entre o módulo de elasticidade do aço e o módulo de elasticidade do MLC;  $b$  = dimensão da base do MLC;  $h$  = dimensão da altura do MLC.

De posse destes valores, pode-se obter a posição da linha neutra da peça de MLCA, em função da quantidade e distribuição das barras de aço solidarizadas à matriz de MLC, conforme Eq. 5.

$$y_G = \frac{\frac{b \cdot h^2}{2} + \alpha_e \sum A_{si} \cdot y_i + \alpha_e \sum A_{sci} \cdot y_i}{A_{eq}} \quad (5)$$

Onde:  $y_G$  = posição da linha neutra, que representa a distância da borda comprimida até o centro de gravidade da viga MLCA;  $y_i$  = distância do CG de cada barra em relação a borda comprimida da peça de MLCA.

As propriedades geométricas da seção, como o Momento de Inércia Equivalente, são calculadas para a seção homogeneizada, sendo o momento de inércia equivalente obtido por meio da Eq. (6).

$$I_{eq} = \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \left( \frac{h}{2} - y_G \right)^2 + \alpha_e \sum (A_{si} \cdot (y_G - y_i)^2) + \alpha_e \sum (A_{sci} \cdot (y_G - y_i)^2) \quad (6)$$

Onde:  $I_{eq}$  = Momento de Inércia Equivalente.

### 3.3.2. Análise das Tensões Normais (Estados Limites Últimos E.L.U.)

Com o momento de inércia equivalente e conhecendo-se as tensões  $\sigma_{MLC}$  resistentes a compressão e a tração da MLC utilizada, pode-se obter o valor do momento máximo (M) a solicitar a viga MLCA conforme Eq.7.

$$\sigma_{MLC} = \frac{M}{I_{eq}} \cdot y \quad (7)$$

Onde:  $y$  = distância da linha neutra às fibras da borda comprimida ou da borda tracionada;  $M$  = momento fletor máximo para o esquema estático considerado.

Para o ensaio de flexão simples, conforme Figura 3, ao qual serão submetidos os protótipos de MLC e MLCA o valor do momento é proporcional a carga aplicada, conforme Eq. (8)

$$M = \frac{P.L}{4} \quad (8)$$

Onde :  $P$  = carga aplicada às vigas no ensaio de flexão simples;  $L$  = distância entre apoios.

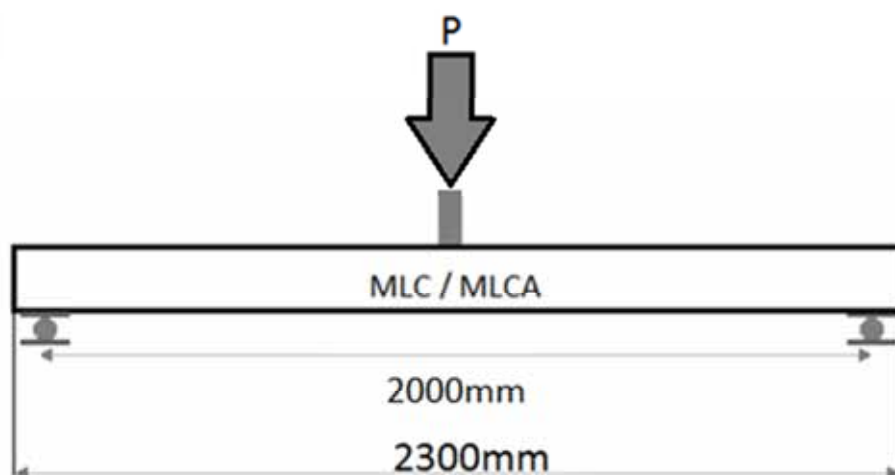


Figura 3- Esquema de flexão estática

### 3.3.3. Análise da flecha (Estados Limites de Serviço E.L.S.)

O valor da carga  $P$  a ser aplicada a estrutura será também avaliada impondo-se uma flecha limite estabelecida pela ABNT (NBR 7190: 1997), com o valor de  $L/200$ . Para o cálculo da flecha na condição estática da Fig. 3, tem-se a Eq. (9)

$$u = \frac{PL^3}{48 E_{MLC} I_{eq}} \quad (9)$$

### 3.3.4. Análise do módulo de elasticidade

Para a obtenção dos módulos de elasticidade através de ensaios mecânicos de flexão será utilizada a Eq. 10, tendo como referência a recomendação da ABNT (NBR 7190: 1997).

$$E_{MLC} = \frac{(P_{50\%} - P_{10\%})L^3}{(u_{50\%} - u_{10\%})48 I_{eq}} \quad (10)$$

Onde:  $P_{50\%}$  e  $P_{10\%}$  = cargas correspondentes a 50% e 10% da carga máxima estimada, aplicada ao corpo-de-prova, em newtons;  $u_{50\%}$  e  $u_{10\%}$  = deslocamentos no meio do vão correspondentes a 50% e 10% da carga máxima, em metros;  $I_{eq}$  = Momento de Inércia do corpo-de-prova.

