

PAINÉIS LVL DE EUCALIPTO ESTIMATIVA DA PORCENTAGEM DE DELAMINAÇÃO

Francisco Antonio Rocco Lahr (frocco@sc.usp.br) LaMEM-SET-EESC-USP
Alexandre Monteiro de Carvalho (amcarvalho@ufrj.br)
José Maria Saporiti Machado (saporiti@lnec.pt) LNEC-Lisboa

RESUMO

Os painéis estruturais LVL, ou "laminated veneer lumber" constituem um produto da nova geração dos derivados de madeira, com grande potencial para substituir parte da madeira de espécies nativas, utilizada como peças estruturais na construção civil. O foco deste trabalho é a descrição do processo de avaliação da qualidade da colagem de painéis LVL de eucalipto, cujos ensaios foram orientados pela norma EN 391: Glued laminated timber - Delamination test of glue lines. Os testes foram realizados em uma parceria estabelecida entre o Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, Departamento de Engenharia de Estruturas, EESC-USP, Brasil, e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Lisboa, Portugal.

Palavras-chave: LVL, painel, colagem

ABSTRACT: Laminated veneer lumber - LVL constitutes a product of the new generation of wood based panels, with great potential to substitute part of the native wood used in the civil construction. In this work, the focus is to describe the proceedings for evaluation bonding quality of eucalyptus LVL panel, based on the recommendations of EN 391: Glued laminated timber - Delamination test of glue lines". The tests were carried out in a partnership established between Wood and Timber Structures Laboratory, Department of Structural Engineering, EESC-USP, Brazil, and the National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal.

Keywords: LVL, panel, bonding

1 INTRODUÇÃO

São vários os produtos classificados atualmente no mercado internacional como engineered “wood products”, ou “produtos engenheirados de madeira”, entre eles os painéis de lâminas ou de partículas, as chapas de fibra e a madeira laminada colada. Desenvolvidos com características específicas, em algumas situações, estes materiais apresentam utilizações semelhantes, fazendo com que a escolha entre um ou outro, e também a comparação com o uso da madeira maciça seja um processo detalhado, envolvendo uma série de fatores oriundos da relação custo/benefício.

Em estudos desenvolvidos por Luxford (1944)⁽¹⁾, citado por Schaffer (1972)⁽²⁾, surgiu a idéia de se colar lâminas de madeira no mesmo sentido, ou seja, com a orientação das fibras paralelas umas às outras, para produção de elementos estruturais de aviões. No trabalho o autor utilizou lâminas de 3,6mm, coladas a frio, e deu origem ao material que hoje é conhecido como “laminated veneer lumber”.

O Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira - LaMEM, do Departamento de Engenharia de Estruturas - SET, da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC, da Universidade de São Paulo - USP, vem desenvolvendo trabalhos de pesquisa com painéis LVL de eucalipto que envolvem sua produção piloto e a análise de sua qualidade.

No ano de 2004, foi estabelecido um programa de intercâmbio entre o LaMEM e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, de Lisboa/Portugal, através do qual foram realizados ensaios de avaliação da qualidade da colagem de painéis LVL de eucalipto produzidos em escala de laboratório no Brasil, nas dependências do LNEC. Tais ensaios seguiram procedimentos descritos na norma europeia EN 391: Glued laminated timber - Delamination test of glue lines (1995)⁽³⁾, originalmente elaborada para a madeira laminada colada, e adaptada para a avaliação dos LVL's.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi comparar a qualidade da colagem, através de ensaios de delaminação, de painéis LVL de eucalipto produzidos segundo duas condições de gramatura de adesivo e sistema de prensagem.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Materiais

Como matéria prima para a confecção dos painéis LVL's, foi utilizado um híbrido entre as espécies *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake, com idade de 10 anos, implantado por clonagem, com espaçamento de 3 x 2 m, na região da cidade de Mogi Guaçu, estado de São Paulo, Brasil. A produtividade média do *Eucalyptus grandis* x *urophylla* na região é alta, em torno de 50 m³/ha/ano de incremento médio.

Como adesivo, empregou-se resina fenólica à base de fenol-formaldeído, usual para a fabricação deste tipo de painéis, em muitas partes do mundo.

