

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FLORESTAIS E DA MADEIRA

LÉLIO CAIADO ABREU FRANÇA

MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC) DE *Acacia mangium* Willd  
PRODUZIDA COM ADESIVOS ESTRUTURAIS

JERÔNIMO MONTEIRO  
ESPÍRITO SANTO  
2012

LÉLIO CAIADO ABREU FRANÇA

MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC) DE *Acacia mangium* Willd  
PRODUZIDA COM ADESIVOS ESTRUTURAIS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

JERÔNIMO MONTEIRO

ESPÍRITO SANTO

2012

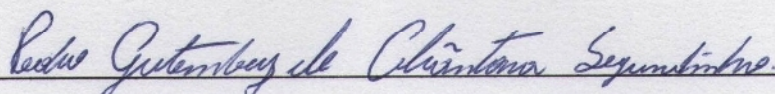
LÉLIO CAIADO ABREU FRANÇA

MADEIRA LAMINADA COLADA (MLC) DE *Acacia mangium* Willd  
PRODUZIDA COM ADESIVOS ESTRUTURAIS

Monografia apresentada ao Departamento de Ciências Florestais e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Industrial Madeireiro.

Aprovada em 25 de Outubro de 2012.

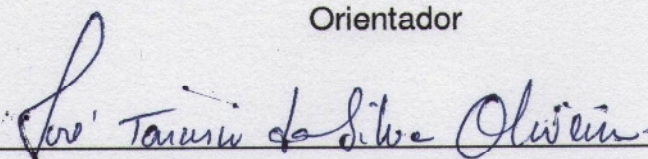
COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. D.Sc. Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho

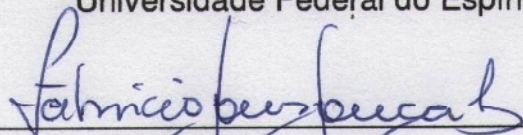
Universidade Federal do Espírito Santo

Orientador



Prof. D.Sc. José Tarcísio da Silva Oliveira

Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. M.Sc. Fabrício Gomes Gonçalves

Universidade Federal do Espírito Santo

"A madeira é uma palavra comum, mas esconde um mundo de encantamento e admiração."

Theodor Heuss (Político alemão, 1884-1963).

## **AGRADECIMENTOS**

A Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, pela oportunidade de realizar o curso de Engenharia Industrial Madeireira.

A minha família, pelo amor e dedicação ao longo da minha vida. À minha mãe, Renilda, ao meu pai, Francisco e ao meu irmão, Carlos, por serem fonte de inspiração, dedicação e amor, e por estarem sempre ao meu lado.

Aos meus familiares – em especial aos meus tios pelo incentivo e carinho.

Ao professor Pedro Gutemberg de Alcântara Segundinho, pela valiosa orientação, confiança e apoio. Aos demais professores que contribuíram para minha formação, em especial aos professores José Tarcísio da Silva Oliveira, Fabrício Gomes Gonçalves, Carlos Alberto Manfre, Djeison Cesar Batista, Wendel Sandro de Paula Andrade e Clovis Eduardo Nunes Hegedus.

Ao técnico do Laboratório de Ciência da Madeira (LCM) José Geraldo Lima de Oliveira, pela ajuda na realização dos ensaios mecânicos e ao marceneiro Eley Palácio Constantino, pela amizade e ajuda na preparação dos corpos de prova.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Ciências Florestais e da Madeira que direta ou indiretamente contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

## RESUMO

A fabricação e a utilização de Madeira Laminada Colada (MLC) estão consolidadas há muito tempo em países da Europa e nos Estados Unidos. Esta técnica permite uma utilização racional do recurso madeireiro, uma vez que consiste na colagem de peças de madeira reconstituídas em formato de lâminas (tábuas) dispostas com as fibras paralelas entre si, o que proporciona vigas com ganho em comprimento, altura e estabilidade dimensional. O presente trabalho teve como propósito avaliar a qualidade da MLC produzida utilizando a madeira de *Acacia mangium* Willd e os adesivos comerciais poliuretano líquido (PUR) e melamina-uréia-formaldeído (MUF) visando sua aplicação em elementos estruturais. Foram produzidos 24 elementos de MLC para cada tratamento, sendo colagem com o adesivo PUR com pressão de 0,8 MPa e gramatura de 300 g.m<sup>-2</sup>, colagem com o adesivo MUF com pressão de 0,8 MPa e gramatura de 500 g.m<sup>-2</sup> e adesivo MUF com pressão de 1,2 MPa e gramatura de 500 g.m<sup>-2</sup> dividida nas duas faces. Os testes foram feitos a partir dos corpos de prova obtidos dos elementos de MLC. Por meio de ensaios mecânicos padronizados foram determinados à resistência mecânica aos esforços de compressão paralela as fibras, cisalhamento nas linhas de cola e flexão estática. Os resultados obtidos foram comparados com os mesmos ensaios com corpos de prova de madeira maciça. Os dados foram submetidos à análise de variância e ao teste *Tukey* ao nível de 5% de significância. Avaliou-se a qualidade das linhas de cola dos adesivos empregados por meio de ensaios de delaminação. Os resultados obtidos levaram a conclusão de que existe a viabilidade do emprego da madeira de *Acacia mangium* para aplicações estruturais e o adesivo MUF mostrou-se ser o mais adequado para fabricação de elementos estruturais de MLC.

**Palavras-chave:** Elementos estruturais, Colagem da madeira, Características físicas e mecânicas da madeira.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE QUADROS .....	x
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 O problema e sua importância .....	2
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo geral .....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1 A espécie <i>Acacia mangium</i> Willd .....	4
2.1.1 Propriedades físicas e mecânicas .....	6
2.2 Madeira Laminada Colada (MLC) .....	8
2.3 Adesivos e colagem de madeiras .....	10
3 METODOLOGIA.....	14
3.1 Preparo da Madeira.....	14
3.2 Confecção dos Elementos de MLC .....	14
3.3 Caracterização das Propriedades da Madeira .....	16
3.4 Caracterização das Propriedades da MLC.....	16
3.5 Ensaio de Delaminação.....	20
3.6 Análise Estatística .....	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	22
4.1 Propriedades Físicas da Madeira .....	22
4.2 Propriedades Mecânicas da Madeira e da MLC.....	23
4.3 Ensaio de delaminação .....	29
5 CONCLUSÕES .....	31

6 REFERÊNCIAS.....	32
APÊNDICES.....	38



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características e área de plantios florestais com grupos de espécies no Brasil, 2009 e 2010.....	5
Tabela 2 – Esquema dos tratamentos utilizados para o experimento.....	15
Tabela 3 – Propriedades físicas da madeira de <i>Acacia mangium</i> Willd.....	22
Tabela 4 – Resistência à compressão axial dos tratamentos.....	23
Tabela 5 – Resistência ao cisalhamento dos tratamentos.....	25
Tabela 6 – Módulo de elasticidade dos tratamentos.....	31