### 3.3.5. Análise da rigidez

A rigidez dos corpos (D) é produto de duas propriedades dos materiais: momento de inércia (I) e Módulo de elasticidade (E), através desta relação é possível explicitar o módulo de elasticidade do material MLCA, Eq. (11).

$$D = I . E \quad (11)$$

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram produzidos um total de 06 protótipos de vigas laminadas coladas que após prensagem e cura apresentaram as seções transversais de 6,5 cm x 10,5 cm e 230 cm de comprimento. Cada viga foi montada com 06 lâminas horizontais. As vigas não armadas foram denominadas de MLC01, MLC02 e MLC03. Já, as vigas armadas foram denominadas MLCA01, MLCA02 e MLCA03.

### 4.1. Materiais

#### 4.1.1. Madeira

Para a confecção dos protótipos de vigas utilizados neste trabalho foram adquiridas lâminas de madeira no comércio da região de Salto - SP denominada Pinus sp. Como o objetivo deste trabalho é avaliação comparativa de vigas MLC e MLCA, esse fato não foi de grande importância tendo em vista que as vigas foram produzidas com madeira de um mesmo lote.

As lâminas de Pinus foram compradas com dimensões comerciais de 2 cm x 7 cm x 300 cm, oriundas de árvores recém abatidas, estando, assim, com um teor de umidade muito próximo à saturação. Essas lâminas foram submetidas ao processo de secagem natural.

#### 4.1.2. Adesivos

Para a união das lâminas, tanto nas vigas de MLC quanto nas de MLCA, foi utilizado o adesivo *Poliuretano mono-componente, com o nome comercial de Cascola PU, apto à colagem de elementos estruturais*, cujo preço varia de R\$ 40,00 à R\$ 100,00 por kg (Cotação em março de 2011).

Os vergalhões de aço das vigas de MLCA foram fixados com outro tipo de adesivo, neste caso utilizou-se o adesivo com base Epóxi, que é um produto bi-componente de elevada resistência mecânica, com função de preenchimento dos espaços vazios gerados entre o vergalhão de aço nervurado e o sulco de alojamento feito na viga, *o quilograma varia entre R\$ 29,00 à R\$ 47,00 (Cotado em março de 2011)*.



### **4.1.3. Aço**

Foram utilizadas barras de aço para concreto armado CA50, com bitolas de 10 mm, cujas nervuras possibilitam maior adesão do adesivo epoxi.

### **4.1.3. Equipamentos**

Para a confecção dos protótipos e dos cavaletes para montagem dos mesmos, foram utilizados alguns equipamentos elétricos tais como furadeira de bancada, serra circular para madeira, solda elétrica, torquímetro de haste, desengrossadeira e ferramentas pequenas diversas como chaves, parafusos, aplicador de cola etc.

### **4.1.4. Ensaio**

Para uma maior exatidão dos resultados, as vigas de MLC foram ensaiadas em uma máquina universal de ensaios EMIC modelo DL 30000 (figura 4) com capacidade de 300 kN equipada com uma célula de carga de 2 toneladas e o software Tesc v. 3.05. Já as vigas de MLCA foram ensaiadas na EMIC e em um pórtico (figura 5), confeccionado na própria Unicamp para ensaios em postes, equipado com uma célula de carga de 50 toneladas, os sensores foram conectados ao aquisitor de dados Spider8 (figura 5), da HBM, e ao software Catman easy V. 2.2.



**Figura 4–EMIC modelo: DL30000 –Catálogo EMIC**



**a) Pórtico para ensaios**



**b)Aquisitor de dados Spider8**

**Figura 5–Pórtico e aquisitor de dados dos ensaios**

## 4.2. Métodos

### 4.2.1. Preparação das lâminas para a colagem

Para a confecção dos protótipos, as madeiras adquiridas foram tabicadas em um galpão coberto, conforme Figura 6, com constante passagem de ventos, para uma secagem lenta e gradual. Após 55 dias de secagem as lâminas foram levadas a uma marcenaria da região de Salto-SP para que todas as lâminas fossem desengrossadas e uniformizadas com aproximadamente 1,75 cm de espessura.

Registra-se que antes da montagem das vigas, as lâminas foram classificadas segundo critério visual em três tipos:

- Completamente sem defeito;
- Com defeitos leves (desenho de nós);
- Descarte. Estas peças apresentavam nós mortos (ocos), rachaduras, falha na operação de desengrosso ou qualquer tipo de defeito que comprometesse a resistência mecânica ou a operação de montagem do MLC e MLCA.

