

Eficiência da colagem de madeira tratada de *Eucalyptus cloeziana* F. Muell para produção de madeira laminada colada (MLC)

Efficiency of the glue line in the treated wood
Eucalyptus cloeziana F. Muell for glued
laminated (glulam) beams production

Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho¹, Fabricio Gomes Gonçalves¹,
Geanine Costa Gava¹, Vinicius Peixoto Tinti¹,
Sabrina Daré Alves¹, Adair José Regazzi¹

¹ Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil, e-mails: pedro.segundinho@ufes.br, fabricio.goncalves@ufes.br, geaninecosta@hotmail.com, viniciustinti_madeireiro@hotmail.com, sabrina.dare@hotmail.com, adairreg@ufv.br

RESUMO

Os setores da construção civil, indústria moveleira, indústria de papel e celulose buscam novas alternativas para uma utilização mais racional da madeira que possam diminuir as limitações de seu uso, a exemplo da produção dos painéis reconstituídos dessa matéria-prima, como compensados, aglomerados de partículas, sarrafos, MLC (Madeira Laminada Colada), entre outros. No presente trabalho buscou-se avaliar a eficiência da colagem em taliscas de madeira de *Eucalyptus cloeziana* preservadas quimicamente com Arseniato de Cobre Cromatado (CCA). Foram utilizados seis adesivos (MUF: melamina-ureia-formaldeído; PVA: poliacetato de polivinila; RF: resorcinol-formaldeído; TF: tanino-formaldeído; UF: ureia-formaldeído; PUR: poliuretano à base de mamona) e foram realizadas avaliações da interface madeira-adesivo por meio de fotomicrografias, da resistência ao cisalhamento, da porcentagem de falhas na madeira e mensuração da espessura da linha de cola. Para a visualização da interface madeira-adesivo retiraram-se cortes anatômicos de cada posição, plano transversal e plano longitudinal da junta colada, após amolecimento em água quente. Apenas nas taliscas unidas com TF não foi possível avaliar a interface. O CCA contribuiu de forma negativa nas propriedades físicas e mecânicas da madeira. O MUF apresentou os melhores resultados, representados por maiores penetrações do adesivo no material utilizado e consequentemente maiores valores de resistência ao cisalhamento e menores valores de delaminação.

Palavras-Chave: linha de cola, resistência ao cisalhamento, delaminação.

ABSTRACT

The sectors of civil construction, furniture industry, pulp, and paper industry that use wood, seeking new alternatives for a more rational usage of wood while reducing the use limitations. Some examples of new materials are reconstituted wood panels as plywood, chipboard, blockboards, glulam (glued laminated timber), among others. This study aimed at evaluating the efficiency of bonding pieces of chemically preserved with Copper Chrome Arsenate (CCA) *Eucalyptus cloeziana* wood. Six adhesives were used: MUF (Melamine urea formaldehyde); PVA (polyvinyl acetate); RF (Resorcinol-formaldehyde); TF (Tannin formaldehyde); UF (Urea-formaldehyde); PUR (castor oil-based polyurethane). We evaluated the wood-adhesive interface through photomicrographs, measuring the thickness of the main glue line, shear strength, and percentage of wood flaws. In order to preview the wood-adhesive interface, we withdrew anatomical sections for each position, transverse plane and longitudinal plane of the glued joint, after softening it in hot water. We could not assess the wood-adhesive interface of the lamellas glued with TF, only. CCA contributed negatively to the physical and mechanical properties of wood. The MUF adhesive had the best results, represented by greater penetration of the adhesive into the wood and consequently higher values in the shear and delamination test.

Keywords: glue line, shear strength, delamination.

1. INTRODUÇÃO

A madeira é um material de origem biológica que apresenta propriedades físicas e mecânicas variáveis entre as espécies e dentro de uma mesma espécie, sendo matéria-prima indispensável em aplicações na construção civil, indústria moveleira, indústria de papel e celulose, dentre outras. Na sua forma maciça e em dimensões maiores, a madeira tornou-se, ao decorrer dos anos, um material difícil de ser encontrado devido à constante supressão de florestas nativas e à legislação ambiental vigente. Assim, os setores que a utilizam buscaram novas alternativas para um aproveitamento mais racional e que pudessem diminuir suas limitações de uso, a exemplo da produção dos painéis reconstituídos de madeira, como compensados, aglomerados de partículas, sarrafeados, MLC (Madeira Laminada Colada), entre outros.

Associado a essa alternativa, tem-se o aproveitamento de resíduos madeireiros na produção destes painéis, desde que um estudo técnico do material seja realizado. Em empresas de imunização de madeiras, após seu efetivo tratamento com preservantes, os resíduos gerados apresentam em sua composição substâncias químicas tóxicas. Para o uso de madeira que passou ou não por um tratamento preservante, alguns estudos foram realizados em relação a sua colagem como forma de aproveitamento de resíduos, a exemplo de Abreu *et al.* [1], Pereira *et al.* [2], Bertolini *et al.* [3] e Boa *et al.* [4].

A maioria dos painéis de madeira requer adesivos durante a produção para um melhor aproveitamento de suas pequenas peças. Segundo Carneiro *et al.* [5], os mais utilizados pelo setor madeireiro e moveleiro são aqueles à base de poliacetato de vinila, ureia-formaldeído, fenol-formaldeído, poliuretano, colas à base de água, entre outros.

Conforme Brady e Kamke [6], a região de interface é o volume que contém as células de madeira e o adesivo. De acordo com Albino *et al.* [7], é importante conhecer essa interface em função da utilização crescente de produtos à base de compostos da madeira. Os mesmos autores afirmam que a adesão entre a madeira e o adesivo depende das características de cada um deles e do processo adotado para a colagem. Existem poucos estudos sobre como ocorre essa interação, apenas sobre a resistência ao cisalhamento na linha de cola.

No Brasil, os painéis são produzidos principalmente por peças de madeira das espécies obtidas por reflorestamentos dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Essas apresentam matéria-prima com boas características e são de rápido crescimento, segundo Iwakiri *et al.* [8], quando comparadas com espécies nativas do Brasil. No gênero *Eucalyptus*, com características físicas e mecânicas e excelente potencial para diferentes usos, pode-se destacar o *Eucalyptus cloeziana* F. Muell.