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aplicação do adesivo na superfície das lâminas.....	15
Figura 2 – Prensagem (A) e aspecto do elemento MLC colado (B).....	16
Figura 3 – Esquema da retirada dos corpos de prova de MLC.....	17
Figura 4 – Corpo de prova de MLC para compressão paralela às fibras (unidades em mm).....	17
Figura 5 – Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola (unidades em mm).....	18
Figura 6 – Malha para medir a falha na madeira no ensaio de cisalhamento (unidades em mm).....	18
Figura 7 – Corpo de prova tipo ‘H’ (push-out) para ensaio de cisalhamento à compressão para duas linhas de cola (unidades em mm).....	19
Figura 8 – Ensaio de flexão estática em corpo de prova colado.....	19
Figura 9 – Aparato experimental para ensaio de delaminação.....	20
Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de delaminação (unidades em mm).....	21
Figura 11 – Resistências dos tratamentos a compressão paralela às fibras.....	24
Figura 12 – Resistências dos tratamentos ao cisalhamento.....	25
Figura 13 – Corpos de prova do tipo ‘H’, rompido na madeira (A) e intacto (B).....	26
Figura 14 – Percentual de falha na madeira.....	27
Figura 15 – Módulo de elasticidade à flexão estática.....	28
Figura 16 – Corpos de prova após ensaio de delaminação apresentando falha na linha de cola.....	29

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados do adesivo poliuretano líquido.....	11
Quadro 2 – Dados do adesivo melamina-uréia-formaldeído.....	12

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo da história, as características únicas e abundância da madeira a tornaram um material natural para residências e outras estruturas, móveis, ferramentas, veículos e objetos decorativos. Hoje, pelas mesmas razões, a madeira é valorizada para uma infinidade de usos.

Especialmente para seu uso na construção civil, a madeira maciça apresenta algumas restrições, quanto às dimensões, a anisotropia da madeira, defeitos naturais como nós, inclinação da grã, lenhos de reação e percentagem de lenho juvenil e adulto. O desconhecimento dessas características tem tornado a madeira maciça menos competitiva nesse setor.

A Madeira Laminada Colada (MLC) é um produto de madeira projetado, composto de lâminas de madeira individuais coladas com adesivos estruturais. Esta técnica aperfeiçoa o uso de um recurso renovável, a madeira, desde que grandes membros de MLC podem ser manufaturados de árvores de plantios florestais comerciais, com melhor aproveitamento da madeira, eliminando os defeitos e ampliando a possibilidade de uso do material.

Muitas espécies diferentes são usadas na produção de elementos estruturais de MLC, que se justifica pela redução da disponibilidade de espécies nativas que oferecem madeira como a qualidade e dimensões requeridas além de ser uma técnica viável para utilização racional da madeira de florestas plantadas, onde nesse contexto encontra-se a *Acacia mangium*.

Algumas pesquisas vêm sendo realizadas em universidades do País como na USP de São Carlos e na UFSC em Santa Catarina. No Brasil, os trabalhos científicos desenvolvidos com MLC avaliaram resistência, elasticidade e distribuições de tensões em vigas de MLC. São disponíveis normas nacionais e estrangeiras que regulamentam os ensaios e determinam métodos de testes para componentes estruturais de MLC.

Atualmente a produção de MLC se concentra em países de clima temperado, onde os adesivos empregados são atestados para o uso em madeira de coníferas, sendo desconhecido em alguns casos o comportamento de espécies exóticas e folhosas tropicais para tal finalidade.

Portanto, se faz necessários estudos para caracterizar potenciais espécies que possam ser empregadas para garantir o controle de qualidade na manufatura dos elementos de MLC. O presente trabalho foi realizado para investigar as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Acacia mangium*, com o propósito de produzir elementos em MLC para aplicações estruturais.

## 1.1 O problema e sua importância

O desenvolvimento da MLC no Brasil é de grande importância para a ampliação da utilização da madeira na construção civil. Com a redução da disponibilidade de espécies de madeiras nativas torna-se necessário desenvolver alternativas técnicas viáveis para a utilização racional da madeira proveniente de florestas plantadas.

No estado do Espírito Santo, atualmente esta técnica não se encontra em desenvolvimento e não há grande utilização de MLC, possivelmente devido ao próprio desconhecimento do setor, pela ainda disponibilidade de madeiras nativas para fins estruturais no mercado e os custos para obtenção deste produto de outros estados.

Nas últimas décadas os produtos estruturais derivados de madeira, tal como a MLC, têm propiciado novos campos de aplicação para a madeira, uma vez que apresentam padrões compatíveis com as exigências das construções modernas. O estudo é importante e relevante para a área porque reflete o estado da arte, a tecnologia atual empregada em diversos países desenvolvidos.

Atualmente a maioria dos elementos estruturais em MLC é produzida principalmente com a madeira de *Pinus*. No Brasil, além da produção com *Pinus*, também são confeccionadas vigas com madeiras de eucalipto, espécie exótica não pertencente à flora nativa brasileira (TEREZO; SZÜCS, 2010).

Portanto, são necessárias pesquisas que contribuam para o conhecimento da MLC, como a avaliação das madeiras que melhor possam se adaptar a essa técnica, principalmente as madeiras provenientes de florestas plantadas, e sobre os adesivos e tratamentos utilizados no processo de fabricação.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

O objetivo deste trabalho foi produzir e testar elementos de MLC a partir da madeira de *Acacia mangium* Willd com os adesivos estruturais poliuretano (PUR) e melanina-uréia formaldeído (MUF).

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Os objetivos específicos do trabalho foram:

- Determinar as propriedades físicas e mecânicas da madeira.
- Confeccionar os elementos de MLC.
- Determinar por meio de ensaios as resistências de compressão, flexão estática e de cisalhamento nas linhas de cola de corpos de prova de MLC.
- Realizar testes de delaminação.
- Analisar a qualidade dos adesivos e sua eficiência na colagem da madeira.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 A espécie *Acacia mangium* Willd

*Acacia mangium* Willd é uma das espécies de crescimento rápido mais amplamente utilizadas em programas de plantações florestais em toda a Ásia e o Pacífico (KRISNAWATI; KALLIO; KANNINEN, 2011). Suas propriedades desejáveis incluem um crescimento rápido, madeira de boa qualidade e tolerância de uma grande variedade de solos e ambientes (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1983; SAHRI et al., 1998, NUGROHO et al., 2012). A recente pressão sobre os ecossistemas florestais naturais inevitavelmente resultou no uso de árvores de plantações de rápido crescimento, incluindo a *Acacia mangium* como um substituto para sustentar o fornecimento comercial de produtos florestais.