Cada viga foi montada com lâminas tomadas aleatoriamente, porém, tomando o cuidado de garantir que as lâminas mais externas de todas as vigas fossem peças completamente sem defeito, já que são nas bordas de topo e base ocorrem as maiores tensões normais. As regiões mais próximas da linha neutra das vigas foram compostas pelas lâminas com defeitos leves dispostas aleatoriamente.



**Figura 6 - Tabicagem das madeiras verdes**

### 4.2.3. Preparação dos berços de colagem

Foram necessários cavaletes que servissem como moldes para a prensagem das vigas e resistissem esforços laterais das lâminas possivelmente

empenadas. Com uma solda elétrica de manutenção convencional e perfis de aço foram confeccionados quatro cavaletes, assim como mostra a figura 7.



**Figura 7 - Cavalete confeccionado para modelagem da viga**

#### **4.2.4. Preparo dos adesivos e processo de colagem**

Para a colagem das laminas das vigas de MLC e MLCA o adesivo Cascola PU foi espalhado com uma espátula (figura 8), logo em seguida, uma a uma, as laminas foram encaixadas nos gabaritos de colagem (figura 7) e em seguida, prensadas.



**Figura 8 - Aplicação do adesivo Cascola PU**



**Figura 9 - Processo de colagem em andamento**

O tempo de colagem foi de 8 horas e pressão de 0,5MPa para todos os protótipos, com base nas recomendações do fabricante do adesivo de laminação (adesivo PU) constante no ANEXO A. Esta pressão foi alcançada através do uso de fardos compostos por barras roscadas de  $\varnothing 10\text{mm}$  (5 fardos, 10 barras ao todo) e um torquímetro de vara. A memória de cálculo para o torque de prensagem está descrita no APÊNDICE A.

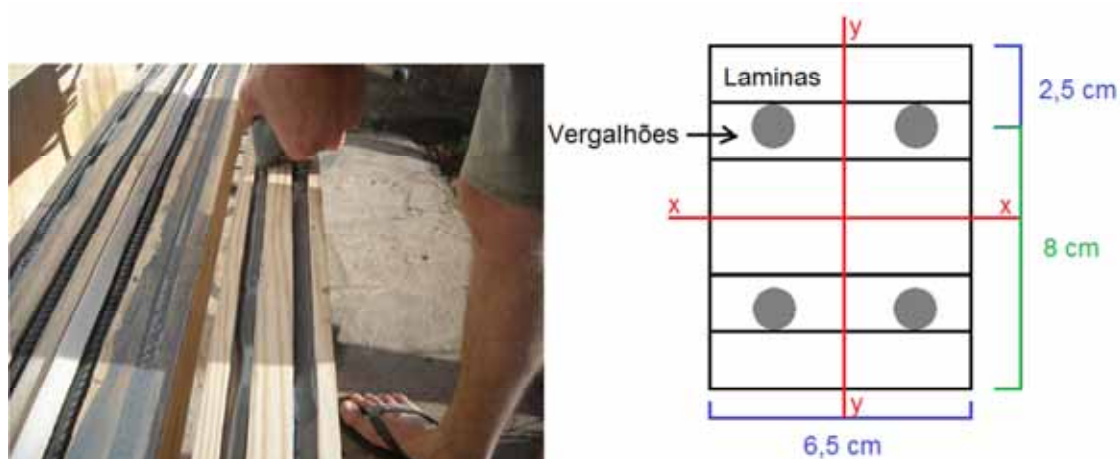
Para as vigas do MLCA o processo ocorreu em três etapas:

- Colagem do núcleo da alma, onde as 4 lâminas mais internas foram unidas;
- Abertura de canal para os vergalhões (figura 10);
- Fixação dos vergalhões com adesivo epóxi (figura 11);
- Colagem das capas externas recobrimo as almas, conforme figura 9.

O processo de colagem das lâminas do MLCA foi rigorosamente igual ao do MLC, e o Esquema de montagem dos vergalhões detalhado na figura 11, de maneira que todas as vigas tivessem altura de 10,5 cm.



**Figura 10– Abertura do sulco para acomodação dos vergalhões**



**a) Aplicação de adesivo e fixação dos vergalhões b) Seção transversal**  
**Figura 11– Execução e detalhe construtivo da viga MLCA**

#### 4.2.5. Ensaios

Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais e de estruturas da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP.