Dentre esses usos potenciais encontra-se a Madeira Laminada Colada (MLC), considerada um produto estrutural formado pela associação de lamelas de madeira selecionadas, dispostas de forma que as fibras fiquem paralelas, e unidas com adesivos sob pressão variável de 0,7 a 1,5 MPa, conforme Pfeil e Pfeil [9]. Segundinho *et al.* [10] enfatizam que umas das vantagens da MLC é o melhor aproveitamento que a união de peças de madeira de pequenas dimensões proporciona para a fabricação de vigas estruturais.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência da colagem em madeira preservada quimicamente com Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), a fim de verificar se o preservante interfere na resistência da linha de cola e por consequência na fabricação de MLC.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente foram coletados resíduos madeireiros de *Eucalyptus cloeziana* com e sem o preservante Arseniato de Cobre Cromatado (CCA), em uma indústria de preservação de madeiras localizada no interior do município de Alegre, ES. As peças de madeira tinham comprimento variando entre 0,80 a 1,30 metros e diâmetro entre 15 a 20 cm. A idade aproximada do material estava entre 6 e 8 anos. Parte desse material foi beneficiado em amostras para os ensaios físicos e a outra parte para os ensaios mecânicos. A madeira sem tratamento preservante foi utilizada apenas para os ensaios físicos e de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras, não sendo, portanto, utilizada para a avaliação da colagem.

2.1 Ensaios físicos

A determinação do teor de umidade seguiu as recomendações da NBR 7190 [11], com algumas adaptações no número de amostras e nas dimensões. Sendo assim, prepararam-se cinco corpos de prova com e sem tratamento preservante de dimensões 2,0 x 2,0 x 3,0 cm (o maior valor no sentido longitudinal).

Dezessete cunhas foram obtidas de discos a partir das toras coletadas. Elas foram dispostas em um recipiente com água até atingirem o ponto de saturação das fibras, ponto em que não foi observado variação em massa superior a 1%, aplicando-se um vácuo por aproximadamente 20 dias para, desta forma, obter a

densidade básica segundo a NBR 7190 [11].

2.2 Ensaio de resistência ao cisalhamento paralelo às fibras

Após um período de aproximadamente dois meses secando sob temperatura e umidade ambiente, os blocos obtidos por meio do desdobro das toras de madeira foram transformados em corpos de prova com dimensões recomendadas pela norma ASTM D 1037-06 [12]. Foram utilizados um total de 34 corpos de prova para a madeira com e sem tratamento preservante.

2.3 Ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira

As peças de madeira apresentavam dimensões iniciais que, após serem secas em temperatura ambiente, adequaram-se ao especificado na norma ASTM D 905-08 [13] para a colagem.

Antes de iniciar o procedimento, seguiu-se a metodologia de Brito [14] para a caracterização dos adesivos ureia-formaldeído (UF) (100%), poliacetato de vinila (PVA), resorcinol-formaldeído (RF), melamina-ureia-formaldeído (MUF), poliuretano à base de óleo de mamona (PUR) e tanino-formaldeído (TF). A caracterização ocorreu de acordo com pH, teor de sólidos, densidade e viscosidade. O adesivo de mamona foi preparado na proporção 1:1 (poliol/endurecedor) em massa. A UF e o PVA foram pigmentados com gotas de anilina para melhor identificação na determinação da porcentagem de falhas na madeira, após ensaio de cisalhamento.

As peças de madeira foram unidas com adesivo de gramatura 150 g.m⁻², a frio, em linha dupla, espalhado uniformemente com auxílio de uma espátula e colocadas sob pressão de 1,2 MPa em prensa manual, conforme sugerido por Boa *et al.* [4]. Respeitou-se a direção paralela das fibras das peças de madeira. O tempo de prensagem foi diferente para cada um dos adesivos (6 horas para PVA e UF, 8 horas para RF, 10 horas para MUF e 24 horas para TF e PUR). Depois, permaneceram 7 dias sob temperatura e umidade ambiente e foram dispostas em câmara de climatização por 15 dias (a 25°C e 60% de umidade). A confecção dos corpos de prova e os ensaios seguiram a norma ASTM D 905-08 [13].

Após o ensaio de resistência ao cisalhamento na linha de cola, a porcentagem de falha na madeira foi determinada segundo a metodologia de Buligon *et al.* [15], mediante auxílio de uma película transparente quadriculada disposta sobre a área cisalhada, dividindo-a visualmente em 10 linhas x 10 colunas, onde cada quadrícula permitiu uma cobertura de 1% de sua superfície durante a avaliação.

2.4 Ensaio de delaminação

O ensaio de delaminação foi realizado segundo a recomendação do AITC T110 [16]. Avaliou-se o comportamento da combinação espécie-adesivo para uso exterior mediante autoclavagem em um período de 6 dias para completar um total de 3 ciclos. O primeiro totalizou 48 horas (2 dias). No segundo e no terceiro ciclos foram repetidas as mesmas etapas do anterior, sendo cada um composto de duas etapas. Inicialmente, na fase um do primeiro ciclo, aplicou-se um vácuo de 75 ± 10 kPa por um período não inferior a 2 horas, depois o vácuo foi liberado e aplicou-se água com pressão de 540 ± 20 kPa, também por um período não inferior a 2 horas, certificando-se que os corpos de prova estavam submersos. Na etapa dois do primeiro ciclo foram repetidos 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 durante 40 horas à temperatura de 28 ± 2°C visando à redução de seu peso na faixa não superior de 5 a 6% da massa inicial da amostra. Foi observada a recomendação para que a delaminação total das linhas de cola de cada corpo de prova não deve exceder 10% do comprimento total das mesmas no topo dos corpos de prova para que a MLC seja aprovada, conforme AITC T110 [16]. Na Figura 1 tem-se a autoclave empregada no ensaio dos corpos de prova de delaminação para o período de 8 horas de vácuo-pressão, os quais são retirados da autoclave após esse período para ficarem ao ar livre durante o período de 40 horas.



Figura 1: Equipamento utilizado para o ensaio de delaminação.