3.2 Métodos

3.2.1 Coleta de matéria prima

Foram selecionadas dez árvores, com diâmetro da base em torno de 30 cm, o que correspondeu aos indivíduos de maior porte dentro do plantio.

As árvores foram abatidas descartando-se os 30 cm iniciais do tronco, para que uma parte do fuste de circunferência irregular fosse evitada. Logo após o abate, com o auxílio de uma trena, foram feitas as secções para gerar toras de 2 m de comprimento, total de dez toras, uma de cada árvore. Os dois topos de cada tora foram cobertos com um impermeabilizante, visando reduzir a perda drástica de umidade e problemas de rachaduras.

3.2.2 Laminação

Para a laminação, as toras foram aquecidas por imersão em água quente. As variáveis do aquecimento foram estabelecidas em 71°C de temperatura e 11 horas de permanência no tanque de água aquecida.

As toras foram laminadas em torno desenrolador, fabricante Thoms & Benato, modelo LHT-14, o qual foi regulado para obtenção de lâminas com espessura de 3 mm. A distância horizontal entre faca e contra-faca (abertura horizontal) foi ajustada em 2,7 mm e a distância vertical (abertura vertical) em 0,65 mm. Outras variáveis de ajuste do torno utilizadas foram: ângulo da faca de 90° (variando para 89° em processo automático); ângulo de afiação da faca de 21°; e ângulo da barra de compressão de 15°.

A largura da lâmina contínua, formada na saída do torno, foi definida pelo comprimento da tora no momento da fixação nas garras do torno, ou seja, 1,25 m. Após a saída do torno as lâminas foram seccionadas em guilhotina, gerando dimensões finais para cada uma de 1,25 m (correspondente ao comprimento da tora) x 0,96 m x 3 mm de espessura.

As lâminas permaneceram por um período de, aproximadamente, 40 dias dispostas no secador, que consta de um suporte confeccionado em madeira que permite a disposição horizontal das lâminas, uma a uma, com boa circulação de ar entre elas. As lâminas foram acondicionadas em local coberto, até atingirem um teor de umidade em torno de 11%.

3.2.3 Produção de painéis LVL

As lâminas de dimensões 1,25 m x 0,96 m x 3 mm, cortadas em guilhotina após a saída do torno, foram reduzidas para a largura de 21 cm mantendo o mesmo comprimento e espessura.

As dimensões finais pretendidas para cada painel foram de 1,20 m x 20 cm x 54 mm, sendo utilizadas dezoito lâminas em cada um. As lâminas de 1,25 m de comprimento e 21 cm de largura possibilitaram ainda alguma margem de segurança para ser consumida nas operações de aplainamento do painel.

Na colagem das lâminas utilizou-se uma formulação de adesivo resistente à água e que possibilita a exposição do produto final ao ambiente. A resina fenólica utilizada tem princípio ativo à base de fenol-formaldeído, e vem sendo utilizada amplamente em indústrias de painéis compensados. O adesivo foi aplicado nas lâminas de forma manual, com o auxílio de um rolo de espuma para espalhamento da resina sob a superfície de cada lâmina.

Para comparação foram considerados dois tratamentos em relação ao processo de produção dos LVL's. No Tratamento I, foi utilizada a gramatura de adesivo de 360 g/cm², e a prensagem a quente das lâminas foi realizada em uma etapa única, ou seja, as dezoito lâminas de cada painel foram prensadas em um único ciclo onde as variáveis foram: temperatura de prensagem, 145°C; tempo de prensagem, 40 minutos; e pressão específica, 1,3 MPa.

No Tratamento II, foi utilizada a gramatura de 380 g/cm², e a prensagem a quente foi realizada em três ciclos, sendo prensadas seis lâminas, a seguir dispostas e prensadas mais três lâminas acima e três abaixo e novamente dispostas e prensadas mais três lâminas acima e três lâminas abaixo. As variáveis da prensagem a quente do Tratamento II foram: temperatura de prensagem, 145°C; tempo de prensagem, 3 ciclos de 20 minutos; e pressão específica, 1,3 MPa.

Produziram-se ao todo dezoito painéis LVL, nove de cada tratamento referente aos dois processos de fabricação.