Origina-se das florestas tropicais úmidas do nordeste da Austrália, Papua Nova Guiné e Ilhas Molucas do leste da Indonésia (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1983). Desde a sua introdução bem sucedida em Sabah, na Malásia, em meados dos anos 1960, tem sido amplamente introduzidas em países tropicais e subtropicais (KRISNAWATI, KALLIO, KANNINEN, 2011).

De acordo com dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF), no Brasil em 2010 somou-se uma área total de 6.973.083 ha ocupados por plantios florestais, sendo 4.754.334 ha do gênero *Eucalyptus*, 1.756.359 ha de *Pinus* e outros 462.390 ha que contemplam as espécies não convencionais, como acácia, teca, araucária, pópulus, seringueira, paricá, entre outras, o que representa 6,6% da área total de plantios florestais no Brasil, como pode ser visto mais detalhadamente na Tabela 1.

Tabela 1 – Características e área de plantios florestais com grupos de espécies no Brasil, 2009 e 2010

Espécies	Nome Científico	Estados	Área (ha)	
			2009	2010
<b>Acácia</b>	<b><i>Acacia mearnsii</i> e <i>Acacia mangium</i></b>	<b>RS, RR</b>	<b>174.150</b>	<b>127.601</b>
Seringueira	<i>Hevea brasiliensis</i>	SP, MT, BA	128.460	159.500
Paricá	<i>Schizolobium amazonicum</i>	PA, MA	85.320	85.470
Teca	<i>Tectona grandis</i>	MT, AM, AC, PA	65.240	65.440
Araucária	<i>Araucaria angustifolia</i>	PR, SC	12.110	11.190
Pópulus	<i>Populus spp.</i>	PR, SC	4.030	4.220
Outras	-	-	2.740	8.969
<b>Total</b>			<b>472.050</b>	<b>462.390</b>

Fonte: ABRAF (2012).

Em linhas gerais, a área plantada com o gênero no Brasil vem apresentando redução desde 2008. Em 2010, a área de plantios de *Acacia mangium* e *A. mearnsii* totalizou 127.600 ha, valor 26,7% inferior ao de 2009. Ressalta-se que parte da redução de área deveu-se a atualização dos indicadores de área plantada fornecidos por empresas não associadas da ABRAF.

Há várias vantagens de usar *Acacia mangium*, por questões relacionadas com o ambiente e ser considerado um material sustentável. Isso faz com que a madeira seja adequada para uma ampla gama de produtos, para celulose e papel, painéis de partículas, engradados e cavacos. Ela também tem potencial para madeira serrada, moldagem, mobiliário e folheados. Como tem um poder calorífico de 4800 a 4900 Kcal/kg, a madeira pode ser utilizada para lenha e carvão vegetal. As folhas podem servir como forragem para o gado. Ramos caídos e folhas mortas podem ser usadas para o combustível. Usos não madeireiros incluem produção de adesivos e mel. A serragem fornece substrato



de boa qualidade para a produção de cogumelos shitake (LIM; GAN; CHOO, 2003).

A madeira de *Acacia mangium* possui uma cor bastante atraente, sendo o alburno e o cerne bastante distintos. Têm boa usinagem e pode ser facilmente trabalhada, a secagem da madeira pode ser um pouco difícil, mas se forem aplicados programas de secagem adequados, pode ser seca dentro de qualidade aceitável e com defeitos mínimos. Tem sido relatada uma boa tratabilidade com preservantes e, por conseguinte, pode ser facilmente protegidos contra infestação por agentes biodeterioradores (LIM, GAN, CHOO, 2003).

### 2.1.1 Propriedades físicas e mecânicas

A avaliação da qualidade de madeira pode envolver a consideração de um grande número de propriedades anatômicas, físicas e mecânicas de madeira. A densidade é uma das propriedades físicas mais importantes da madeira, é um dos parâmetros para medir a qualidade da madeira e positivamente correlacionado a resistência mecânica e a contração da madeira.

Segundo Panshin e De Zeeuw (1964) a densidade resulta da interação entre as propriedades químicas e anatômicas da madeira, variando em função de diferenças nas dimensões celulares, interações entre estes fatores e pelo teor de extrativos por unidade de volume no xilema. Outros fatores externos à árvore como, o local de crescimento, clima, solo, altitude, umidade do solo, declividade, vento, espaçamento, associação de espécies e tratamentos silviculturais também são influentes na densidade (KLITZKE, 2007).

A densidade da *Acacia mangium* varia de 0,48 a 0,67 g.cm<sup>-3</sup> dependendo da idade, variação clonal, local de plantio e condições climáticas, e em geral, a densidade da madeira tende a aumentar com a idade (SAHRI et al., 1998; LIM; GAN; CHOO, 2003; CHOWDHURY et al., 2005; ROKEYA et al., 2010).

Chowdhury, Shams e Alam (2005), determinaram as propriedades físicas de três diferentes classes de idades de *Acacia mangium*, o teor de umidade inicial foi de 73%, densidade básica de 0,56 g.cm<sup>-3</sup> e médias de contrações tangenciais, radiais e longitudinais foram 6,7%, 3,2% e 0,3% respectivamente. Os autores mostraram por testes estatísticos que variações nas propriedades físicas não

foram significantes entre as árvores das classes de 15 e 20 anos de idade, mas a classe de 10 anos variou significativamente das outras duas classes. Os autores ainda afirmam que as propriedades físicas da madeira são afetadas pela idade da árvore, sendo a madeira mais densa encontrada na classe de 20 anos de idade e a menor na classe de 10 anos.

Lokmal e Noor (2010) estudaram a variação radial da densidade básica na madeira de *Acacia mangium* de 13 anos de cinco proveniências na Malásia, com a densidade aumentando da medula para a casca, variando de 0,45 a 0,66 g.cm<sup>-3</sup> da medula para a casca com uma variação média e coeficiente de variação de 0,56 g.cm<sup>-3</sup> e 17,05%, respectivamente.

Sahri et al. (1998) descrevem a relação entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira de *Acacia mangium* e *Acacia auriculiformis* sendo afetadas pela variação do local e a procedência das espécies. Encontraram valores médios de densidade aparente variando entre 0,42 a 0,55 g.cm<sup>-3</sup> entre diferentes procedências dos plantios. A contração é moderada com retrações radiais e tangenciais média de 2,7% e 6,4% respectivamente, sendo classificado como médio. A madeira das árvores de seis anos apresentaram valores médios de propriedades mecânicas de módulo de elasticidade (MOE) e módulo de ruptura (MOR) de 6.728 MPa e 80 MPa, respectivamente.