2.5 Estudo da interface madeira-adesivo

O estudo da interface madeira-adesivo seguiu a metodologia de Albino *et al.* [7]. As amostras foram obtidas de um cubo central de 0,5 x 0,5 x 0,5 cm a partir das juntas coladas. Tais cubos foram dispostos em um béquer com água destilada sobre uma chapa aquecedora até alcançar o ponto de fervura, permanecendo assim por dez minutos (Figura 2). Decorrido esse prazo, obteve-se as lâminas utilizando um micrótomo de deslize, no qual se retirou de cada cubo duas lâminas, sendo uma no plano transversal e outra no plano longitudinal da junta colada. Os corpos de prova com o adesivo TF descolaram-se no momento de fervura e os com UF soltaram uma face da outra no momento do preparo da lâmina, dessa forma não avaliou-se a penetração dos adesivos na linha de cola para nenhum deles.

A mensuração da espessura média da linha de cola principal foi realizada a partir de medições feitas ao longo de cada corte, de uma extremidade a outra na largura da linha de cola, com o auxílio do *software AxioVision Rel. 4.5*, segundo a metodologia de Albino *et al.* [7].



Figura 2: Cubos de madeira sendo fervidos para obtenção das lâminas.

2.6 Análise Estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) considerando o delineamento inteiramente casualizado. Em geral, o número de repetições não foi o mesmo para todos os tratamentos ensaiados. Para comparação das médias foram utilizados o teste de Tukey (mais de duas médias) e o teste F nos casos em que havia somente dois tratamentos a serem comparados. O nível de significância adotado foi de 5% de probabilidade de erro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades física e mecânica das madeiras tratadas e não tratadas

O teor de umidade tanto da madeira tratada quanto da madeira não tratada apresentou decréscimo após o período de sua coleta, em função da perda de água existente nos vazios de sua estrutura ocasionada pela

secagem natural. As médias da resistência ao cisalhamento paralelo às fibras (f_{v0}) encontradas na madeira tratada e não tratada de *Eucalyptus cloeziana* estão apresentadas na Tabela 1. O teor de umidade no momento dos ensaios físico e mecânico refere-se ao do preparo do material.

Tabela 1: Propriedades física e mecânica da madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

TRATAMENTOS	U (%)		DENSIDADE BÁSICA (g.cm ⁻³)	$f_{v0,m}$ (MPa)
	COLETA DO MATERIAL	PREPARO DO MATERIAL		
Madeira tratada	36,32	17,34	0,626 a ¹	10,3288 b ¹
Madeira não tratada	18,89	13,78	0,617 a	12,0535 a

Para densidade básica da madeira do *Eucalyptus cloeziana* não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre as médias de madeira tratada e não tratada. Os valores oscilaram entre 0,50 e 0,70 g.cm⁻³. Em relação à madeira não tratada, Pereira *et al.* [17] encontraram 0,68 g.cm⁻³ para um povoamento de 6,5 anos plantado no estado de Minas Gerais, sendo esse valor superior ao encontrado, mesmo que as idades do povoamento sejam equivalentes. Sousa Júnior [18] obteve uma densidade básica de 0,74 g.cm⁻³ para árvores com 25 anos provenientes do estado de Minas Gerais para a mesma espécie deste estudo. A diferença entre os valores de densidade pode ter ocorrido devido a fatores genéticos e ambientais, ou ainda, por causa da região do tronco da qual foram obtidas as amostras, uma vez que se tratam de resíduos provenientes de uma empresa de preservação de madeiras, da qual não se tem conhecimento exato das características da matéria-prima utilizada, sobretudo sua idade.

Na Tabela 1 observa-se que a madeira não tratada foi mais resistente ao cisalhamento do que a madeira tratada, havendo diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre elas.

A resistência ao cisalhamento em madeiras sem tratamento químico é muito comum de ser encontrada na literatura. Sousa Júnior [18] apontou uma resistência superior à obtida neste trabalho, sendo 16,03 MPa para a madeira *Eucalyptus cloeziana* com idade de 25 anos. Para espécies do gênero *Eucalyptus* com densidade entre 0,70 e 0,79 g.cm⁻³, Plaster *et al.* [19] encontraram uma resistência igual a 11,18 MPa. A pequena diferença pode estar associada à idade reduzida do material ora estudado.

Para a madeira tratada, ainda são escassos estudos no que se refere à resistência ao cisalhamento paralelo às fibras. No entanto, considerando-se outras propriedades mecânicas da madeira, como o módulo de elasticidade e módulo de ruptura, pode-se exemplificar o estudo de Yildiz *et al.* [20] no qual foi observado que o CCA foi o preservante que mais afetou essas propriedades na madeira de pinus. Terezo *et al.* [21] comentaram sobre diversos trabalhos que relacionavam razões pelas quais os preservativos hidrossolúveis afetam diversas propriedades mecânicas da madeira, como as características da espécie, seu pré-tratamento, tratamento e pós-tratamento e seus respectivos fatores de processo, além do poder ácido do CCA que degenera as estruturas celulares.

Neste estudo, não se pode afirmar qual foi o fator que afetou a resistência ao cisalhamento da madeira tratada com CCA. É importante mencionar que não houve necessidade de realizar o ajustamento dos valores de resistência para 12% de umidade através da equação recomendada pela NBR 7190 [11], pois o material já apresentava esse valor no momento do ensaio mecânico.

3.2 Propriedades dos adesivos

As propriedades encontradas nos adesivos utilizados apresentam-se na Tabela 2.

Tabela 2: Caracterização dos adesivos utilizados na colagem das peças de madeira de *Eucalyptus cloeziana*.

ADESIVO ²	PROPRIEDADE			
	pH	VISCOSIDADE (cp)	TEOR DE SÓLIDOS (%)	DENSIDADE (g.cm ⁻³)
MUF	9,70	10861,0	67,42	1,331
PVA	2,53	2719,5	48,73	1,082
RF	7,68	843,3	66,61	1,169

¹ Médias seguidas da mesma letra na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste F ($p > 0,05$).

² Este adesivo não foi modificado para nenhuma das análises ora apresentada.