Para obter-se o módulo de elasticidade dos corpos-de-prova foram realizados ensaios de flexão bi-apoiado (figura 12) de acordo com a norma brasileira NBR 7190 de 1997, com uma taxa de aquisição de dados de 8Hz, deslocamento constante de 8 mm/min, com distâncias entre apoios de 2 m, carga aplicada no centro do vão e a razão de  $L/h$  dos corpos-de-prova de aproximadamente 20 vezes.

Tanto as vigas de MLC quanto as vigas de MLCA tiveram suas curvas de carga obtidas na prensa EMIC, contudo, as cargas máximas de ruptura dos MLCA foram obtidas no pórtico.





a)MLC - EMIC

b) MLCA - pórtico

**Figura 12–Ensaio dos protótipos de vigas**

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1. Desempenho estrutural

Por meio dos ensaios foram obtidas as curvas (carga x deslocamento) para os protótipos, mostrados nas figuras 13, 14 e 15, dados que possibilitaram o cálculo do produto de rigidez (inércia x módulo de elasticidade), evidenciando o ganho de desempenho mecânico das vigas de MLCA em relação às vigas de MLC. Nas Figuras 13 a 15 também são apresentadas flechas limites (Estado Limite de Serviço - ELS) obtidas da relação  $L/200$ .

Pode-se notar através da Figura 13 que as vigas que compõem o grupo de MLC apresentaram comportamentos similares entre si, caracterizados por um segmento linear e seguido de trecho curvo mais definido que para as vigas MLCA. A similaridade para as vigas do grupo MLCA também pode ser observada na Figura 14, predominando, no entanto, o comportamento linear.

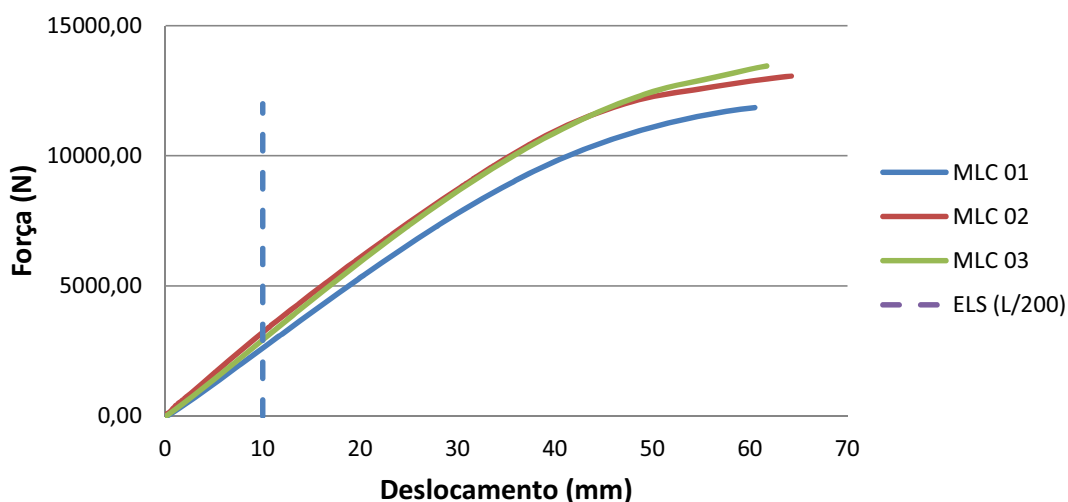
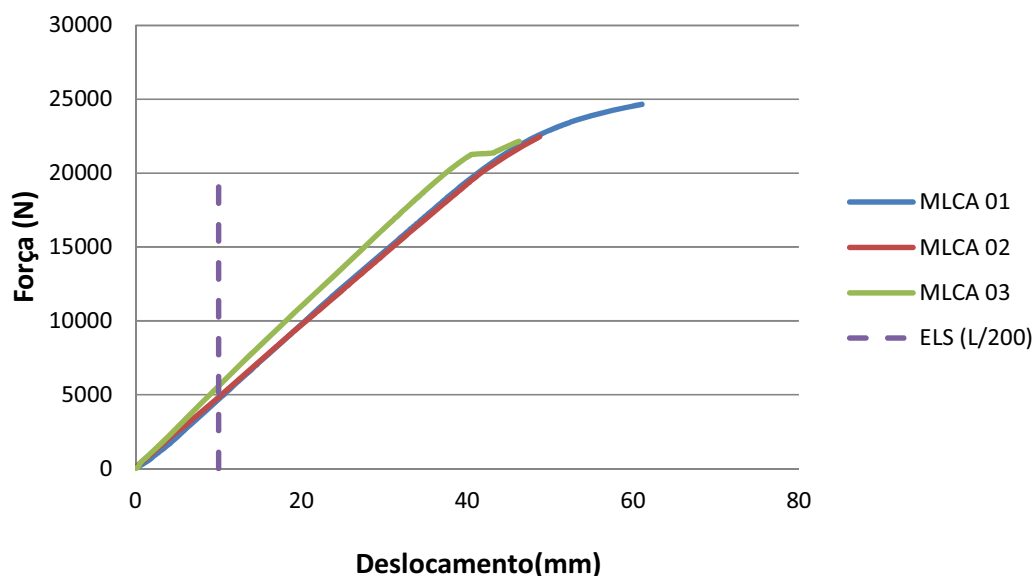