Lim; Gan e Choo (2003) investigaram as características da madeira de *Acacia mangium* de plantios florestais na Malásia. Os autores apresentam dados das propriedades da madeira como densidade, lenho de tração, secagem e tratamento preservativo. Os valores médios de resistências mecânicas foram obtidos nas condições verde e seco ao ar. Encontraram valores médios para o módulo de ruptura (MOR) de 37,8 MPa e 58,4 MPa; módulo de elasticidade (MOE) de 9.579 MPa e 11.671 MPa e compressão paralela às fibras de 30,7 MPa e 43,5 MPa.

Rokeya et al. (2010) fizeram um estudo das propriedades físicas e mecânicas da madeira de um híbrido produzido a partir de cruzamento natural entre duas espécies de madeira *Acacia auriculiformis* e *Acacia mangium*, onde os valores de resistência da madeira para compressão, dureza e cisalhamento, em condições de secagem ao ar foram mais elevados do que da madeira verdes.

## 2.2 Madeira Laminada Colada (MLC)

A MLC teve origem no século XIX em países da Europa, principalmente na Suíça e Alemanha. A tecnologia chegou à América do Norte em 1934, quando foi fundada a primeira empresa para a fabricação de MLC nos Estados Unidos em Peshtigo, Wisconsin, possibilitando o emprego da técnica no campo estrutural (AZAMBUJA, 2006).

O uso de juntas coladas oferece uma opção com amplas possibilidades funcionais e estéticas no projeto de estruturas de madeiras. Atualmente a utilização da MLC em países da América do Norte e Europa é amplamente difundida e empregada em diversas formas como vigas retas e curvas compondo elementos estruturais com grande apelo arquitetônico e decorativo (CHANS, CIMADEVILA, GUTIÉRREZ, 2008).

De acordo com dados publicados pela APA – *The Engineered Wood Association* (2011) percebe-se que a produção de MLC na América do Norte teve um decréscimo entre os anos de 2008 e 2009 devido à crise imobiliária que atingiu os EUA, com tendência de crescimento a partir de 2010. A MLC oferece flexibilidade de *design* virtualmente ilimitado em todas as aplicações, de casas a pontes de estradas, construções comerciais e residenciais, coberturas, estruturas de telhados e arenas esportivas (APA, 2011).

A MLC deve ser fabricada utilizando peças individuais de alta resistência, madeira serrada e seca em câmaras de secagem, laminados juntos sob pressão para formar peças de grandes dimensões que mantem a beleza tradicional da madeira juntamente com a força da engenharia, elevada resistência ao fogo, eficiência térmica e estabilidade dimensional (APA, 2011).

Moody e Hernandez (1997) mencionam que comparado com madeira serrada e outros materiais estruturais, a MLC oferece uma série de vantagens como versatilidade na obtenção de variadas formas para elementos estruturais; possibilidade de aplicação de contra flechas durante o processo de fabricação; baixa relação peso resistência, exigindo menor força para içamento; bom desempenho sob a ação de fogo, seções transversais avantajadas e elevada resistência a agentes corrosivos.

A MLC viabiliza a utilização de madeiras de reflorestamento e de madeiras de baixa a média massa específica que, na confecção do produto, confere rigidez suficiente para aplicação estrutural (TIENNE et al., 2011).

O conhecimento das características de resistência e rigidez é indispensável para o adequado aproveitamento da madeira como material estrutural e que isso deve ocorrer com todas as espécies considerando a multiplicidade de possibilidade de usos, entre eles o emprego de elementos estruturais de MLC (ZANGIÁCOMO, 2003).

Fiorelli (2005) realizou um estudo sobre o efeito da utilização de polímeros reforçados com fibras visando obter um aumento nas propriedades de rigidez e de resistência de elementos estruturais de MLC, também avaliou protótipos de vigas de MLC da espécie *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, sem e com reforço de fibra de vidro e propôs um modelo numérico para cálculo do momento fletor resistente e da rigidez a flexão das vigas de MLC. Realizou ensaios de delaminação que avaliaram a eficiência dos adesivos empregados, indicando resultados positivos.

Miotto (2009) avaliou de forma experimental e numérica, o comportamento estrutural de vigas mistas de MLC e concreto reforçado com fibras de vidro e registrou um acréscimo significativo no módulo de ruptura (MOR) das vigas mistas em relação às vigas de MLC.

Terezo e Szücs (2010) analisaram o desempenho de vigas estruturais em MLC produzidas com a espécie Paricá (*Schizolobium Amazonicum* Huber ex. Ducke) empregando-se os adesivos a base de Resorcinol-Formaldeído e de Emulsão Polimerizada com Isocianato, com base nos resultados obtidos pelos testes de resistência a flexão, cisalhamento e tração normal às linhas de colagem, concluíram que se pode recomendar o uso desta espécie para a fabricação de vigas em MLC com critérios de cálculo da classe C-20 de resistência tendo desempenho compatível com vigas serradas. Apesar da baixa densidade, isso pode ser um fator positivo para a colagem.

Tienne et al. (2011) avaliaram a qualidade e a resistência de juntas de madeira de *Pinus* sp. coladas através de testes de tração, cisalhamento antes e após condições simuladas de serviço externo e testes de delaminação.

Teles (2009) produziu e caracterizou o comportamento tecnológico de vigas de MLC utilizando a espécie *Sextonia rubra* (louro vermelho) e avaliou o

comportamento da adesão na espécie e as propriedades de flexão teórica e experimentalmente. Concluiu que é possível produzir vigas de MLC com a espécie, por possuir propriedades mecânicas adequadas ao uso estrutural.

Os ensaios em corpos de prova de MLC servem para avaliar as qualidades da linha de cola e são obtidos por recomendação a partir de elementos estruturais íntegros. A Norma Brasileira Regulamentadora – NBR 7190 (ABNT, 1997) recomenda ensaios de cisalhamento e tração normal à linha de cola e resistência das emendas dentadas e biseladas. Há ainda vários de testes para MLC estruturais, entre os principais estão o ensaios de delaminação cíclica, teste de cisalhamento e teste de diagnóstico da qualidade de *finger-joint* (AITC, 2007).

### **2.3 Adesivos e colagem de madeiras**

A colagem da madeira desempenha um papel crescente na indústria de produtos florestais e é um fator chave para a utilização eficiente do recurso madeireiro. Os principais usos de adesivos são na fabricação de materiais de construção, incluindo compensados, OSB, aglomerado, MDF, madeira estrutural composta, portas, janelas e molduras, e fábrica de produtos laminados de madeira. Os adesivos são também utilizados na montagem de móveis e armários, fabricação de produtos engenheirados de madeira e construção de estruturas residenciais e comerciais (FRIHART; HUNT, 2010).