TF	3,26	503,3	46,34	1,234
UF	8,03	724182,0	64,24	1,396
PUR	5,79	1536,2	85,63	1,008

Em relação aos adesivos alcalinos, destaca-se a MUF, UF e RF (Tabela 2). Iwakiri [22] ressaltou que o pH da MUF é em torno de 9, sendo um valor semelhante ao encontrado. Vital *et al.* [23] obtiveram valores bem aproximados para a UF, sendo o pH igual a 8 e o teor de sólidos igual a 61,35%. O conhecimento do pH dos adesivos é importante, pois devem estar próximos ao pH das madeiras que se pretende unir, refletindo desta forma diretamente na qualidade da linha de cola. De forma geral, as madeiras tendem a possuir um pH mais ácido, o que pode provocar um aceleração da cura do adesivo em alguns adesivos, como por exemplo na ureia formaldeído, conforme Iwakiri [22].

Analisando os dados da viscosidade na Tabela 2, a UF foi a resina adesiva que apresentou maior valor, o que corresponde a algumas desvantagens citadas por Iwakiri [22], como a possibilidade de apresentar uma maior dificuldade de espalhamento, menor penetração na madeira e linha de cola mais espessa. O adesivo menos viscoso foi o TF, o que indica alta fluidez e algumas vantagens sobre os adesivos mais viscosos, porém proporciona linha de cola menos espessa e, conseqüentemente, menos resistente.

A PUR mostrou-se superior no que se refere ao teor de sólidos (Tabela 2). Para a densidade, todos os adesivos apresentaram-se ligeiramente semelhantes variando entre 1,0 a 1,4 g.cm⁻³, no entanto, a MUF e a UF apresentaram os maiores valores.

3.3 Resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira

Os valores médios para a resistência ao cisalhamento na linha de cola e a falha na madeira são apresentados na Tabela 3. Observa-se que o PVA teve um melhor desempenho, pois promoveu uma maior resistência ao cisalhamento na linha de cola, seguido pela UF, RF e MUF com valores ligeiramente aproximados, não diferindo estatisticamente entre si. Outros dados encontrados na literatura mostram que o PVA também foi mais resistente que a UF, porém, em madeira sem tratamento preservativo, a exemplo do resultado obtido por Pincelli *et al.* [24] que encontraram uma tensão de ruptura para o PVA e para a UF na ordem de 13,44 e 11,88 MPa, respectivamente, em estudo de madeiras termorretificadas.

Apesar do baixo valor de resistência encontrado para o adesivo à base de mamona (PUR), segundo outros estudos, como o realizado por Azambuja e Dias [25], observa-se que o mesmo é viável na produção de madeira laminada colada, do ponto de vista do desempenho estrutural. Nesse caso específico, pode-se inferir que a presença dos sais na madeira preservada influenciou de forma negativa sua estabilidade.

Tabela 3: Resistência ao cisalhamento na linha de cola e falha na madeira tratada quimicamente de *Eucalyptus cloeziana* com CCA.

ADESIVOS	$f_{v0,m}$ (MPa)	FALHA NA MADEIRA (%)	UMIDADE (%)
PVA	12,8594 a* ³	86,308 a* ³	12,79
UF	12,4017 a	88,250 a	12,93
RF	11,6461 a	91,889 a	12,58
MUF	11,4444 a	95,556 a	13,13
PUR	8,2928 b	44,167 b	13,12
TF	1,6233 c	** ⁴	13,15

O TF apresentou a menor resistência em relação aos outros adesivos, supostamente devido a influência de seu pH ácido (Tabela 2) ou ainda, pela interação química do adesivo com o preservante impregnado na madeira. Prova disso, Vick e Kuster (1992), citados por Bertolini *et al.* [26], afirmaram que a interação do adesivo com a presença do CCA na madeira pode ser desfavorecida pela aderência química desse preservante às paredes celulares bloqueando assim, parte das forças moleculares de atração. No entanto, existem controvérsias em relação ao pH, pois o PVA também apresenta natureza ácida e sua linha de cola mostrou-se resistente ao cisalhamento.

Vários fatores podem ter influenciado na resistência das linhas de cola ou mesmo na colagem

³ Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p > 0,05).

⁴ Em todas as repetições o valor observado foi zero (TF não foi incluído na ANOVA).

adequada, podendo destacar que o material utilizado era resíduo composto por peças com mais alburno do que cerne, ou vice-versa. O pH dos extrativos da madeira também pode ter prejudicado a resistência por inibir reações químicas no endurecimento do adesivo, assim como outras propriedades da matéria-prima, sejam elas anatômicas, físicas ou mecânicas, conforme Iwakiri [22]. Além da composição e características da madeira, o mesmo autor cita a influência das características físico-químicas do adesivo e os procedimentos adotados na colagem, como a superfície do aderente.

Em relação aos adesivos PVA e RF, Plaster *et al.* [19] encontraram resistências na linha de cola iguais a 13,63 e 13,73 MPa, respectivamente, para uma classe de densidade de 0,70 e 0,79 g.cm⁻³ em madeira de eucalipto comercial sem tratamento prévio.

Lima *et al.* [27] encontraram valores da ordem de 7,94 a 6,98 MPa em colagem com PVA em madeira de eucalipto com idade estimada de 14 anos, valores inferiores ao deste estudo, indicando a idade como um fator importante a ser considerado. Ressalta-se que, mesmo em madeiras contendo preservativo ácido, a colagem foi superior ao estudo encontrado.

Em relação ao adesivo PUR, resultados obtidos por Azambuja [28] em amostras com e sem tratamento de CCA, indicaram a viabilidade de aplicação desse adesivo em vigas de MLC com bom desempenho estrutural.

Em relação à porcentagem de falha na madeira, houve diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos (Tabela 3). Para o adesivo TF, houve um rompimento de 100% na linha de cola indicando que sua utilização não apresenta segurança para colagem em madeira preservada quimicamente, se comparado aos outros adesivos. Esse comportamento foi similar ao encontrado por Teodoro e Lelis [29], em que os valores de falha na madeira encontram-se entre 0 e 7,81% com taninos provenientes de acácia-negra e de eucalipto.

A MUF apresentou maior porcentagem numérica de falha na madeira, não diferindo estatisticamente ($p > 0,05$) de RF, UF e PVA, entretanto, obteve o quarto menor valor de resistência na linha de cola (Tabela 3). Para o adesivo PVA ocorreu um fato semelhante, o qual obteve uma maior resistência ao cisalhamento na linha de cola, porém, exibiu o quarto menor valor de porcentagem de falha na madeira. Della Lúcia e Vital [30] colaram peças de madeira de *Eucalyptus saligna* com PVA e resorcinol e encontraram valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola maior para o PVA e com valores menores de falha na madeira para o adesivo resorcinólico.

