Comparação entre propriedades físicas e mecânicas de madeiras e
madeira laminada colada de *Corymbia citriodora*Comparison between physical and mechanical properties of woods and
glued laminated of *Corymbia citriodora*

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho^{1*}, Alaor Coelho Silva¹,
Fabricio Gomes Gonçalves¹, Adair José Regazzi¹,
Rafael Gonçalves Espósito de Oliveira¹ e José Geraldo Lima de Oliveira¹

Resumo

O estudo da madeira laminada colada (MLC) é consolidado em países europeus e na América do Norte, tornando-se objeto de estudo no Brasil a partir dos anos 1980 devido à versatilidade da MLC e à indisponibilidade de peças de madeiras nativas de grandes dimensões. Diante disto este trabalho teve como propósito avaliar a qualidade da MLC fabricada com madeira de *Corymbia citriodora* coladas com o adesivo à base de resorcinol-fenol-formaldeído (RFF) e comparar as propriedades físicas e mecânicas com os resultados obtidos das madeiras maciças de *Eucalyptus* sp. e *Pseudotsuga enziesii*. Os resultados indicaram potencial para substituição da madeira serrada pela MLC, pois as propriedades mecânicas foram equivalentes ou superiores às madeiras maciças. Entretanto, foi identificada delaminação e falha na MLC de *Corymbia citriodora* além do recomendado na literatura, logo a utilização da MLC produzida a partir da madeira de *Corymbia citriodora* em ambientes externos fica comprometida, devendo ser recomendada com atenção, visto que nas aplicações onde os esforços de cisalhamento não são relevantes a aplicação dessa MLC é perfeitamente viável.

Palavras-chave: *Eucalyptus* sp., *Pseudotsuga enziesii*, adesivo resorcinol-fenol-formaldeído.

Abstract

The studies on glued laminated wood (glulam) are consolidated in European countries and in North America, and have been carried in Brazil since the 1980s, due to glulam's versatility and the unavailability of pieces of large native woods. In view of this, the purpose of this work was to evaluate the quality of the glulam made with *Corymbia citriodora* wood glued with resorcinol-phenol-formaldehyde adhesive (RPF) and compare the physical and mechanical properties with the results of solid *Eucalyptus* sp. and *Pseudotsuga enziesii* woods. The results indicated the potential for the replacement of wood by glulam because the mechanical properties were equivalent or superior to the solid woods. However, wood delamination and failure of *Corymbia citriodora* glulam were identified in addition to the literature, therefore the use of glulam produced from the wood of *Corymbia citriodora* in external environments is compromised and should be recommended with attention, since in the applications where the shear stresses are not relevant the application of this glulam is perfectly feasible.

Keywords: *Eucalyptus* sp., *Pseudotsuga enziesii*, resorcinol-phenol-formaldehyde adhesive.

INTRODUÇÃO

A madeira tem sido muito procurada como material de construção devido à sua beleza, resistência e facilidade de construção. Os elementos estruturais de madeiras laminadas coladas (MLC) oferecem motivos adicionais para selecionar a madeira como material estrutural. A MLC é fabricada usando peças individuais de madeira de alta resistência, secas em estufa, laminadas e coladas sob pressão para formar grandes elementos estruturais, mantendo a tradicional beleza da madeira juntamente com projetos que tenham resistência mecânica, segurança e que possibilitam estabilidade dimensional, colados com adesivos que possibilite extraordinária resistência ao fogo e eficiência térmica, segundo ANSI/AITC A190.1 (ANSI, 2002).

1. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES. Jerônimo Monteiro / ES, Brasil.

*Autor correspondente: p_gutemberg2001@yahoo.com.br

A Áustria foi o maior produtor de MLC da Europa em 2014 (o ano mais recente sobre o qual os dados de produção poderiam ser obtidos), com aproximadamente 1,5 milhão de metros cúbicos. A produção de MLC no ano de 2016 nos Estados Unidos da América foi de aproximadamente 395.400 m³, e no Canadá foi de aproximadamente 35.400 m³, conforme a *Forest Products Annual Market Review 2016-2017* (UNECE, 2017).