Uma evolução significativa na indústria madeireira foi a introdução dos adesivos sintéticos termo endurecedores, isto permitiu a MLC ser utilizada exposta a ambientes exteriores sem preocupação de rompimento da linha de cola. A resina fenol-resorcinol foi introduzida comercialmente na década de 30, e apresenta como característica principal alta resistência à umidade, sendo classificada como de uso exterior (IWAKIRI, 2005).

Com o desenvolvimento desses adesivos resistentes a água, a MLC começou a ser usada com sucesso em estruturas externas permitindo sua utilização na construção dos mais variados tipos de estruturas de coberturas e pontes (FIORELLI, 2005).

Segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997) os adesivos empregados na fabricação das peças estruturais de MLC devem apresentar propriedades

compatíveis às condições ambientais de temperatura e umidade em que os elementos estarão submetidos durante a sua vida útil.

Para produção de MLC no Brasil utiliza-se comumente o adesivo fenol-resorcinol-formaldeído (PRF). Outro tipo de adesivo é o melamina-uréia-formaldeído (MUF), bi-componente, que traz como vantagens um menor tempo de cura e resulta em uma linha de cola transparente após a catalisação (MIOTTO; DIAS, 2009).

De acordo com Vick (2012) os adesivos melamina-uréia-formaldeído são classificados como de uso estrutural, sendo permitido seu uso em ambiente de serviço exterior. Já os adesivos poliuretanos são classificados com uso semi-estrutural e de uso exterior limitado.

Entre os adesivos estruturais há possibilidade do emprego com destaque para o poliuretano líquido, fabricado pela Purbond, é um mono componente líquido utilizado para a produção produtos engenheirados de madeira. É muito utilizado nos países da Europa, fabricado com solventes e isento de formaldeído. As informações técnicas sobre este adesivo podem ser vistas no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados do adesivo poliuretano líquido.

Composição química	Isocianato pré-polímero
Consistência	Livre fluxo
Tempo de montagem	30 minutos
Tempo de cura	75 minutos
Viscosidade Brookfield	Aproximadamente 20.000 MPa. S (Sp5/20UpM/20 ° C, medindo > 8 horas após a produção)
Cor	Bege
Densidade	Aproximadamente 1.100 kg.m <sup>-3</sup>
Teor de sólidos	100%
Inflamabilidade	Baixa
Resistência química.	Contra solventes, ácidos e cáusticas fracas

Fonte: Purbond (2011).

Quadro 2 – Dados do adesivo melamina-uréia-formaldeído.

Aparência	semi opaco líquido viscoso
Viscosidade, 30°C	40 – 50 cPs
Densidade, 30°C	1,200 – 1,220 g.cm-3
pH, 30°C	8,0 – 9,0
Tempo de montagem, 30°C	160 – 200 minutos
Livre de formaldeído	0,4 – 1,0%
Teor de sólidos	(53,5 ± 0,5) %,
Tempo de estocagem, 30°C	1,5 meses

Fonte: Akzonobel (2011).

Para avaliar a resistência de diferentes adesivos, métodos padrão para testes têm sido desenvolvidos. Hoje, existem dois padrões mais utilizados para testar tensão de cisalhamento nas ligações adesivas: ASTM D905, um padrão americano e EN 302-1, uma norma européia.

As propriedades de superfície não são os únicos fatores para o controle da ligação em madeira. A qualidade da colagem também é afetada pelas propriedades físicas da madeira, particularmente densidade, porosidade, teor de umidade, e as propriedades de retratibilidade (contração e inchamento) (FRIHART; HUNT, 2010).

Várias propriedades de madeira afetam as suas características de colagem. Talvez a mais importante seja a densidade da madeira, mas a contração e inchamento com as mudanças de umidade também são fatores importantes, especialmente em longo prazo, quando a manutenção das juntas de cola é requerida. Em certos casos, o conteúdo *pitch*, oleosidade, e na presença de outros produtos de exsudação e extrativos também tem alguma influência sobre a colagem (SELBO, 1975).

Segundo Frihart e Hunt (2010), a adesão envolve fatores mecânicos e químicos que controlam a capacidade do adesivo para unir duas superfícies de madeira. Por a madeira ser porosa, um mecanismo de adesão é o encravamento mecânico. Os adesivos transferem e distribuem cargas entre os componentes, aumentando assim a resistência e a rigidez dos produtos de madeira. A

transferência efetiva de estresse de um membro para outro depende da força dos elos de uma cadeia imaginária através da junta do adesivo colado.

Assim, o desempenho de uma junta colada depende de quão bem os complexos fatores que contribuem para as propriedades das ligações individuais (madeira, adesivo e regiões de interface da madeira e adesivo) são controlados durante a montagem do produto. O padrão para ligações excelentes é que a madeira rompa com a junta adesiva e que a resistência da ligação seja igual à resistência da madeira maciça (FRIHART; HUNT, 2010).

Plaster et al. (2008), estudaram a capacidade de adesão da madeira de eucalipto empregando adesivos a base de resorcinol-formaldeído e acetato de polivinila em que a madeira foi segregada em três classes de densidade e foi avaliada a resistência ao cisalhamento por compressão paralela e o percentual de falha na madeira obtendo resultados satisfatórios, observando-se que a densidade influenciou a adesão das juntas para os dois adesivos empregados.

Alamsyah; Yamada e Taki (2008) estudaram o comportamento da cura com adesivo resorcinol-formaldeído à temperatura ambiente e os efeitos dos extrativos na colagem da madeira de *Acacia mangium* e concluíram que uma combinação de tempo de cura e aplicação de metanol na superfície de lâminas pode melhorar o desempenho de colagem dos laminados colados com resorcinol formaldeído à temperatura ambiente.

Com a crescente utilização de produtos à base de compostos de madeira, torna-se importante entender a interação entre a madeira e os adesivos utilizados na fabricação de produtos colados, principalmente em relação à madeira de florestas plantadas (ALBINO et al., 2010).



## **3 METODOLOGIA**

### **3.1 Preparo da Madeira**

A madeira empregada nesse trabalho foi a *Acacia mangium* Willd proveniente de plantios comerciais com 18 anos da empresa CENIBRA S.A., localizados no Vale do Rio Doce, no município de Belo Oriente, MG. O lote de tábuas passou por uma classificação visual, onde se visou selecionar as tábuas com menor índice de imperfeições, como esmoados e nós e em seguida foram acondicionados em local coberto durante três meses para alcançar o teor de umidade próximo ao de equilíbrio local.

Este material se encontrava disponível no depósito de madeira do Laboratório de Ciência da Madeira (LCM) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). As operações de usinagem necessárias para obtenção dos corpos de prova e das lâminas empregadas na composição dos elementos de MLC foram realizadas no Laboratório de Usinagem da Madeira (LUM) da UFES.