Como já mencionado, para esta avaliação foram utilizadas madeiras com tratamento preservativo e na literatura existem vários trabalhos sobre a falha na madeira, porém sem preservativo. Lima *et al.* [27] encontraram valores inferiores aos obtidos para o PVA, o RF e a UF, respectivamente 19,35, 44,58 e 61,23% com madeira de clones de eucalipto. Os valores de porcentagem de falha obtidos para MUF, PVA, RF e UF, superaram o valor mínimo recomendado pela norma ASTM D 5751 [31], de 60%.

Apesar de a UF apresentar uma maior viscosidade, isto não comprometeu os resultados do cisalhamento na linha de cola (Tabela 3).

Ensaio de delaminação

A partir da Tabela 4, pode-se constatar que as linhas de cola com os adesivos PVA, RF e MUF apresentaram um melhor desempenho após serem submetidas ao ensaio de delaminação, diferente do que ocorreu para aquelas com os adesivos UF (Figura 3) e TF. Segundo Fiorelli [32], a avaliação da eficiência dos adesivos, quando submetidos a variações de umidade, pressão e temperatura são de fundamental importância para garantir a integridade do elemento estrutural em MLC durante a vida útil da construção.

Tabela 4: Valores médios encontrados para o ensaio de delaminação na madeira tratada quimicamente com CCA.

ADESIVO	DELAMINAÇÃO (%) ⁵
TF	100,00
UF	80,08 a
PUR	14,91 b
PVA	0,00
RF	0,00

⁵ a>b pelo teste F ($p < 0,05$). Para TF, PVA, RF e MUF, em todas as repetições os valores foram constantes (não foram incluídos na ANOVA).

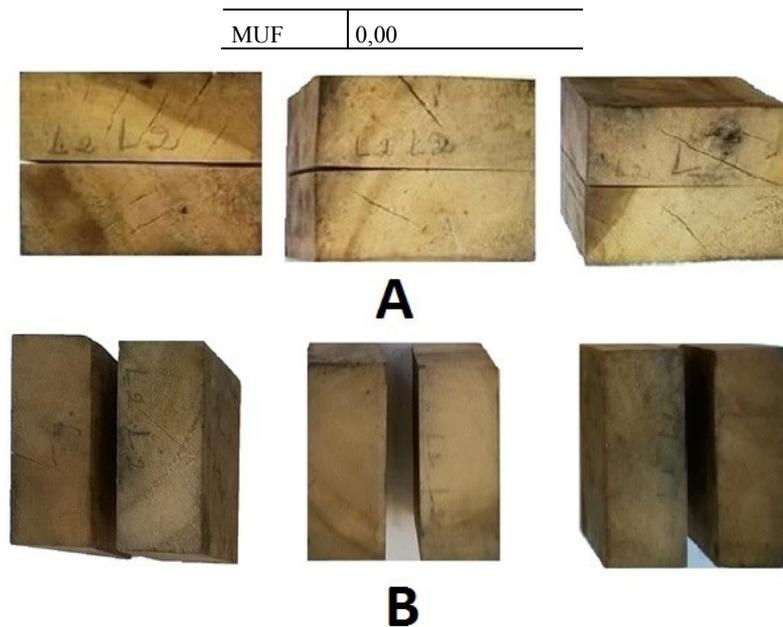
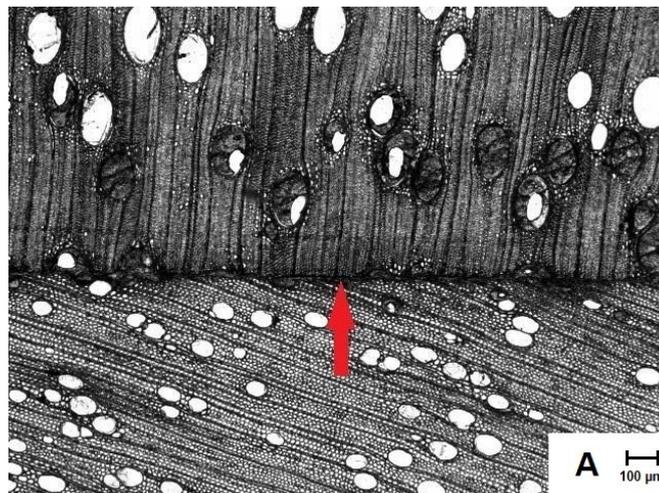