A inserção da MLC no Brasil a partir de meados do século XX contribuiu para o desenvolvimento e aperfeiçoamento desse produto em diversas aplicações estruturais. Os estudos são necessários porque contribuem para o conhecimento e aperfeiçoamento da técnica em cada região ou estado, logo devem ser realizadas pesquisas para a avaliação das madeiras que melhor se adaptem a essa técnica. O uso da MLC de madeiras provenientes de florestas plantadas de eucalipto necessita de mais projetos de pesquisas, visando o atendimento de padrões compatíveis com as exigências de segurança e qualidade requeridas nas construções. O conhecimento das características de resistência e de rigidez é indispensável para o adequado aproveitamento da MLC como material estrutural.

A produção de MLC de eucalipto desperta interesse no Brasil devido a abundância dessa madeira, crescimento rápido, boas propriedades mecânicas, entre outros. O comportamento diante da colagem da madeira de eucalipto é um desafio que já foi estudado em várias pesquisas, tais como Costa Tienne e Nascimento (2006), Couri Petrauski (1999), Nascimento et al. (2001; 2002),

O presente trabalho teve como objetivo comparar as propriedades físicas e mecânicas das madeiras maciças de *Eucalyptus* sp. e *Pseudotsuga menziesii* utilizadas no Porto de Praia Mole, ES, com a proposição da madeira laminada colada (MLC) produzida a partir da madeira de *Corymbia citriodora*.

MATERIAL E MÉTODOS

Origem e preparo da madeira

O estudo foi conduzido no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, em Jerônimo Monteiro, ES. Para a determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira laminada colada (MLC) foram produzidos cinco elementos de MLC (90 x 90 x 1.000 mm) a partir de 10 tábuas de *Corymbia citriodora* nas dimensões 26 x 95 x 2.200 mm (espessura x largura x comprimento) de idade na faixa de 15 a 20 anos, secas e em equilíbrio com o ambiente e procedentes do sul do estado do Espírito Santo.

A determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira maciça de *Eucalyptus* sp. (90 x 90 x 1.000 mm) se deu a partir de cinco calços de madeira obtidos no sul do Estado do Espírito Santo, que se encontravam secos e em equilíbrio com o ambiente. Tal madeira é de origem de plantio de reflorestamento (ciclo curto na faixa de 7 a 10 anos) e foi submetida à classificação visual a fim de identificar defeitos anatômicos e de secagem, como nós e rachaduras de topo.

A determinação das propriedades físicas e mecânicas da madeira maciça de Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) (90 x 90 x 1.000 mm) de idade na faixa de 10 a 15 anos se deu a partir de três calços. Tais calços foram obtidos no sul do estado do Espírito Santo, no Porto de Praia Mole, trazidos dos Estados Unidos da América em navios, e desde então estavam estocados e se encontravam secos e em equilíbrio com o ambiente.

Confecção dos blocos de MLC

Para a fabricação dos blocos de MLC, utilizaram-se 20 lamelas de madeira de *Corymbia citriodora* com dimensões 22,5 x 90 x 1.000 mm. As lamelas foram passadas no desengrosso no dia da colagem para evitar o empenamento e a obstrução dos vasos da madeira por poeira, o que poderia contribuir para a redução da eficiência da adesão.

As lamelas foram coladas com pressão de colagem igual a 1,0 MPa e gramatura igual a 300 g/m². O adesivo resorcinol-fenol-formaldeído (RFF) foi preparado a uma temperatura de aproximadamente 25 °C e espalhado sobre a superfície da lâmina de madeira com uma espátula.

A pressão de colagem foi aplicada durante um período de sete horas na prensa hidráulica com capacidade de 15 toneladas (Figura 1), em ambiente com temperatura de 25 °C e umidade relativa do ar de 65%. Após o período de prensagem, os blocos de MLC formados por quatro lamelas foram retirados da prensa e mantidos em repouso durante cinco dias para finalização da colagem. Posteriormente foram levados ao desengrosso para retirada do excesso de adesivos e aparelhagem dos blocos com dimensões padrão (90 x 90 x 1.000 mm).

Figura 1. Esquema de produção dos blocos de MLC.
Figure 1. Production scheme of glulam blocks timber.