3.2.4 Ensaios de delaminação

As metodologias utilizadas nos dois ciclos de ensaios e apresentadas nos itens a seguir foram desenvolvidas no Núcleo de Madeiras do Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, Lisboa/Portugal, que disponibilizou a infra-estrutura para a avaliação dos corpos-de-prova dos LVL's confeccionados no Laboratório de Madeiras e de Estruturas de Madeira, SET-EESC-USP, Brasil, e levados a Lisboa.

Os ensaios de delaminação foram baseados na norma europeia EN 391: Glued laminated timber – Delamination test of glue lines. Considerando o grande número de linhas de colagem, os ensaios de resistência da ligação madeira/adesivo/madeira se mostram como uma das principais formas de se avaliar a qualidade de uma peça de LVL.

As lâminas que formam o painel possuem alta porcentagem de variação dimensional (considerando o plano tangencial da tora segundo o qual foram produzidas). Isto faz com que a movimentação da madeira ou das lâminas do LVL frente à variação de umidade e temperatura do ambiente solicite severamente as linhas de colagem. Tal fato ocorre principalmente com a utilização de espécies de alto índice de retração/inchamento como é o caso da madeira de eucalipto. Simular condições em que as linhas de colagem sejam extremamente solicitadas e avaliar a porcentagem final de delaminação são os objetivos principais dos procedimentos descritos nas normas de delaminação.

Para a realização dos ensaios de delaminação foram produzidos dezoito corpos-de-prova dos LVL's, com dimensões nominais (75 x 75 x 50) mm, sendo retirado um corpo-de-prova de cada painel produzido.

Os principais equipamentos do LNEC utilizados nos ensaios de delaminação foram: um conjunto de autoclave, bomba de vácuo e bomba de pressurização; uma estufa umedificadora programável com controle dos ciclos de temperatura, umidade relativa e velocidade de circulação do ar; balança e paquímetro digitais. A Fig.1 apresenta os equipamentos utilizados.

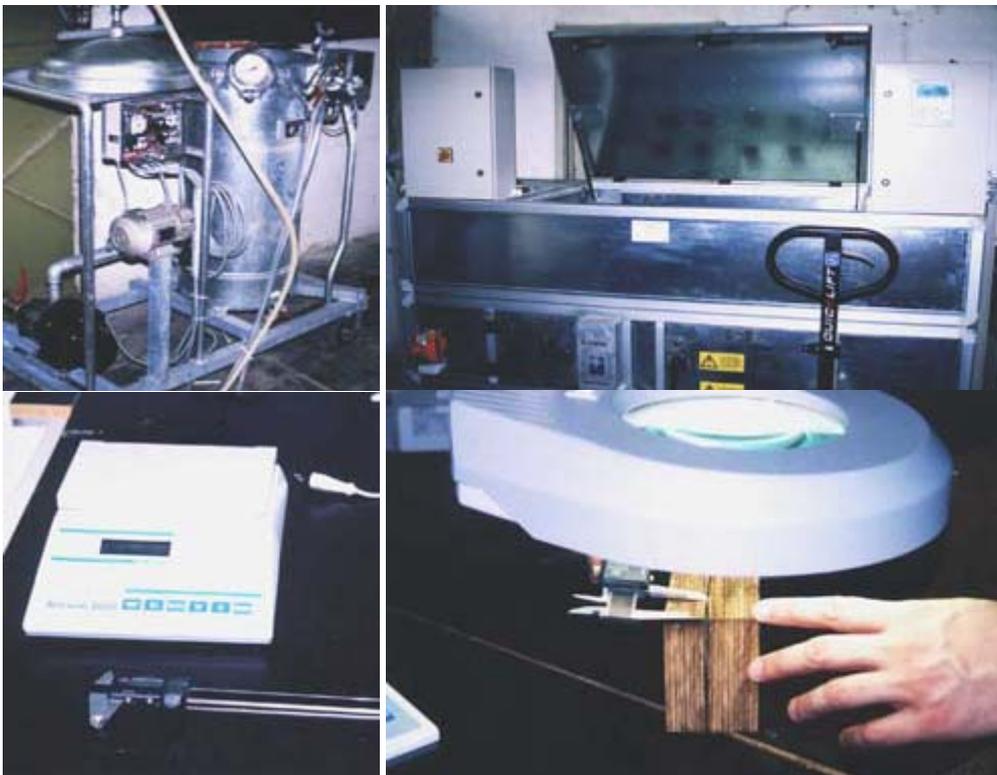


Figura 1 - Equipamentos utilizados nos ensaios de delaminação.