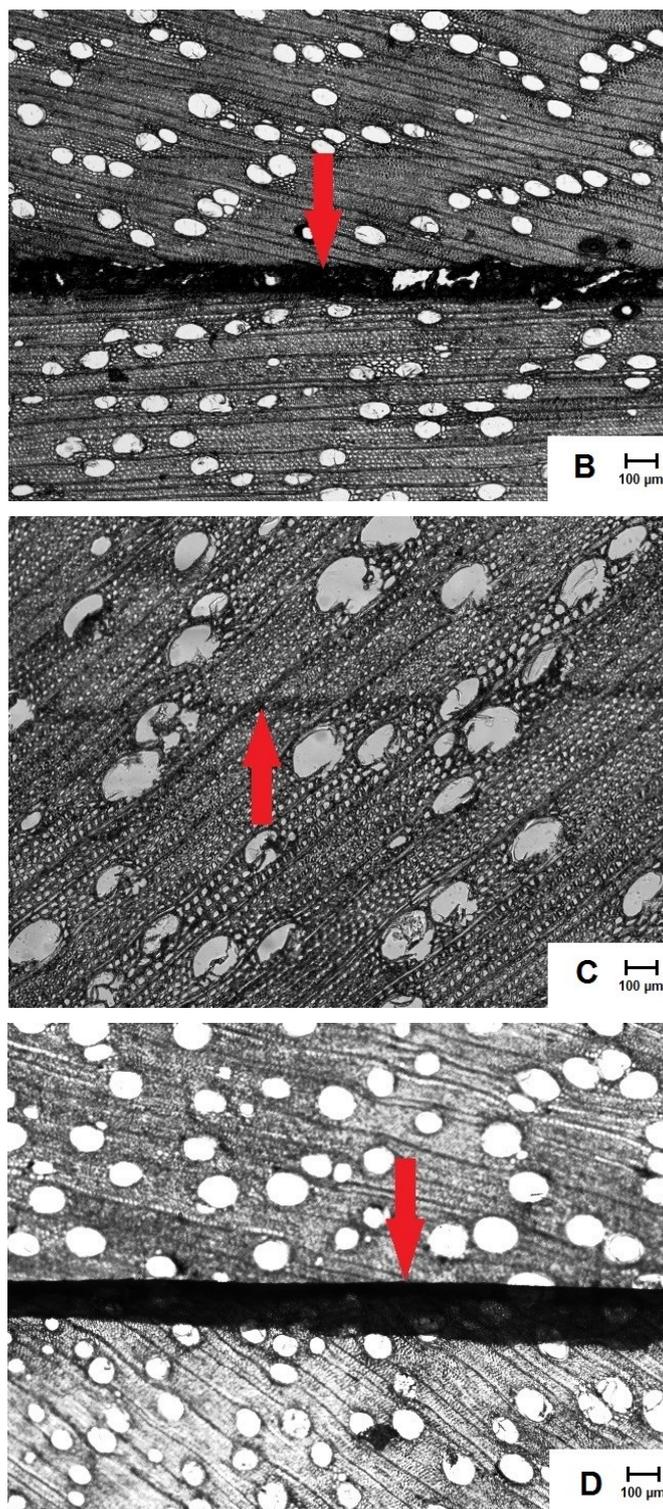
Figura 3: Corpos de prova após ensaio de delaminação apresentando falha na linha de cola com o adesivo ureia formaldeído (A) e tanino-formaldeído (B).

Pode-se observar na Tabela 4 que o adesivo UF proporcionou um valor de delaminação elevado (80,08%), possivelmente devido à sua alta viscosidade, o que dificultou uma penetração na superfície da madeira. Pizzi [33] também menciona a sua solubilidade em água, o que pôde contribuir para este fato.

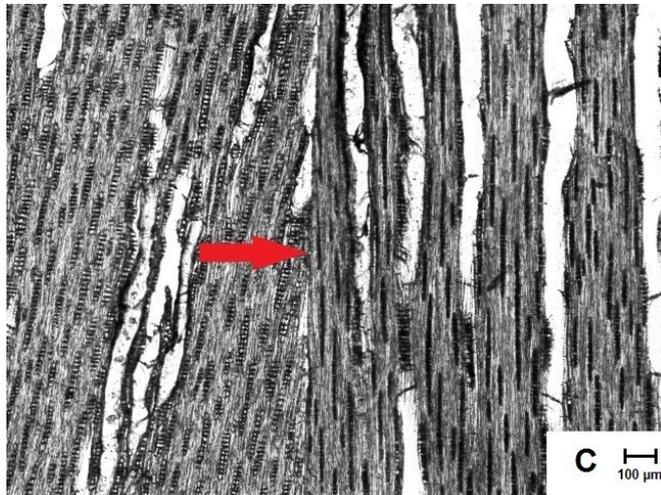
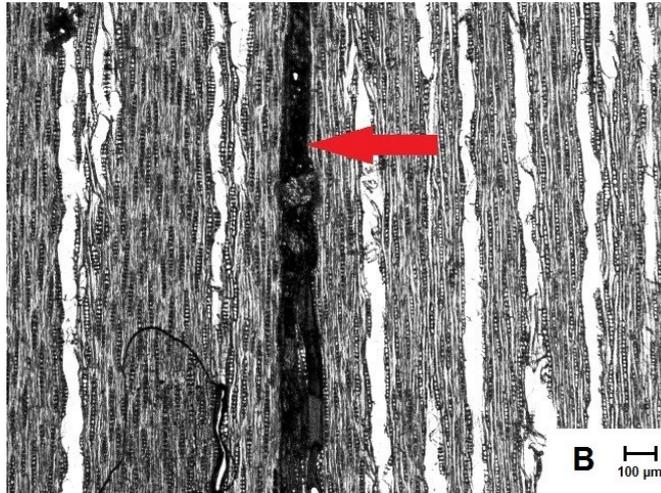
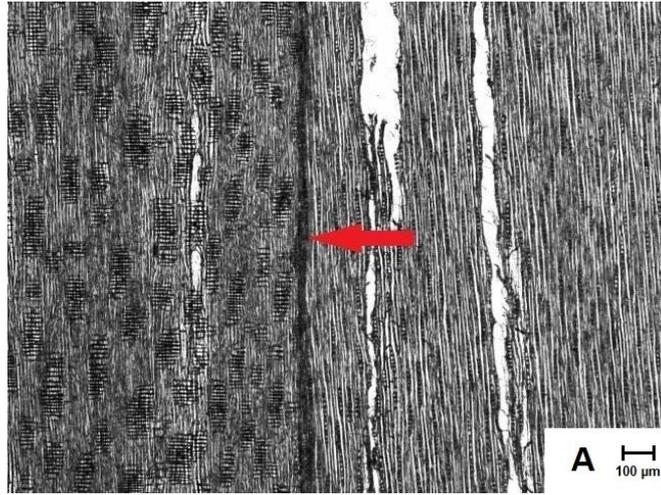
3.4 Estudo da interface madeira-adesivo

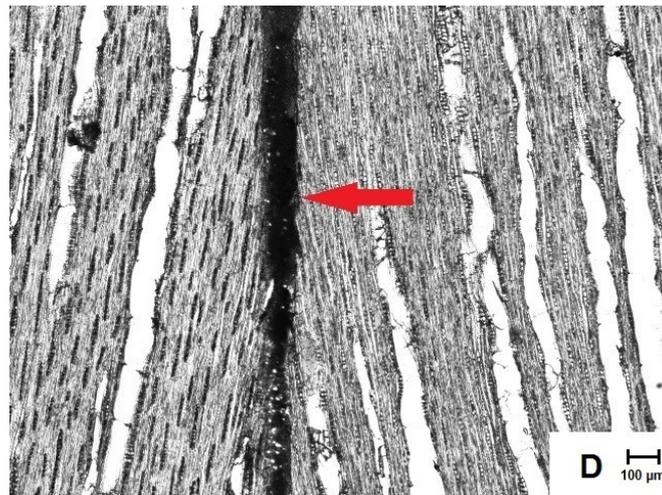
As Figuras 4 e 5 ilustram a interface madeira-adesivo das juntas coladas de madeiras de *Eucalyptus cloeziana*, onde a coloração mais escura representa o adesivo na estrutura anatômica da madeira.