Caracterização das propriedades físicas e mecânicas da madeira maciça

A caracterização das propriedades físicas das madeiras de *Eucalyptus* sp., *Corymbia citriodora* e *Pseudotsuga pmenziesii* foi realizada de acordo com os métodos de ensaio definidos pela norma MB-26/40, da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1940), para determinação do teor de umidade, densidade aparente, retração volumétrica e inchamento volumétrico.

A caracterização das propriedades mecânicas das madeiras de *Eucalyptus* sp., *Corymbia citriodora* e *Pseudotsuga pmenziesii* foi realizada de acordo com a norma *American Society for Testing and Materials* ASTM-D143 (ASTM, 2000), para obtenção da resistência ao cisalhamento, compressão paralela e compressão normal às fibras. O módulo de elasticidade (MOE) foi determinado pelo ensaio destrutivo de flexão estática, utilizando corpos de prova de madeira maciça, com dimensões 25 x 25 x 57,5 mm, segundo a Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

Os ensaios mecânicos foram realizados em máquina universal de ensaios, com capacidade de 100 kN e sistema automatizado de obtenção de dados.

Caracterização das propriedades físicas e mecânicas da MLC

A caracterização das propriedades mecânicas dos elementos de MLC foi realizada a partir de ensaios padronizados. Para cada um dos cinco elementos de MLC foram retirados corpos de prova para compressão paralela às fibras, cisalhamento na linha de cola, compressão normal às fibras e delaminação. As amostras foram retiradas de forma aleatória na parte interna dos elementos de MLC, segundo a Norma Brasileira NBR 7190 (ABNT, 1997).

Após a confecção dos corpos de prova foram selecionadas amostras para o ensaio, secas em equilíbrio com o ambiente e para a condição de umidade acima do ponto de saturação das fibras, após ficarem alocadas submersas em um recipiente com água. Os ensaios mecânicos foram realizados na mesma máquina universal de ensaios mencionada anteriormente.

Para a realização do ensaio de compressão paralela às fibras foram aplicados os métodos de ensaio da norma ASTM D143 (ASTM, 2000). Os corpos de prova provenientes dos elementos de MLC possuíam dimensões nominais de 25 x 25 x 100 mm.

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola, foram aplicados os procedimentos de ensaio de acordo com a norma ASTM D905 (ASTM, 2009). Após a execução desse ensaio, foi analisada a falha na madeira. A inspeção da porcentagem de cisalhamento na madeira, ocorrido na área da linha de cola, foi realizada com uma malha milimétrica nas dimensões 38,1 x 50,8 mm, transcrita em uma transparência e sobreposta aos corpos de prova. A porcentagem de falha na madeira foi obtida a partir da contagem dos espaços na malha onde ocorreu cisalhamento na madeira.

Ensaio de delaminação

A qualidade da MLC também foi avaliada com base no ensaio de delaminação, conforme recomendação da *American Institute of Timber Construction* – AITC T110 (AITC, 2007). Esse ensaio avaliou o comportamento da combinação espécie-adesivo para uso exterior mediante aplicação de três ciclos de vácuo e pressão, durante o ensaio que requer período total de seis dias.

O primeiro ciclo totalizou um período de 48 horas. No segundo e terceiro ciclos, foram repetidas as mesmas etapas do primeiro ciclo. Cada ciclo foi composto de duas etapas, sendo que na etapa um do primeiro ciclo aplicou-se um vácuo de 75 ± 10 kPa por um período de 2 horas, depois o vácuo foi liberado e aplicou-se água com pressão de 540 ± 20 kPa, também por um período de duas horas, certificando-se que os corpos de prova estavam submersos. Na segunda etapa do primeiro ciclo repetiram-se os mesmos procedimentos da etapa um, totalizando 8 horas de permanência na autoclave.

Após o período de ensaios na autoclave, as amostras de 76,2 mm de comprimento foram secas ao ar livre por um período superior a 40 horas à temperatura de 28 ± 2 °C, visando a redução de seu peso na faixa não superior a 5% do peso inicial da amostra. Recomenda-se que a delaminação total das linhas de cola de cada corpo de prova não exceda 10% do comprimento total das mesmas no topo dos corpos de prova para que a MLC seja aprovada para o uso exterior, conforme AITC T110 (AITC, 2007).