Foram realizados dois ciclos de ensaio orientados pela norma EN 391. No primeiro ciclo, ou Ciclo 01, os corpos-de-prova ensaiados e a metodologia utilizada foram:

- 4 amostras ou repetições dos LVL's confeccionados com 360 g/m² de gramatura de cola;
- 5 amostras ou repetições dos LVL's confeccionados com 380 g/m² de gramatura de cola;
- na autoclave os corpos-de-prova foram submersos em água e aplicou-se por 30 minutos vácuo de 25 kPa;
- a seguir, aliviou-se o vácuo e aplicou-se, por 120 minutos, uma pressão de 650 kPa;
- este ciclo de vácuo e pressão foi repetido nas mesmas condições;
- os corpos-de-prova foram retirados da autoclave e colocados na estufa umedificadora;
- os corpos-de-prova permaneceram na estufa por 90 horas, com temperatura ajustada para 30°C, umidade relativa de 30% e circulação do ar de 2 m/s.

A avaliação dos resultados da delaminação em cada corpo-de-prova foi feita da seguinte forma: os quatro lados de cada amostra foram medidos com o auxílio de um paquímetro para se determinar o

comprimento linear total das linhas de cola; a seguir foram medidas todas as fendas de delaminação existentes, conforme o detalhe da Fig. 2.



Figura 2 - Medição das fendas de delaminação.

A porcentagem de delaminação total de cada corpo-de-prova foi calculada a partir das Eq. (1), (2) e (3):

$$\%DT = \frac{L_{TotDel}}{L_{TotCola}} \cdot 100$$

(1)

Onde:

$\%DT$ = porcentagem de delaminação total

L_{TotDel} = comprimento total das fendas de delaminação

$L_{TotCola}$ = comprimento total das linhas de cola

$$L_{TotDel} = \sum L_{fDel}$$

(2)

$$L_{TotCola} = \sum L_{icola} = \left(\sum L_{latcp} \right) \times 17$$

(3)

Onde:

L_{fDel} = comprimento de cada fenda de delaminação

L_{icola} = comprimento de cada linha de cola

L_{latcp} = comprimento lateral de cada corpo-de-prova (total de quatro lados)

17 = corresponde ao número de linhas de cola

No segundo ciclo do ensaio de delaminação, ou Ciclo 02, os corpos-de-prova ensaiados e a metodologia utilizada foram:

- 5 amostras ou repetições dos LVL's confeccionados com 360g/m² de gramatura de cola;
- 4 amostras ou repetições dos LVL's confeccionados com 380g/m² de gramatura de cola;
- na autoclave os corpos-de-prova foram submersos em água e aplicou-se, por 5 minutos, vácuo de 25 kPa;

- a seguir, aliviou-se o vácuo e aplicou-se, por 60 minutos, uma pressão de 650 kPa;
- este ciclo de vácuo e pressão foi repetido nas mesmas condições;
- os corpos-de-prova foram retirados da autoclave e colocados na estufa umedificadora;
- os corpos-de-prova permaneceram na estufa, por 22 horas, com temperatura ajustada para 65°C, umidade relativa de 15% e circulação do ar de 2 m/s;
- todo o procedimento acima foi repetido mais uma vez nos mesmos corpos-de-prova.

Para a avaliação da porcentagem de delaminação das amostras foi adotada a mesma metodologia descrita no item anterior.

3.2.5 Análise estatística

Para os resultados encontrados nos dois tratamentos, foram realizadas análises de variância (Teste F) conduzidas ao nível de 5% de significância, onde foram observadas diferenças significativas entre as médias foram realizados testes de Tukey.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são apresentados os resultados dos dois ciclos do ensaio de delaminação nas amostras dos LVL's de eucalipto. O Ciclo 01 representou a seqüência menos drástica de saturação em água e secagem dos corpos-de-prova e os resultados da porcentagem de delaminação são mostrados na Tab. 1.