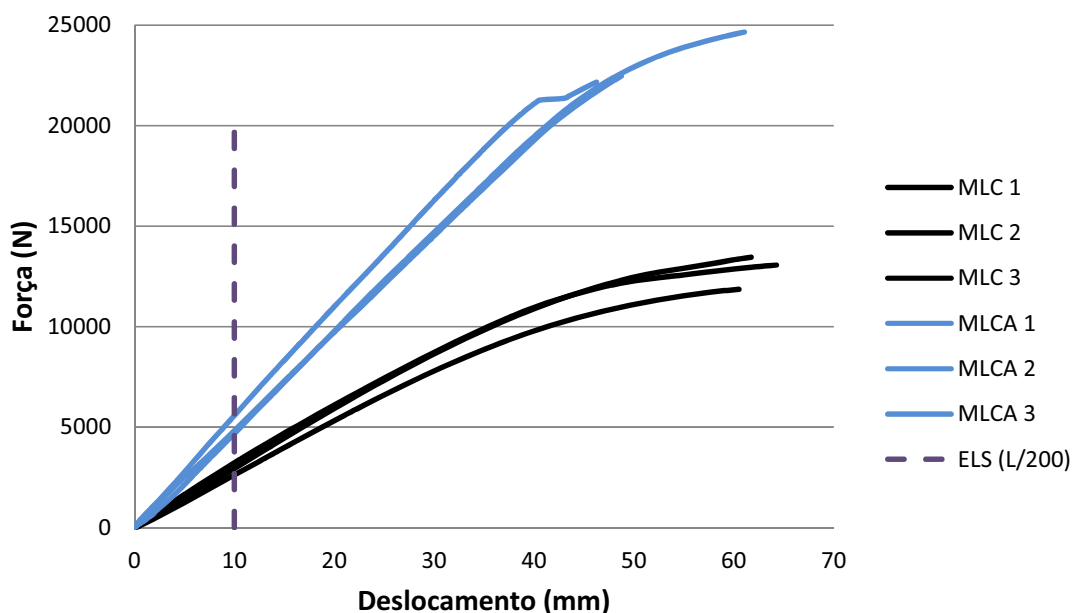
Figura 13 - Força x deslocamento MLC





**Figura 14 - Força x deslocamento MLCA**

Da análise da Fig.15, pode-se notar que vigas armadas MLCA proporcionaram as maiores rigidezes tendo em vista que as curvas que representam o comportamento (força x deslocamento) são mais íngremes que aquelas que representam as vigas de MLC.



**Figura 15 - Força x deslocamento MLC - MLCA**

O valor do momento de inércia das vigas de MLC foi obtido a partir das dimensões dos protótipos, já o cálculo do módulo de elasticidade através da Eq. 10 com os dados da Tab. 1.

**Tabela 1– Médias dos resultados de ensaio.**

Protótipo	Média dos carregamentos (N)			Médias dos deslocamentos (mm)	
	$P_{rup}$	$0,5 P_{rup}$	$0,1 P_{rup}$	$u(0,5 P_{rup})$	$(0,1 P_{rup})$
MLC	12787	6393,5	1278,7	22,58	4,50
MLCA	23085	11542,5	2308,5	22,74	5,65

Através do módulo de elasticidade do MLC, utilizando-se a Eq. 2 e assumindo o módulo de elasticidade do aço CA-50 igual a 210000 MPa, obteve-se o fator  $\alpha_e' = 27,93$ , sendo, assim, possível o cálculo do momento de inércia equivalente do MLCA. Estes resultados estão dispostos na Tab. 2.

**Tabela 2 - Módulos de elasticidade obtidos a partir do momento de inércia equivalente.**

Protótipos	Momento de inércia (cm <sup>4</sup> ) (calculado)	Módulo de elasticidade (MPa) (ensaiado)
MLC	627,05	7519,30
MLCA	1266,99	7107,76

Para demonstrar a eficiência do modelo matemático com os resultados encontrados nos ensaios assume-se pela Eq.11 que a rigidez do material (D) é o produto do momento de inércia (I) pelo módulo de elasticidade (E), tendo assim três situações mostradas abaixo.