Análise da interface da linha de cola

O estudo da linha de cola foi realizado a partir da visualização da interface madeira-adesivo; nele, foram retiradas amostras da MLC com dimensões 1,0 x 1,5 x 2,0 cm (radial, tangencial e longitudinal, respectivamente), posicionando a linha de cola no centro. As amostras foram fervidas em água em um béquer durante 4 horas e posteriormente seccionados no micrótomo de deslize, com espessura de 18 a 20 micrômetros do plano transversal.

Foi realizado um corte de cada amostra e cada um deles foi fixado em lamelas provisórias para análise no microscópio óptico por meio de fotomicrografias, utilizando software analisador de imagens. Foram realizadas medições ao longo da linha da cola principal e secundária para mensuração da espessura média, na qual analisou-se a cola que penetrou nas cavidades celulares (vasos e raios), conforme Albino et al. (2010).

Ensaio não destrutivos

Os elementos de madeira maciça e MLC passaram por ensaios não destrutivos de vibração longitudinal, vibração transversal e vibração torcional para determinação dos módulos de elasticidade longitudinal e transversal às fibras (MOE) antes da retirada dos corpos de prova.

Ensaio de corpos de prova estruturais

O corpo de prova estrutural de compressão normal às fibras foi preparado com dimensões nominais de 90 x 90 x 45 mm (altura x largura x comprimento), obtido a partir dos elementos de MLC para realização dos ensaios na condição seca e saturada. O procedimento de ensaio na máquina universal de ensaios foi realizado conforme a norma ASTM D143 (ASTM, 2000), pois não há norma que contemple esse tipo de corpo de prova em MLC; além disso, os resultados foram comparados com os valores obtidos em corpos de prova padronizados nessas normas. A resistência (f_{90}) foi obtida de acordo com a norma NBR 7190 (ABNT, 1997).

Análise Estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando o delineamento inteiramente casualizado, tendo como tratamentos as espécies *Pseudotsuga pmenziesii*, *Eucalyptus* sp. e *Corymbia citriodora* (MLC). O número de repetições nos ensaios foi igual a seis para cada ensaio (tratamento), exceto para a tomada de espessura de linha de cola, que variou entre 110 medições (repetições) para linha de cola secundária e 183 medições (repetições) para linha de cola principal, e na obtenção dos módulos das peças dos três tratamentos, que variou entre três e seis medições (repetições). No ensaio para determinar a densidade aparente, a densidade básica, o inchamento volumétrico e a retração volumétrica, foram oito repetições.

Os dados das variáveis descritas em material e métodos foram submetidos ao teste de normalidade (SHAPIRO; WILK, 1965) e de homogeneidade de variâncias F máximo (HARTLEY, 1950). Para comparação das médias foi utilizado o teste de Tukey. Em todos os testes estatísticos o nível de significância adotado foi de 5% de probabilidade. Os dados referentes à falha na madeira e espessura de linha de cola foram avaliados somente por meio de estatística descritiva, uma vez que as pressuposições para ANOVA não foram atendidas.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Propriedades físicas das madeiras

Os valores médios das propriedades físicas, densidade aparente (ρ_{ap}), teor de umidade (U), densidade básica (ρ_{bas}), retração volumétrica (RV) e inchamento volumétrico (IV) das madeiras *Pseudotsuga pmenziesii*, *Eucalyptus* sp. e *Corymbia citriodora* são apresentados na Tabela 1.

O conhecimento do teor de umidade e a densidade aparente da madeira são fundamentais para fabricação de MLC, uma vez que a umidade interfere no tempo de secagem do adesivo, e a densidade interfere na pressão e tempo de prensagem dos elementos de MLC. Na Tabela 1 tem-se o resultado de umidade da madeira que está abaixo de 20% e a densidade aparente da madeira de *Corymbia citriodora* que está acima de $0,75 \text{ g cm}^{-3}$; porém, foi empregada em MLC, apesar da densidade aparente não atender o recomendado pela NBR 7190 (1997), enquanto a umidade é atendida. A densidade acima do permitido pode resultar em uma colagem pouco eficiente que será verificada na avaliação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência ao cisalhamento da linha de cola.

Tabela 1. Valores médios das propriedades físicas das madeiras *Pseudotsuga menziesii*, *Eucalyptus* sp. e *Corymbia citriodora*.