### **3.2 Confeção dos Elementos de MLC**

Para a realização da pesquisa foram produzidas 72 elementos de MLC e utilizaram-se 216 lâminas de dimensões de 25 x 60 x 400 mm (espessura x largura x comprimento). Em cada prensagem foram produzidos 6 elementos de MLC, sendo utilizados 18 lâminas preparadas no mesmo dia da colagem para evitar as movimentações, empenamentos e deformações que por ventura ocorresse em menos de 48 horas após a preparação, a fim de garantir adesão com qualidade e resistência.

Os tratamentos utilizados são apresentados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Esquema dos tratamentos utilizados para o experimento

TRATAMENTO	ADESIVO			PRESSÃO (MPa)
	PUR	MUF 1	MUF 2	
1	300 g.m <sup>-2</sup>	-	-	0,8
2	-	500 g.m <sup>-2</sup>	-	0,8
3	-	-	500 g.m <sup>-2</sup>	1,2
TESTEMUNHA	MADEIRA MACIÇA			

Os adesivos utilizados foram preparados em uma temperatura ambiente de 20°C. Durante o processo de colagem os adesivos foram espalhados com o auxílio de uma espátula diretamente sobre a face das lâminas de madeiras (Figura 1).



Figura 1 – Aplicação do adesivo na superfície das lâminas.

Após os adesivos serem aplicados às superfícies da madeira, as mesmas foram unidas e em seguida aplicou-se a pressão para favorecer a penetração da cola na madeira. Para todos adesivos a prensagem foi mantida por um período mínimo de 6 horas, em um ambiente com temperatura de 20°C e umidade relativa do ar de 65% segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997). Após a retirada das peças da prensa, os elementos de MLC foram mantidos em repouso a uma temperatura ambiente de 20°C durante 10 dias, para atingirem a cura completa dos adesivos (Figura 2).



Figura 2 – Prensagem (A) e aspecto do elemento de MLC colado (B).

### 3.3 Caracterização das Propriedades da Madeira

A caracterização das propriedades físicas do lote de madeira foi feita de acordo com os métodos de ensaios definidos no Anexo B da NBR 7190 (ABNT, 1997). Foram determinados o teor de umidade e a densidade aparente a 12%.

Para caracterização das propriedades mecânicas da madeira maciça, compressão paralela às fibras e cisalhamento, foi utilizada a norma ASTM D143 – *Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber* (ASTM, 2000). Para a realização dos testes de flexão estática foram utilizados corpos de prova com dimensões de 2,0 x 2,0 x 30,0 cm conforme recomendações da norma MB-26 (ABNT, 1940). A amostragem foi de 24 corpos de prova para cada tipo de ensaio, o equipamento para realização dos ensaios mecânicos e aferição dos esforços foi uma máquina universal de ensaios (EMIC - Linha DL 10.000) de 10 toneladas, com sistema automatizado de obtenção de dados.

### 3.4 Caracterização das Propriedades da MLC

A caracterização das propriedades mecânicas dos elementos de MLC foi realizada a partir de ensaios padronizados. Para cada um dos 24 elementos de MLC foi retirado um corpo de prova para cada ensaio mecânico: compressão paralela às fibras (seco e saturado); cisalhamento (seco e saturado); cisalhamento

tipo 'H' seco e ensaio de delaminação. Os corpos de prova foram extraídos de maneira aleatória ao longo do comprimento do elemento de MLC (Figura 3).

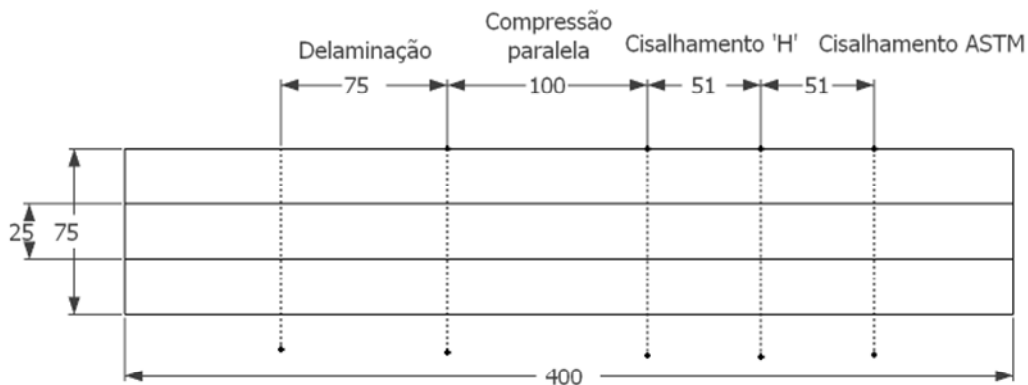


Figura 3 – Esquema da retirada dos corpos de prova de MLC.

Para o ensaio de compressão paralela às fibras, foram aplicados os métodos de ensaio da norma ASTM D143 (ASTM, 2000). Os corpos de prova dos elementos de MLC com dimensões 25 x 25 x 100 mm, foram ensaiados nas condições seca e saturada, Figura 4.

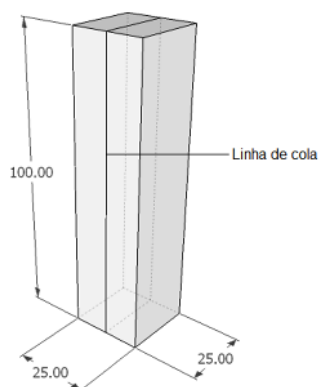


Figura 4 – Corpo de prova de MLC para compressão paralela às fibras (unidades em mm).

Para o ensaio de cisalhamento na linha de cola, foram confeccionados corpos de prova de MLC para as condições seca e saturada, Figura 5. Neste ensaio também foi avaliada a falha da madeira. O procedimento de teste foi realizado de acordo com a norma ASTM D 905 – *Test Method for Strength Properties of Adhesive Bonds in Shear by Compression Loading* (ASTM, 2009).

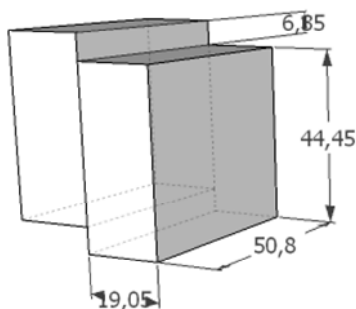


Figura 5 – Corpo de prova de cisalhamento na linha de cola (unidades em mm).

A análise da porcentagem de falha na madeira, relativa à área cisalhada na linha de cola, foi realizada com o auxílio de uma malha milimetrada (3,81 x 5,08 cm), sendo possível, a partir da contagem dos espaços, analisar a porcentagem de falha da madeira, Figura 6.