- A rigidez real dos protótipos MLC é obtida dos ensaios e isolando-se o produto E.I da Eq. 11:

$$D_{MLC(real)} = I_{MLC} \cdot E_{(MLC)ensaio} = 627,05 \times 7519,0 = 4,715 \times 10^8 \text{ N.cm}^2$$

- A rigidez calculada para o grupo MLCA, com base na homogeneização da seção transversal, é obtida por:

$$D_{MLCA(calc)} = I_{MLCA} \cdot E_{MLC(ensaio)} = 1266,99 \times 7519,30 = 9,527 \times 10^8 \text{ N.cm}^2$$

- A rigidez real dos protótipos MLCA é obtida dos ensaios e por isolamento do produto EI da Eq.11.

$$D_{MLCA(real)} = I_{MLCA} \cdot E_{(MLCA)ensaio} = 1266,99 \times 7107,76 = 9,005 \times 10^8 \text{ N.cm}^2$$

Para a determinação do  $D_{MLCA(calc)}$  utiliza-se o valor de  $E_{MLC}$  assumindo que todo o incremento de rigidez esta no momento de inércia.

Assim sendo a relação entre os valores real e calculado é expresso por:

$$\frac{D_{mlca(real)}}{D_{mlca(calc)}} = 94,5\%$$

Essa relação expressa que o método da seção homogeneizada uma boa aproximação para o dimensionamento de peças MLCA, uma vez que relação entre rigidezes real e calculada resultaram próximas. A pequena discrepância pode ser atribuída a vários fatores, tais como: diferença no processo artesanal de construção dos protótipos; falta de especificação das propriedades do aço, obrigando a assumir o valor de módulo de elasticidade; variabilidade do material base (madeira).

Pelo fato do MLCA ser constituído da solidarização de dois materiais com propriedades distintas (MLC e aço), trabalhando de maneira monolítica, pode-se entender o MLCA como um material com propriedades mecânicas próprias. Tendo em vista as mesmas condições estáticas de ensaios, bem como mesma seção bruta para todas as vigas (65 mm x 105 mm), pode-se exprimir a eficiência da MLCA em relação à MLC pela relação dos produtos de rigidezes:

$$\frac{D_{mlca(real)}}{D_{mlc(real)}} = \frac{9,005 \times 10^8}{4,715 \times 10^8} = 1,91$$

O aumento da rigidez proporcionado pelo sistema armado resultou num ganho na capacidade de carga do grupo MLCA em relação MLC, o que pode ser visto na Tab. 1 pelos valores médios da carga de ruptura.

Do ponto de vista dos Estados Limites de Serviço (ELS), tendo em vista as flechas limites para ambos os sistemas (MLC e MLCA), pode-se notar com os limites extraídos dos resultados experimentais e apresentados na Tab. 3 que a carga correspondente a flecha (L/200) para o MLCA foi 90,99% superior ao grupo MLC.

**Tabela 3 - Carga limite para flecha L/200 (ELS)**

Protótipos	P (limite de serviço) (N)	Ganho (%)
MLC	2828,97	-
MLCA	5403,16	90,99

## 5.2 Aspectos da exequibilidade

No caso das vigas confeccionadas para este projeto, tanto MLC quanto MLCA, foram produzidos a partir do mesmo processo “base”, apenas diferindo, no caso do MLCA, a etapa intermediária de fixação da armadura. Acredita-se, portanto, ser possível a implementação deste método em escala industrial, em peças maiores e mais complexas, esperando-se ganhos de mesma magnitude.

Levando em conta que as madeiras utilizadas são comercializadas como “madeira de caixaria”, sem nenhuma pretensão estrutural, ambas as técnicas (MLC e MLCA) promovem uma agregação de valor muito elevada para este tipo de material, direcionando-o para fins mais nobres.

A técnica do MLCA possibilita, em relação a MLC, redução na quantidade de madeira empregada nas peças estruturais e conseqüentemente a redução da quantidade de adesivo de laminação, havendo portanto um consumo de aço e adesivo epóxi para solidarização.

Assim, é possível obter com a técnica do MLCA peças estruturais mais leves, com seções transversais menores e, ao mesmo tempo mais resistentes do que se fossem confeccionadas em madeira laminada colada.

### 5.3. Aspectos da ruptura

Os protótipos de MLC e MLCA quando solicitados até a carga de ruína falharam por ruptura das fibras de madeira sem que houvesse falha na linha de colagem, como mostrado nas figuras 16 e 17. Pode-se perceber também, que a armadura do MLCA conteve a ruptura do protótipo limitando-a as duas primeiras lâminas de madeira, enquanto o MLC cinco das seis lâminas se rompeu.