Table 1. Mean values of physical properties of the *Pseudotsuga menziesii*, *Eucalyptus* sp. and *Corymbia citriodora* woods.

Tratamentos	ρ_{ap} (g cm^{-3})	U (%)	ρ_{bas} (g cm^{-3})	RV (%)	IV(%)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	0,606 b	14,23	0,475 b	14,97 a	17,63 b
<i>Eucalyptus</i> sp.	0,668 b	15,13	0,504 b	17,22 a	20,91 a
<i>Corymbia citriodora</i> (MLC)	0,873 a	16,58	0,702 a	16,19 a	19,34 ab
CV (%)	12,77	-	11,09	11,10	13,25

* Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na coluna, não difere estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade; ρ_{ap} – Densidade aparente; U – Teor de umidade; ρ_{bas} – Densidade básica; RV – Retração volumétrica; IV – Inchamento volumétrico; CV (%) – Coeficiente de variação experimental.

A densidade aparente e a densidade básica da madeira de *Corymbia citriodora* utilizada na produção dos elementos de MLC foi a maior dentre as madeiras estudadas e difere estatisticamente das madeiras de *Pseudotsuga pmenziesii* e *Eucalyptus* sp.. A retração volumétrica foi equivalente para todos os tratamentos, entretanto foram encontrados maiores valores de inchamento volumétrico para a madeira de *Eucalyptus* sp.. Tais valores são altos, mas compatíveis com as madeiras deste gênero, conforme Silva et al. (2006).

Propriedades mecânicas das madeiras e dos blocos de MLC

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios do módulo de elasticidade obtidos por meio dos ensaios não destrutivos de vibração longitudinal e transversal nos elementos de madeira maciça e nos elementos de MLC.

Tabela 2. Valores médios de módulos de elasticidade obtidos por ensaio não destrutivo nos elementos de madeira maciça e de MLC.

Table 2. Mean values of elasticity modulus obtained by non-destructive testing on solid wood and glulam elements.

Tratamentos	MOE _{vl} (GPa)	MOE _{vt} (GPa)	G _{vtorc} (GPa)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	14,31 (9,60)	11,65 (7,53)	1,70 (4,13)
<i>Eucalyptus</i> sp.	18,64 (8,81)	14,24 (18,28)	1,75 (14,24)
<i>Corymbia citriodora</i> (MLC)	16,51 (8,95)	14,90 (5,12)	1,08 (6,34)

Nota: Valor entre parênteses é o coeficiente de variação (%).

Os elementos de MLC apresentaram módulo de elasticidade longitudinal próximo dos elementos de madeira maciça de *Eucalyptus* sp., tanto no ensaio de vibração longitudinal, quanto no ensaio de vibração tangencial. Entretanto os valores de MOE foram superiores em relação a madeira de *Pseudotsuga pmenziesii*.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios de MOE obtidos por meio de ensaio de flexão estática utilizando corpos de prova de madeira maciça de todos os tratamentos.

Tabela 3. Valores médios de módulos de ruptura e elasticidade obtidos por ensaio destrutivo.

Table 3. Mean values of rupture and elasticity modulus obtained by destructive testing.

Tratamentos	MOR (MPa)	MOE (GPa)	U (%)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	91,94 b	13,44 b	12,58
<i>Eucalyptus</i> sp.	127,40 a	18,38 a	12,28
<i>Corymbia citriodora</i> (MLC)	106,19 b	15,01 b	13,81
CV (%)	12,17	7,39	-

* Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na coluna, não difere estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade; MOR – Módulo de ruptura; MOE – Módulo de elasticidade; U – Teor de umidade; CV (%) – Coeficiente de variação experimental.

A madeira de *Corymbia citriodora*, utilizada para a confecção dos blocos de MLC, apresentou módulo de elasticidade longitudinal equivalente à madeira de *Eucalyptus* sp.. Os resultados encontrados para a madeira de *Pseudotsuga pmenziesii* foram inferiores em relação às madeiras estudadas – possivelmente devido à presença de umidade no interior das peças ensaiadas, como observado por Logsdon (1998).

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios de resistência referente à propriedade mecânica obtida pelo ensaio de compressão paralela às fibras da madeira maciça e da MLC, tanto para a madeira seca quanto para a saturada.