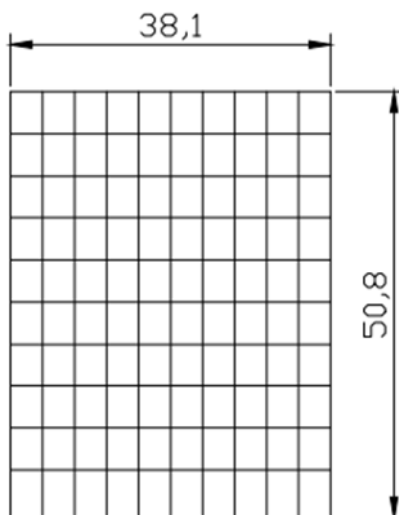


Figura 6 – Malha para medir a falha na madeira no ensaio de cisalhamento (unidades em mm).

O ensaio de cisalhamento na linha de cola também foi realizado em corpos de prova do tipo 'H' (*push-out*), (Figura 7). Este teste foi realizado para avaliar a resistência ao cisalhamento e conseqüentemente à qualidade de duas linhas de cola.

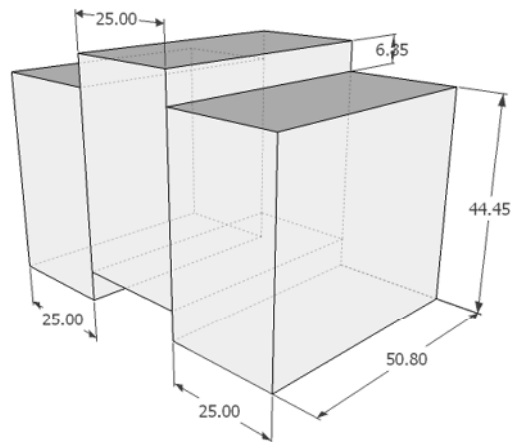


Figura 7 – Corpo de prova tipo 'H' (*push-out*) para ensaio de cisalhamento à compressão para duas linhas de cola (unidades em mm).

O ensaio de flexão estática foi realizado utilizando apenas os corpos de prova extraídos de outros elementos de MLC produzidos com o adesivo poliuretano (PUR). Foram ensaiados com a linha de cola na horizontal e nas condições seca e saturada (Figura 8).



Figura 8 – Ensaio de flexão estática em corpo de prova colado.

### 3.5 Ensaio de Delaminação

O ensaio de delaminação foi realizado conforme as recomendações da norma AITC T110, (AITC, 2007) que trata da avaliação de adesivos para uso estrutural de produtos de madeira expostos ao ambiente exterior. O ensaio consiste em colocar os corpos de prova dentro de uma autoclave, expondo as linhas de cola a tensões devido ao efeito de vácuo e pressão, em três ciclos de umedecimento e secagem, durante um período de 12 dias. Para tal, foi empregado um aparato que consiste em uma autoclave de 53 x 19,5 cm (comprimento e diâmetro) equipada com um compressor com capacidade de operação máxima de 800 kPa, para a obtenção de uma pressão de 550 kPa e uma bomba de vácuo com capacidade 250 libras/in<sup>2</sup> (1.667 kPa) capaz de gerar um vácuo pelo menos 22 pol/Hg. (Figura 9).



Figura 9 – Aparato experimental para ensaio de delaminação.

O ensaio de delaminação foi realizado apenas em corpos de prova colados com o adesivo poliuretano líquido (PUR) (Figura 10). Na primeira etapa do ensaio, os corpos de prova de seção igual aos elementos de MLC e 72,2 mm de comprimento, foram inseridos na autoclave para aplicação de vácuo de  $75 \pm 10$  kPa, durante 2 horas, depois foi liberado o vácuo e aplicou-se água com pressão de  $540 \pm 20$  kPa durante 2 horas.

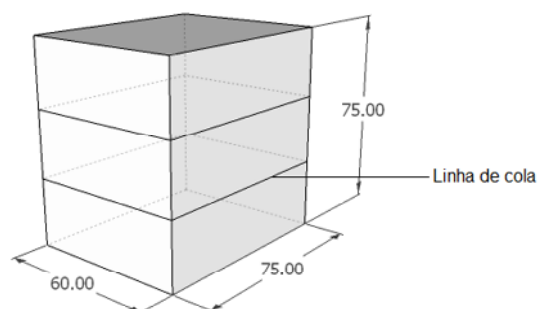


Figura 10 – Corpo de prova para ensaio de delaminação (unidades em mm).

Repetiu-se este mesmo procedimento na segunda etapa, totalizando 8 horas de permanência na autoclave e, então, os corpos de prova foram retirados da autoclave e passaram por um período de 96 horas, no primeiro ciclo. No segundo e terceiro ciclos foram repetidos os mesmos procedimentos do primeiro ciclo. Ao final do ensaio, previu-se o comportamento da combinação da MLC exposta ao exterior, por meio da porcentagem de delaminação, que é obtida nas duas faces de topo dos corpos de prova. Tal porcentagem é dada pelo comprimento de cada linha de cola em que ocorreu delaminação dividido pelo comprimento total da linha de cola.

### 3.6 Análise Estatística

O experimento foi conduzido sob um delineamento inteiramente casualizado, e foram avaliadas as resistências mecânicas da madeira maciça e comparadas com as resistências dos corpos de prova obtidos dos elementos de MLC produzidos com os adesivos estruturais, nas condições seca e saturada.

Para os ensaios mecânicos foi definida uma amostragem de 24 corpos de prova para cada tratamento, a análise estatística constitui-se de uma análise de variância entre as médias dos tratamentos, sendo comparado o efeito dos corpos de prova de madeira maciça, com os retirados dos elementos de MLC nas condições seca e saturada. Os resultados obtidos foram analisados por meio de análise de variância e teste de comparação de médias, teste de Tukey a 5% de significância.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Propriedades Físicas da Madeira

Os valores médios das propriedades físicas, teor de umidade e densidade aparente da madeira de *Acacia mangium* Willd são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades físicas da madeira de *Acacia mangium* Willd

	Densidade aparente (12%) (g.cm <sup>-3</sup> )	Teor de umidade (%)
Média	0,62	12,02
Desvio Padrão	0,02	0,35
CV (%)	3,25	2,88

A densidade aparente para a *Acacia mangium* a 12% de umidade encontrada foi de  $0,62 \pm 0,02$  g.cm<sup>-3</sup>. A umidade da madeira variou  $12,02 \pm 2,88\%$ . O conhecimento do teor de umidade e a densidade aparente do lote de madeira são fatores fundamentais para fabricação de MLC, uma vez que a umidade deve estar entre 8 a 12% de umidade e a densidade vai influenciar na pressão e tempo de prensagem dos elementos de MLC.