**Figura 16-Perfil de Ruptura do MLC**



**Figura 17 - Perfil de ruptura do MLCA**

## 6. CONCLUSÃO

Da análise experimental do desempenho de protótipos de MLC e MLCA, considerando-se vigas com seções transversais de 65 mm x 105 mm, pode-se concluir que:

O sistema MLCA proporcionou uma rigidez 91% superior a rigidez do sistema MLC. O maior produto de rigidez implicou num aumento da carga de ruptura do grupo de vigas de MLCA, sendo 80,53% superior ao MLC. Do ponto de vista dos ELS, para a flecha limite ( $L/200$ ), para o grupo MLCA a correspondente carga foi 90,99% superior ao grupo MLC.

O método da seção homogeneizada mostrou-se coerente aos resultados experimentais, diferindo apenas em 5,5%, nos resultados cálculos das rigidezes.

Por se tratar de uma técnica ainda em desenvolvimento a madeira laminada colada armada necessita de mais estudos para comprovar as suas propriedades, exequibilidade e viabilidade econômica.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7190: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

AZAMBUJA, M. A. Estudo Experimental de Adesivos para Fabricação de Madeira Laminado Colado: avaliação de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas. 2006. 159 f. Tese (Doutorado) - USP, São Carlos, 2006.

BAYER. Adesivos PURBOND. para estruturas de madeira. Disponível em: <[http://www.purbond.com/purbond/files/4-6-2009\\_19-29-12\\_PurbondBayerBroschuerePortugiesisch95.pdf](http://www.purbond.com/purbond/files/4-6-2009_19-29-12_PurbondBayerBroschuerePortugiesisch95.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2011.

CAMACHO, J. S. Concreto Armado: Estados Limites de Utilização. Ilha Solteira: Núcleo de Ensino e Pesquisa da Alvenaria Estrutural – Nepae, 2005. 31-38 p.

CASCOLA. Cascola PU – Monocomponente. Disponível em: <<http://www.cascola.com.br/Linha.aspx?nome=pu>>. Acesso em: 15 mar. 2011.

LUCA, V. De; MARANO, C..A Comparison of Un-reinforced and Reinforced Glulam Timber with Steel Bars. European Journal Of Technology And Advanced Engineering Research, Potenza, Italy, p. 45-54. abr. 2006.

MADEIRA ESTRUTURAL. Estruturas De Madeira. Disponível em: <<http://madeiraestrutural.wordpress.com>>. Acesso em: 20 maio 2011.

RUSSELL, M. C.; ROLAND, H.; JEN, L. Y. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. Madison, Wisconsin: Usda, 1999. 256-280 p.

ZANGIÁCOMO, A. L. Emprego de Espécies Tropicais Alternativas Na Produção de Elementos Estruturais de Madeira Laminada Colada. 2003. 103 f. Tese (Mestrado) - Lamem, São Carlos, 2003.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A – CÁLCULO DO TORQUE PARA FORÇA DE PRENSAGEM.

Área de Prensagem

$$A = b.l = 6,5 \times 200 = 1300 \text{ cm}^2 \text{ ou } 130000 \text{ mm}^2$$

- A quantidade de barras utilizadas foi igual a 10, quantidade escolhida arbitrariamente por uma questão de arranjo na prensagem.
- Como as barras-roscada não eram classificadas adotou-se a classe mais inferior CL 4.6.
- Pressão necessária para prensagem informada pelo fabricante é de 0,5 N/mm<sup>2</sup>

Força de prensagem:

$$F = 0,5 \times 130000 = 65000N$$

Dividindo a força total pela quantidade de barras temos:

$$65000/10 = 6500N$$

O torque necessário é dado por:

$$T = C.D.F$$

Onde: C é o coeficiente de correção = 0,15 - com lubrificação ou 0,20 - sem lubrificação

D é o diâmetro da Barra (mm)

$$T = 0,15 \times 10 \times 6500 = 9750 \text{ N.mm ou } 0,98 \text{ Kgf.m}$$

Segundo tabela de resistências, apresentada em aula da disciplina de componentes de máquinas do professor Manoel Cléber de Sampaio Alves, o torque máximo que uma barra roscada de diâmetro de 10 mm suporta é de 2,72 kgf.m.

Sendo assim as 10 barras de 10 mm de diâmetro são suficientes e a pressão de prensagem necessária é alcançada com um torque de 1kgf.m.