Tabela 4. Valores médios de resistência à compressão paralela às fibras da madeira.

Table 4. Mean values of compressive strength parallel to wood fibers.

Tratamentos	Seca		Saturada	
	$f_{c0,m}$ (MPa)	U (%)	$f_{c0,m}$ (MPa)	U (%)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	54,95 a	10,74	23,42 b	108,96
<i>Eucalyptus</i> sp.	62,61 a	10,56	32,50 a	77,52
<i>Corymbia citriodora</i> (MLC)	58,60 a	12,36	34,30 a	34,43
CV (%)	9,37	-	12,28	-

* Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade; $f_{c0,m}$ – Compressão paralela às fibras; U – Teor de umidade; CV (%) – Coeficiente de variação experimental.

Para o ensaio de compressão paralela às fibras da madeira, a MLC apresentou resistência equivalente à madeira maciça de *Eucalyptus* sp. e superior à de *Pseudotsuga pmenziesii*. O mesmo comportamento de ambas foi identificado para a madeira saturada.

Os valores médios da resistência ao cisalhamento na madeira maciça e elementos de MLC, tanto na condição seca quanto saturada, são apresentados na Tabela 5. Também são apresentados na Tabela 5 os valores de falha na madeira relativos aos ensaios em MLC.

Tabela 5. Valores médios de resistência obtidos no ensaio de cisalhamento na madeira maciça, na linha de cola nos elementos de MLC.

Table 5. Mean values of strength obtained in the shear test in the solid wood, in the glue line in the glulam elements.

Tratamentos	Seca		Saturada	
	$f_{v0,m}$ (MPa)	U (%)	$f_{v0,m}$ (MPa)	U (%)
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	13,51 a	10,44	7,33 a	91,03
<i>Eucalyptus</i> sp.	10,33 b	10,49	7,00 a	82,41
<i>Corymbia citriodora</i> (MLC)	12,51 a	11,79	7,15 a	45,01
CV (%)	8,76	-	14,48	-

* Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade; $f_{v0,m}$ – Resistência ao cisalhamento; U – Teor de umidade; CV (%) – Coeficiente de variação experimental.

A resistência ao cisalhamento na linha de cola dos elementos de MLC não diferiu estatisticamente ($p > 0,05$) da resistência ao cisalhamento na madeira maciça de *Pseudotsuga pmenziesii* e foi superior ($p < 0,05$) à madeira de *Eucalyptus* sp. na condição seca. Na condição saturada as madeiras apresentaram resistência ao cisalhamento equivalentes ($p > 0,05$).

O resultado da porcentagem de falha na madeira obtida no ensaio de cisalhamento na linha de cola foram iguais a 47,67% na condição seca e 49,67% na condição saturada. Isso mostra que o cisalhamento ocorreu menos na madeira maciça de *Corymbia citriodora* (MLC), e dessa forma o adesivo RFF não proporcionou uma colagem eficiente, uma vez que a NBR 7190 (ABNT, 1997) considera uma colagem eficiente quando a falha na madeira é superior a 90%. Tal afirmação contida na NBR 7190 (ABNT, 1997) pode ser melhor contextualizada, pois o resultado de resistência média ao cisalhamento foi próximo ao apresentado na norma, logo o que correu foi uma ruptura em termos global da MLC.

Os valores médios da resistência a compressão normal às fibras na madeira maciça e elementos de MLC, condição seca quanto saturada, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Valores médios de resistência à compressão normal às fibras da madeira.

Table 6. Mean values of compression strength perpendicular to the wood fibers.

Tratamentos	Seca		Saturada	
	$f_{c90,m}$ (MPa)	U (%)	$f_{c90,m}$ (MPa)	U (%)
<i>Pseudotsuga enziesii</i>	12,91 b	10,54	4,77 c	121,85
<i>Eucalyptus</i> sp.	9,19 c	11,14	6,84 b	88,58
<i>Corymbia citriodora</i> (MLC)	18,76 a	12,60	15,04 a	40,05
CV (%)	6,86	-	14,45	-

* Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade; $f_{c90,m}$ – Resistência média à compressão normal às fibras; U – Teor de umidade; CV (%) – Coeficiente de variação experimental.