Tabela 1 - Resultados do ensaio de delaminação Ciclo 01*

Corpo-de-prova **	Somatória das fendas de delaminação (mm)	Somatória das linhas de cola (mm)	Porcentagem de delaminação (%)	Porcentagem de Delaminação Média e CV
1	195	5304	3,67	4,04 17,9
2	268	5222	5,13	
3	195	5325	3,67	
4	198	5378	3,69	
5	45	5273	0,86	1,08 73,5
6	74	5283	1,39	
7	6	5361	0,11	
8	118	5265	2,25	
9	42	5224	0,80	

* Vácuo em água (30 min, 25 kPa), Pressão em água (120 min, 650 kPa), Secagem (30°C, 90 h, 30%U.R.)
 ** 1 a 4 = Tratamento I, gramatura de 360 g/cm² em ciclo único de prensagem a quente
 5 a 9 = Tratamento II, gramatura de 380 g/cm² em três ciclos de prensagem a quente

O coeficiente de variação das amostras de 5 a 9 foi bastante elevado, fato que se justifica por alguns corpos-de-prova praticamente não apresentarem fendas de delaminação.

Constatou-se a melhor condição de colagem das lâminas geradas pelo Tratamento II de fabricação dos LVL's. As Tab. 2 e 3, confirmam a diferença significativa entre a média de porcentagem de delaminação encontrada para o Tratamento I em comparação ao Tratamento II no primeiro ciclo do ensaio.

Tabela 2 - Análise de variância para os resultados do Ciclo 01 do ensaio de delaminação

Fonte de variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob>F
Tratamento	1	19,4439	19,4439	33,06	0,00105*
Resíduo	7	4,1171	0,5882		
Total	8	20,5610			

* significativo a 95% de probabilidade

Tabela 3 - Teste de Tukey para as médias de porcentagem de delaminação do Ciclo 01

Fonte de variação: Tratamento	Número de Repetições	% de Delaminação Média (%)	5% *
LVL Tratamento 1	4	4,04	a
LVL Tratamento 2	5	1,08	b

* médias seguidas de letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado

A norma EN 391 não traz especificações de valores limites ou recomendações frente aos resultados de delaminação encontrados. A única referência existente neste sentido encontra-se no documento normativo norte-americano ASTM D 2559-76: Adhesives for structural laminated wood products for use under exterior (wet use) exposure conditions (1976)⁽⁴⁾. No texto, o referido documento estabelece que a delaminação média encontrada para madeiras leves (softwoods) não deve ser superior a 5% e, para madeiras duras (hardwoods) não deve ser superior a 8%. A norma ASTM recomenda procedimentos semelhantes aos estabelecidos pela EN 391 para os ciclos de ensaio, bem como para a sistemática de avaliação dos resultados obtidos.

No Ciclo 02 de ensaio, cujos resultados estão apresentados na Tab. 4, são muito mais severas as condições de saturação em água e secagem das peças. Em decorrência deste fato, as porcentagens de delaminação aumentaram, porém ainda assim não ultrapassaram os valores de referência citados na norma ASTM D 2559-76.

Tabela 4 - Resultados do ensaio de delaminação Ciclo 02*

Corpo-de-prova **	Somatória das fendas de delaminação (mm)	Somatória das linhas de cola (mm)	Porcentagem de delaminação (%)	Porcentagem de Delaminação Média e CV
1	243	5286	4,59	5,33 19,08
2	338	5289	6,38	
3	304	5338	5,69	
4	325	5397	6,02	
5	207	5224	3,96	
6	94	5325	1,77	2,94 52,14
7	222	5386	4,13	
8	77	5270	1,47	
9	231	5251	4,39	

* Vácuo em água (30 min, 25 kPa), Pressão em água (120 min, 650 kPa), Secagem (30°C, 90 h, 30%U.R.)
 ** 1 a 5 = Tratamento I, gramatura de 360 g/cm² em ciclo único de prensagem a quente
 6 a 9 = Tratamento II, gramatura de 380 g/cm² em três ciclos de prensagem a quente

Na Fig. 3, a seguir, estão apresentados detalhes dos corpos-de-prova que foram ensaiados no segundo ciclo de delaminação.