## ANEXO

### ANEXO A – CATÁLOGO CASCOLA PU MONOCOMPONENTE

# CASCOLA PU MONOCOMPONENTE

#### O que é?

CASCOLA PU MONOCOMPONENTE (Poliuretano) é um adesivo pronto para o uso, que proporciona alta força de colagem após seco, indicado para vários tipos de substratos, como madeira, pedra, metal e plástico (exceto PE, PP, PTFE\* (\*resina antiaderente) e PVC), sendo especialmente indicado para as colagens estruturais, à prova de água fria ou fervente (Nível D4, conforme DIN EN 204) e da ação de intempéries. Não é indicado para colagens que fiquem permanentemente submersas em água.

#### Modo de Usar:

- Aplique o adesivo com uma espátula de plástico (PE) lisa ou dentada em um dos lados da superfície a ser colada. Em seguida, utilize o sistema de prensagem a frio.
- A pressão aplicada dependerá do tipo, forma e estrutura do material colado, variando de 0,3 N/mm<sup>2</sup> a 0,5 N/mm<sup>2</sup>.
- A força da colagem ocorrerá após 24 horas e poderá aumentar dependendo da pressão aplicada.
- O tempo de pressão (à temperatura ambiente de 25 °C e umidade relativa do ar a 50%) variará de 3 a 5 horas (dependendo do material a ser colado).
- O tempo máximo entre a aplicação do adesivo e a união das peças (nas condições mencionadas) será de 60 min.
- Atenção: Deve ser manuseado em locais ventilados ou com exaustão mecânica. Em caso de manuseio por longos períodos ou em grandes quantidades, use máscara contra gases. Proteja as mãos com luvas impermeáveis e os olhos com óculos de proteção. Em caso de reações adversas, procure auxílio médico.

#### Embalagem:

1kg

#### Fonte:

## ANEXO B – TABELAS DE CLASSE E RESISTENCIA DE CONIFERAS

Licença de uso exclusivo para Petrobrás S/A  
Cópia impressa pelo Sistema Target CENWeb

92

NBR 7190:1997

**Tabela E.3 - Valores médios de madeiras coníferas nativas e de florestamento**

Nome comum (coníferas)	Nome científico	$\rho_{ap}$ (12%) <sup>1)</sup> kg/m <sup>3</sup>	$f_{cd}$ <sup>2)</sup> MPa	$f_{td}$ <sup>3)</sup> MPa	$f_{td90}$ <sup>4)</sup> MPa	$f_v$ <sup>5)</sup> MPa	$E_{cd}$ <sup>6)</sup> MPa	<sup>7)</sup> n
Pinho do Paraná	<i>Araucaria angustifolia</i>	580	40,9	93,1	1,6	8,8	15 225	15
<i>Pinus caribea</i>	<i>Pinus caribea var. caribea</i>	579	35,4	64,8	3,2	7,8	8 431	28
<i>Pinus bahamensis</i>	<i>Pinus caribea var. bahamensis</i>	537	32,6	52,7	2,4	6,8	7 110	32
<i>Pinus hondurensis</i>	<i>Pinus caribea var. hondurensis</i>	535	42,3	50,3	2,6	7,8	9 868	99
<i>Pinus elliotii</i>	<i>Pinus elliotii var. elliotii</i>	560	40,4	66,0	2,5	7,4	11 889	21
<i>Pinus oocarpa</i>	<i>Pinus oocarpa shiede</i>	538	43,6	60,9	2,5	8,0	10 904	71
<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus taeda L.</i>	645	44,4	82,8	2,8	7,7	13 304	15

<sup>1)</sup>  $\rho_{ap}(12\%)$  é a massa específica aparente a 12% de umidade.  
<sup>2)</sup>  $f_{cd}$  é a resistência à compressão paralela às fibras.  
<sup>3)</sup>  $f_{td}$  é a resistência à tração paralela às fibras.  
<sup>4)</sup>  $f_{td90}$  é a resistência à tração normal às fibras.  
<sup>5)</sup>  $f_v$  é a resistência ao cisalhamento.  
<sup>6)</sup>  $E_{cd}$  é o módulo de elasticidade longitudinal obtido no ensaio de compressão paralela às fibras.  
<sup>7)</sup> n é o número de corpos-de-prova ensaiados.

**NOTAS**

1 Coeficiente de variação para resistências a solicitações normais  $\delta = 18\%$ .  
2 Coeficiente de variação para resistências a solicitações tangenciais  $\delta = 28\%$ .

Coníferas					
(Valores na condição-padrão de referência U = 12%)					
Classes	$f_{cdk}$ MPa	$f_{vdk}$ MPa	$E_{cd,m}$ MPa	<sup>1)</sup> $\rho_{bas,m}$ kg/m <sup>3</sup>	$\rho_{aparente}$ kg/m <sup>3</sup>
C 20	20	4	3 500	400	500
C 25	25	5	8 500	450	550
C 30	30	6	14 500	500	600

<sup>1)</sup> Como definida em 6.1.2.