A resistência à compressão normal às fibras da MLC foi superior ($p < 0,05$) à madeira maciça de *Eucalyptus* sp. e à madeira de *Pseudotsuga pmenziesii*. Após a saturação das madeiras, a MLC apresentou valor de resistência a compressão normal às fibras, também superior ($p < 0,05$) à madeira maciça de *Eucalyptus* sp. e à madeira de *Pseudotsuga pmenziesii*.

A partir do ensaio de delaminação, o valor médio encontrado na MLC produzida à base de adesivo RFF foi de aproximadamente 54,11%. Tal valor é superior à porcentagem máxima permitida para a aprovação de vigas de MLC a serem utilizadas em ambiente externo, que é igual a 10%, conforme AITC T110 (AITC, 2007).

Na Figura 2 visualiza-se a linha de cola a partir da interface madeira-adesivo das juntas coladas onde tem-se os vasos e raios preenchidos com o adesivo resorcinol-fenol-formaldeído (RFF). Os valores médios de espessura do adesivo RFF estão apresentados na Tabela 7.

Figura 2. Cortes transversal em relação à linha de cola no tratamento RFF.

Figure 2. Cross sections in relation to the glue line on RFF treatment.

Tabela 7. Valores médios de espessuras das linhas de cola dos tratamentos da MLC.

Table 7. Mean values thickness of glue lines of treatments of glulam.

Tratamento	Linha principal (µm)	Linha secundária (µm)
<i>Corymbia citriodora</i> (MLC)	61,66 (34,68)	83,41 (43,44)

Nota: Valor entre parênteses é o coeficiente de variação (%).

Na Tabela 7 têm-se os valores das espessuras médias das linhas de cola dos tratamentos da MLC.

As superfícies coladas com RFF apresentaram uma linha de cola espessa, indicando assim uma maior penetração de RFF na madeira, que é um dos fatores que pode proporcionar melhora na eficiência da colagem. Os coeficientes de variações são altos e indicam que não houve preocupação em selecionar a madeira levando em conta as regiões próximas a medula e a casca, mas ocorreu uma colagem eficiente com penetração do adesivo diversificada na madeira, pois mesmo sendo uma madeira de alta densidade o tempo e pressão de colagem foram capazes de garantir tal efeito.

Na Tabela 8 têm-se os valores médios para a resistência obtida no ensaio de compressão normal às fibras, nas condições seca e saturada, a partir dos ensaios em corpos de prova estruturais de MLC colados com RFF.

Tabela 8. Valores médios de resistência obtida no ensaio de compressão normal às fibras em corpos de prova estruturais na condição seca e saturada da MLC.

Table 8. Mean values of strength obtained in the normal compression test to the fibers in structural test specimens in dry and saturated conditions of glulam.

Tratamento	Seca		Saturada	
	$f_{c90,m}$ (MPa)	U (%)	$f_{c90,m}$ (MPa)	U (%)
<i>Corymbia citriodora</i> (MLC)	20,88 (7,35)	12,52	15,59 (6,75)	38,18

* $f_{c90,m}$ – Resistência média à compressão normal às fibras; U – Teor de umidade; Valor entre parênteses é o coeficiente de variação (%).

A MLC apresentou resistências à compressão normal às fibras próximas daquelas apresentadas na Tabela 6, quando tomada na mesma condição de umidade, com madeira saturada, conforme a Tabela 8. Os resultados obtidos no ensaio de compressão normal às fibras tiveram pouca influência do adesivo porque a integridade da linha de cola dos corpos de prova foi mantida durante o experimento, devido à não exigência efetiva do adesivo nesse ensaio.

Nas pesquisas de Costa Tienne e Nascimento (2006), Couri Petruski (1999), Nascimento et al. (2001; 2002), a MLC produzida a partir da madeira de *Corymbia citriodora* apresentou resultados satisfatórios tal como ocorreu nesse trabalho. Certamente a maior dificuldade para produzir MLC de *Corymbia citriodora* foi devido a densidade dessa madeira que seguramente está acima dos limites normativos da NBR 7190 (ABNT, 1997).

CONCLUSÕES

O módulo de elasticidade obtido pelo ensaio não destrutivo dos blocos de MLC de *Corymbia citriodora* apresentaram valores próximo em relação às madeiras de *Eucalyptus* sp. e *Pseudotsuga pmenziesii*. Porém, o *Eucalyptus* sp. e o *Pseudotsuga pmenziesii* apresentaram maior e menor MOE, respectivamente, quando testados pelo método destrutivo em copos de prova.