Figuras 4: Fotomicrografias da interface madeira – adesivo no plano transversal das juntas coladas da madeira de *Eucalyptus cloeziana* com os adesivos MUF (A), RF (B), PUR (C) e PVA (D). Seta vermelha indica a linha de cola.





Figuras 5: Fotomicrografias da interface madeira – adesivo no plano longitudinal das juntas coladas de madeira de *Eucalyptus cloeziana* tratada quimicamente com CCA para os adesivos MUF (A), RF (B), PUR (C) e PVA (D). Seta vermelha indica a linha de cola.

Avaliando as Figuras 4 e 5, observa-se que a linha de cola apresenta-se desuniforme, ou seja, não possui a mesma espessura ao longo da sua interface, o que pode ser demonstrado numericamente por meio da Tabela 5.

Tabela 5: Penetrabilidade dos adesivos na madeira de *Eucalyptus cloeziana* nas faces transversal e longitudinal tangencial, preservada quimicamente com CCA.

ADESIVO	FACE TRANSVERSAL (µm)		FACE LONGITUDINAL TANGENCIAL (µm)	
	LP ⁶	LE ⁶	LP ⁶	LE ⁶
MUF	19,60 c	167,96 a	270,79 a	** ⁷
RF	52,13 a	60,23 b	62,48 b	52,14
PUR	13,41 c	15,79 b	7,86 b	**
PVA	35,03 b	162,77 a	65,03 b	**

Foi possível constatar que o adesivo MUF apresentou maior penetrabilidade na estrutura anatômica da madeira em relação aos demais (Tabela 5), o que possibilita uma melhor resistência, mesmo não apresentando uma linha de cola estendida detectável e uma viscosidade mais elevada. Linhas de cola estendida também não foram observadas para os adesivos PUR e PVA na face longitudinal tangencial. De acordo com Chandler *et al.* [34], uma melhor penetração do adesivo na estrutura anatômica da madeira está associada a certas condições muito específicas de umedecimento da superfície. Outro parâmetro que pode influenciar nesse comportamento é a temperatura ambiente e do aderente, além de seu acabamento superficial.

4. CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas, conclui-se que o tratamento preservativo interferiu nas propriedades física e mecânica da madeira maciça de *Eucalyptus cloeziana* quando comparadas a tratada com a não tratada.

Na MLC houve diferença significativa na resistência ao cisalhamento na linha de cola em razão dos diferentes adesivos utilizados.

Os adesivos MUF, RF e PVA apresentaram os melhores resultados, tendo maior penetração no estudo interface madeira-adesivo e, conseqüentemente, resistindo melhor nos ensaios de cisalhamento e delaminação.

Já os adesivos TF, UF e PUR não são indicados para colagem a frio em madeira sólida preservada quimicamente de *Eucalyptus cloeziana*, pois apresentaram, em todas as análises, resultados abaixo do

⁶ LP – Linha de cola principal; LE – Linha de cola estendida. Em que as médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

⁷ ** Em todas as repetições o valor observado foi zero.

recomendado para aplicações estruturais.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao empresário Sr. Bruno Bragança pela doação do material utilizado neste estudo; à empresa Seta, pela doação do tanino; à empresa Momentive Química do Brasil Ltda., pela doação dos adesivos; e ao Sr. José Ricardo de Lello Vicino proprietário da Plural Química LTDA., pela doação do adesivo à base de mamona.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] ABREU, L. B., MENDES, L. M., SILVA, J.R.M., *et al.*, “Aproveitamento de resíduos de painéis de madeira gerados pela indústria moveleira na produção de pequenos objetos”, *Revista Árvore*, v. 33, n. 1, pp. 171-177, Jan.-Fev. 2009.
- [2] PEREIRA, A. F., CARVALHO, L. S. C., Pinto, A.C.O., *et al.*, “Resíduo de madeira: limites e possibilidades de seu uso como matéria-prima alternativa”, In: *Congresso Brasileiro de Pesquisa e desenvolvimento em Design*, v. 9, pp. 3971, São Paulo, 2010.
- [3] BERTOLINI, M. S., LAHR, F.A.R., NASCIMENTO, M.F., *et al.*, “Accelerated artificial aging of particleboards from residues of CCB treated Pinus sp. and castor oil resin”, *Materials Research*, v. 16, pp. 293-303, Jan. 2013.
- [4] BOA, A. C., GONÇALVES, F.G., OLIVEIRA, J.T.S., *et al.*, “Resíduos madeireiros de eucalipto colados com resina ureia formaldeído à temperatura ambiente”, *Scientia Forestalis*, v. 42, n. 102, pp. 279-288, Jun. 2014.
- [5] CARNEIRO, A. C. O., VITAL, B. R., PEREIRA, F. A., *et al.*, “Adesivos e sua importância na indústria madeireira”, In: Oliveira, J. T. S., Fiedler, N. C., *et al.* (eds.), *Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro II*. 1 ed., capítulo 4, Vitória, ES, Aquarius, 2007.
- [6] BRADY, D. A., KAMKE, F. A., “Effects of hot-pressing parameters on resin penetration”, *Forest Products Journal*, v. 38, n. 11/12, pp. 63-68, Out. 1988.
- [7] ALBINO, V. C. S., MORI, F. A., MENDES, L.M., *et al.*, “Estudo da interface madeira-adesivo de juntas coladas com resorcinol-formaldeído e madeira de *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden”, *Scientia Forestalis*, v. 38, n. 87, pp. 509-516, Set. 2010.
- [8] IWAKIRI, S., NIELSEN, I. R., ALBERTI, R. A. R., *et al.*, “Avaliação da influência de diferentes composições de lâminas em compensados estruturais de *Pinus elliottii* e *Eucalyptus saligna*”, *Cerne*, v. 6, n. 2, pp. 19-24, Jul. 1999.
- [9] PFEIL, W., PFEIL, M., *Estruturas de madeira*, 6ª ed., Rio de Janeiro, LTC, 2003.
- [10] SEGUNDINHO, P. G. A., ZANGIÁCOMO, A.L., CARREIRA, M.R., *et al.*, “Avaliação de vigas de madeira laminada colada de cedrinho (*Erisma uncinatum* Warm.)”, *Cerne*, v. 19, n. 3, pp. 441-449, Jul.-Set. 2013.
- [11] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-7190: *Projeto de estruturas de madeira*. Rio de Janeiro, ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1037-06: *Standard test methods for evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*. Pennsylvania, ASTM - American Society for Testing and Materials, 2012.
- [13] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 905-08: *Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading*. Pennsylvania, ASTM – American Society for Testing and Materials, 2013.
- [14] BRITO, E. O., *Produção de chapas de partículas de madeira a partir de maravalhas de Pinus elliottii Engelm. Var. elliottii plantado no sul do Brasil*, Tese de D. Sc., UFPR - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil, 1995.
- [15] BULIGON, E. A., HASELEIN, C.R., GATTO, D.A., *et al.*, “Propriedades físico-mecânicas de painéis de lâminas paralelas reforçados com PRFV”, *Ciência Florestal*, v. 25, n. 3, pp. 731-741, Jul.-Set. 2015.
- [16] AMERICAN INSTITUTE OF TIMBER CONSTRUCTION. AITC T110: *Cyclic delamination test*. Centennial, AITC - American Institute of Timber Construction, 2007.