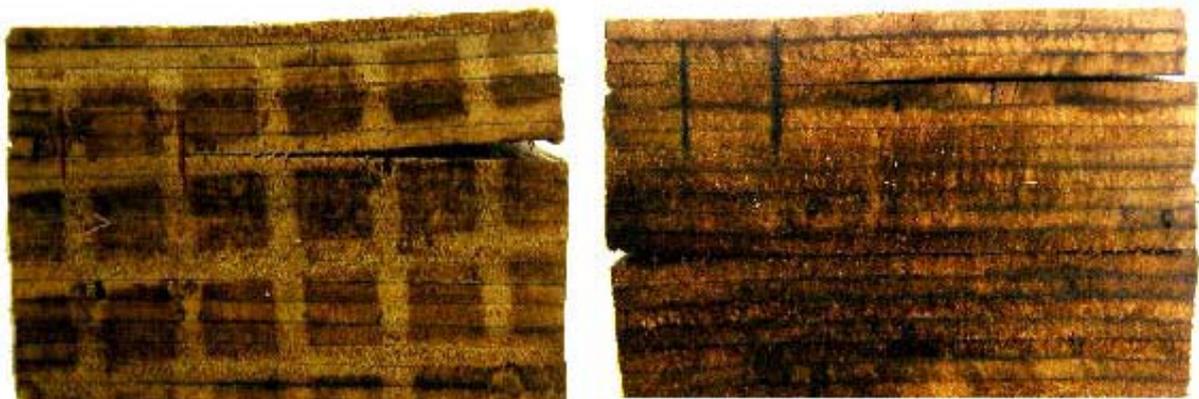


Figura 3 - Características dos corpos-de-prova ensaiados no Ciclo 02 de delaminação.

As Tab. 5 e 6 comparam as médias obtidas para os dois processos de fabricação dos LVL's. Novamente o Tratamento II apresentou resultados estatisticamente menores para a variável porcentagem de delaminação.

Tabela 5 - Análise de variância para os resultados do Ciclo 02 do ensaio de delaminação

Fonte de variação	G.L.	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	Prob>F
Tratamento	1	12,6723	12,6723	7,93	0,02516*
Resíduo	7	11,1811	1,5973		
Total	8	23,8534			

* significativo a 95% de probabilidade

Tabela 6 - Teste de Tukey para as médias de porcentagem de delaminação do Ciclo 02

Fonte de variação: Tratamento	Número de Repetições	% de Delaminação Média (%)	5% *
LVL Tratamento 1	5	5,33	a
LVL Tratamento 2	4	2,94	b

* médias seguidas de letras distintas diferem entre si ao nível de significância indicado

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho conduziram às conclusões e às recomendações a seguir elencadas.

- A aplicação dos ensaios de delaminação, Ciclo 01 e Ciclo 02, de acordo com as recomendações da norma EN 391, se mostrou como um eficiente método para a avaliação dos painéis LVL's produzidos a partir da madeira de eucalipto.
- A expressiva variação dimensional, no sentido tangencial, apresentada pela madeira de eucalipto torna o ensaio de delaminação bastante significativo para a avaliação da qualidade geral dos painéis LVL de suas espécies.
- Estudos mais aprofundados da correlação da porcentagem de delaminação com a condição ideal de colagem das lâminas podem gerar outras informações importantes no desenvolvimento destes painéis a partir desta matéria-prima.
- Os resultados dos ensaios de delaminação (Ciclo 01 e Ciclo 02) foram considerados satisfatórios se balizados com as recomendações de porcentagem máxima de delaminação estabelecidos para laminados colados estruturais à base de madeira, de documento normativo ASTM D-2559. A inexistência de resultados de trabalhos de mesma natureza na literatura disponível não possibilitou a discussão mais aprofundada destes dados.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem:

- À FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), São Paulo, Brasil, pelo financiamento do trabalho.

- Ao LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Lisboa/Portugal, pelos recursos e infraestrutura disponibilizados na realização dos ensaios.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Luxford, R. F. *Strength of glue-laminated Sitka spruce made up of rotary-cut veneers*. USDA Forest Service, FPL Rep. 1512. Forest Products Laboratory, Madison, 1944.

(2) Schaffer, E. L. FPL Press-Lam process: Fast, efficient conversion of logs into structural products. *Forest Products Journal*, Madison, 1972, v. 22, n.11, p.11-18.

(3) EN 391: Glued laminated timber - Delamination test of glue lines. European Standard, European Committee for Standardization, 1995, 8p.

(4) ASTM - Designation D-2559: Adhesives for structural laminated wood products or use under exterior (wet use) exposure conditions. *Annual Book of ASTM Standards*, American Society for Testing and Materials. 1976, Philadelphia. p. 775-781.