A MLC de *Corymbia citriodora* obteve maior resistência à compressão normal às fibras e ao cisalhamento, quando comparada à madeira maciça de *Eucalyptus* sp.. Entretanto a força de compressão paralela das duas madeiras foi equivalente e superior à madeira de *Pseudotsuga pmenziesii*.

A resistência à compressão normal às fibras da madeira de *Pseudotsuga pmenziesii* não diferiu estatisticamente ($p > 0,05$) da obtida para madeira maciça de *Eucalyptus* sp., e a resistência ao cisalhamento também não diferiu estatisticamente ($p > 0,05$) da MLC.

A partir da taxa de falha na madeira verificou-se maior cisalhamento na cola, ocasionado por uma linha de cola que mesmo espessa, não conseguiu atingir a eficiência recomendada na norma brasileira para MLC, nesse caso a colagem da madeira de *Corymbia citriodora*, no entanto a resistência média ao cisalhamento foi próxima do apresentado na norma brasileira.

O ensaio de delaminação não comprovou uma boa resistência na linha de cola, logo a utilização da MLC produzida a partir da madeira de *Corymbia citriodora* em ambientes externos fica comprometida, devendo ser recomendada com atenção, visto que nas aplicações onde os esforços de cisalhamento não são relevantes a aplicação dessa MLC é perfeitamente viável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio do Programa Institucional de Iniciação Científica (PIIC) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de iniciação científica, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES), pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALBINOP, V. C. S.; MORI, F. A.; MENDES, L. M. Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 509-516, 2010.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: Projeto de Estruturas de Madeira: Rio de Janeiro, 1997.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT MB-26/40**: Ensaio físicos e mecânicos da madeira. Rio de Janeiro, 1940.

AITC – AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. **AITC T110**: Test methods for structural glued laminated timber – Cyclic delamination test. Centennial, 2007.

ANSI – AMERICAN NATIONAL STANDARDS FOR WOOD PRODUCTS. **ANSI/AITC A190.1**: Structural glued laminated timber. Englewood, 2002.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D905**: Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading. West Conshohocken, Pennsylvania, 2009.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D143**: Standard test methods for small clear specimens of timber. Philadelphia, 2000.

COSTA TIENNE, D. L.; NASCIMENTO, A. M. Propriedades de resistência a flexão de vigas laminadas coladas de eucalipto citriodora (*Corymbia citriodora*). In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 10., 2006, São Pedro. **Anais...Botucatu**: UNESP, 2006. p. 127-127.

COURI PETRAUSKI, S. M. F. **Desenvolvimento e teste de pórticos treliçados feitos de madeira de Eucalyptus citriodora e Eucalyptus grandis laminada e colada**. 1999. 119 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

UNECE – UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forest Products Annual Market Review 2016-2017**. Geneva: UNECE / FAO, 2017. (Geneva Timber and Forest Study Paper, 41)

HARTLEY, H.O. The use of range in analysis of variance. **Biometrika**, London, v. 37, p. 271-280, 1950.

LOGSDON, N. B. **Influência da unidade nas propriedades de resistência e rigidez da madeira**. 1998. 200p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

NASCIMENTO, A. M.; LUCIA, R. M. D.; BAÊTA, F. C. Comportamento de vigas retas em MLC com emendas de topo e bisel - Parte 1. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 9, n.1, p. 11-18, 2002.

NASCIMENTO, A. M.; LUCIA, R. M. D.; VITAL, B. R. Colagem de emendas biseladas em madeiras de Pinus spp e Eucalyptus citriodora. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 8, n. 1, p. 44-51, 2001.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (Complete sample). **Biometrika**, London, v. 52, p. 591-611, 1965.

SILVA, J. C.; OLIVEIRA, J. T. S.; XAVIER, B. A.; CASTRO, V. R. Variação da retratibilidade da madeira de Eucalyptus grandis Hill ex. Maiden, em função da idade e da posição radial no tronco. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, p. 803-810, 2006.

Recebido em: 23/03/2018

Aceito em: 08/02/2019