- [17] PEREIRA, J. C. D., STURION, J.A., HIGA, A.R., *ET al.*, “Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil”, *Embrapa Florestas*, Documentos 38, pp. 113, Colombo, PR, 2000.
- [18] SOUSA JÚNIOR, W. P., *Propriedades físicas, mecânicas e anatômicas das madeiras de Eucalyptus cloeziana e de Eucalyptus urophylla oriundas dos municípios de Turmalina e de Paraopeba (MG)* Dissertação de M. Sc., UFV - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 2004.
- [19] PLASTER, O. B., OLIVEIRA, J. T. S., ABRAHÃO, C. P., *et al.*, “Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus sp*”, *Cerne*, v. 14, n. 3, pp. 251-258, Jul.-Set. 2008.
- [20] YILDIZ, U. C., Temiz, A., Gezer, E.D., *et al.*, “Effects of the wood preservatives on mechanical properties of yellow pine (*Pinus sylvestris* L.) wood”, *Building and Environment*, v. 39, n. 9, p. 1071-1075, Set. 2004.
- [21] TEREZO, R. F., NETO, J. P. R., *et al.* “Influências de preservantes hidrossolúveis na resistência mecânica da madeira”, *Revista da Madeira*, n. 89, Abr. 2005. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=737>. Acessado em outubro de 2015.
- [22] IWAKIRI, S., *Painéis de madeira reconstituída*, FUPEF, Curitiba, PR, 2005.
- [23] VITAL, B. R., CARNEIRO, A. C. O., PIMENTA, A. S., *et al.*, “Adesivos à base de taninos das cascas de duas espécies de eucalipto para produção de chapas de flocos”, *Revista Árvore*, v. 28, n. 4, pp. 571-582, Jul.-Ago. 2004.
- [24] PINCELLI, A. L. P. S. M., BRITO, J. O., *et al.*, “Avaliação da termorreificação sobre a colagem na madeira de *Eucalyptus saligna* e *Pinus caribaea* var. *hondurensis*”, *Scientia Forestalis*, v. 1, n. 61, pp. 122-132, Jun. 2002.
- [25] AZAMBUJA, M. A., DIAS, A. A., “Use of castor oil-based polyurethane adhesive in the production of glued laminated timber beams”, *Materials Research*, v. 9, n. 3, pp. 287-291, Jul.-Set. 2006.
- [26] BERTOLINI, M. S., CHRISTOFORO, A. L., FERRO, F. S., *et al.*, “Madeira tratada com CCA e CCB na produção de painéis de partículas: comparativo de desempenho”, In: *Encontro Brasileiro em Madeiras e Estruturas de Madeira*, v. 14.,pp. 28, Natal, Rio Grande do Norte, 2014.
- [27] LIMA, C. K. P., MORI, F.A., MENDES, L.M., *et al.*, “Colagem da madeira de clones de *Eucalyptus* com três adesivos comerciais”, *Scientia Forestalis*, v. 36, n. 77, pp. 73-77, Mar. 2008.
- [28] AZAMBUJA, M. A., *Avaliação do adesivo poliuretano à base de mamona para fabricação de madeira laminada colada (MLC)*, Dissertação de M. Sc., USP - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2002.
- [29] DELLA LUCIA, R. M., VITAL, B. R., “Avaliação da qualidade de juntas coladas de madeira de três espécies de *Eucalyptus*”, *Revista Árvore*, v. 5, n. 2, pp. 172-180, Jul.-Dez. 1981.
- [30] TEODORO, A. S., LELIS, R. C. C., “Colagem de madeira sólida com adesivo natural à base de tanino”, *Revista da Universidade Rural, Série Ciências da Vida*, v. 25, n. 1, pp. 55-59, Jan.-Jun. 2005.
- [31] American Society for Testing and Materials. ASTM D 5751: *Adhesives used for laminate joints in nonstructural lumber products*. Pennsylvania, ASTM - American Society for Testing and Materials, 2005.
- [32] FIORELLI, J., *Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro*, Tese de D. Sc., USP - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2005.
- [33] PIZZI, A. “Urea-Formaldehyde Adhesives”, In: Pizzi, A., Mittal, K. L., (eds.), *Handbook of Adhesive Technology*, 2 ed, chapter 31, New York, USA, Marcel Dekker, 2003.
- [34] CHANDLER, J. G., BRANDON, R. L., *et al.*, “Examination of adhesive penetration in modified wood using fluorescence microscopy”, In: *Ascspring 2005 Convention and Exposition*, pp.10, Columbus, 2005. Disponível em: <http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2005/fpl_2005_chandler001.pdf?>. Acessado em Outubro de 2015.