O valor médio da densidade aparente encontrado foi superior àqueles encontrados por outros autores, que apresentam valores entre  $0,51$  g.cm<sup>-3</sup> a  $0,56$  g.cm<sup>-3</sup> para a madeira de *Acacia mangium* (ROKEYA et al., 2010; LAURILA, 1995; SATTAR et al., 1993).

Comparando a densidade encontrada com a de espécies plantadas, como eucaliptos e pinus, o resultado é inferior ao apresentado para a espécie de *Eucaliptus grandis* com valor igual a  $0,70$  g.cm<sup>-3</sup> e superior ao *Pinus sp.* com densidade aparente igual a  $0,46$  g.cm<sup>-3</sup> (IPT, 1989).

Paradis et al. (2011) publicaram um material com as propriedades tecnológicas de diversas espécies do mundo. Para *Acacia mangium* foram apresentados valores de densidade a 12% de umidade de  $0,52$  g.cm<sup>-3</sup>, coeficiente de contração volumétrica de  $0,37\%$ , contração total tangencial de  $7,0\%$ , contração

total radial de 3,1%, sendo considerada uma madeira moderadamente estável dimensionalmente.

Como são frequentemente observadas para as espécies plantadas, as propriedades físicas e mecânicas desta madeira podem variar muito dependendo da origem, condições de crescimento da floresta e idade das árvores.

## 4.2 Propriedades Mecânicas da Madeira e da MLC

Em relação às propriedades mecânicas, os valores de resistência foram obtidos a partir dos dados obtidos por meio dos testes de compressão paralela às fibras, cisalhamento (PUR e MUF) e flexão estática (PUR). Foi efetuada uma avaliação dos valores de resistência mecânica dos corpos de prova de madeira maciça com os corpos de prova feitos a partir dos elementos de MLC em condições seca e saturada. As médias foram submetidas à análise de variância seguida pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os resultados obtidos para compressão paralela às fibras nos corpos de prova de madeira maciça e MLC seca e saturada podem ser observados na Tabela 4 e Figura 11.

Tabela 4 – Resistência à compressão paralela às fibras dos tratamentos

Tratamentos	Resistência a Compressão Axial (MPa)		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Madeira maciça	49,48 b	2,88	5,83
PUR Seco	52,72 ab	4,78	9,07
PUR Saturado	29,88 c	3,41	11,40
MUF 1 Seco	54,15 a	5,57	10,28
MUF 1 Saturado	31,98 c	3,88	12,14
MUF 2 Seco	53,86 a	4,06	7,55
MUF 2 Saturado	32,13 c	2,92	9,10

As médias na mesma coluna, seguidas pela letra minúscula mesmo caso, não são estatisticamente diferentes ao nível de 5% de probabilidade de acordo com o teste de Tukey.

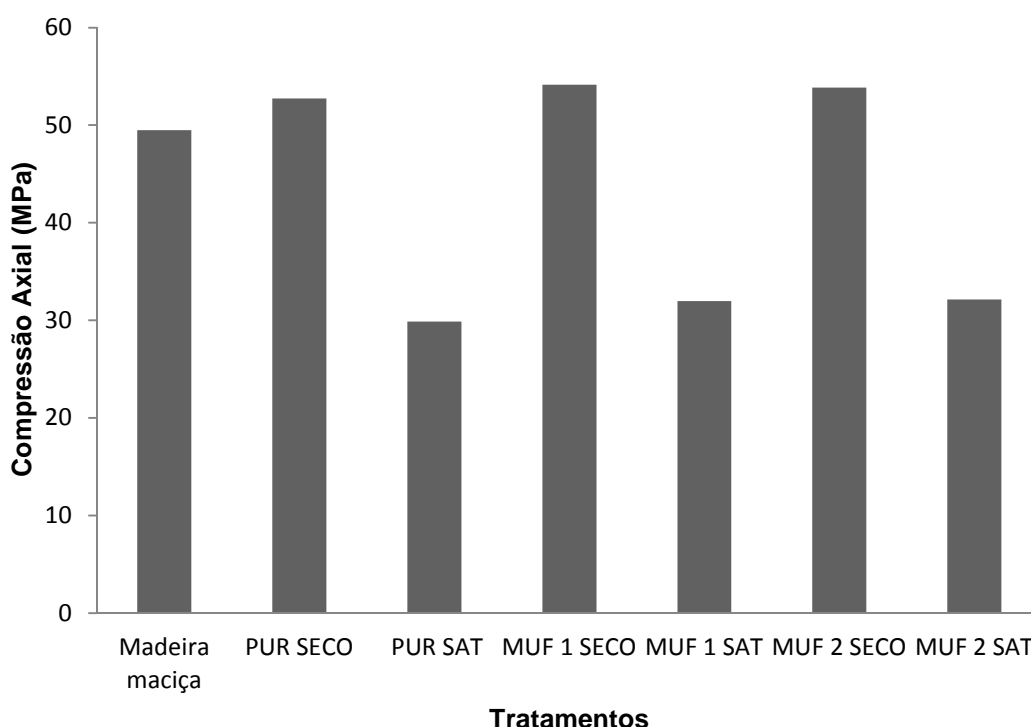


Figura 11 – Resistências médias dos tratamentos a compressão paralela às fibras.

Para compressão paralela às fibras os três tratamentos secos não diferiram estatisticamente entre si, ou seja, para efeito de compressão paralela o desempenho dos adesivos na madeira de *Acacia mangium* é similar. O fato de que para madeira maciça a resistência foi um pouco inferior, está relacionado à classificação que foi feita das lâminas para confecção dos elementos de MLC, que levou em consideração as melhores lâminas, isso em termos de porção de madeira de cerne presente.

A variabilidade dos valores de compressão paralela talvez não se explica pela variação dos adesivos, mas sim, pela própria variação das propriedades da madeira e a variabilidade nos corpos de prova, devido a diferentes concentrações de regiões de cerne e alburno, lenho juvenil e adulto e suas características químicas, como como teor de extrativos e pH.

Os resultados obtidos dos ensaios de cisalhamento nos corpos de prova de madeira maciça, de MLC secos, saturados e do tipo 'H' podem ser vistos na Tabela 5 e Figura 12.

Tabela 5 – Resistências ao cisalhamento dos tratamentos

Tratamentos	Resistência ao Cisalhamento (MPa)		
	Média	Desvio Padrão	CV (%)
Madeira maciça	8,64 c	1,24	14,29
PUR Seco	8,66 c	1,46	16,81
PUR Saturado	5,00 d	0,84	16,71
PUR 'H'	5,58 d	1,43	25,56
MUF 1 Seco	11,23 a	1,70	15,15
MUF 1 Saturado	10,24 ab	1,49	14,57
MUF 1 'H'	6,22 d	1,22	19,69
MUF 2 Seco	9,97 abc	1,57	15,76
MUF 2 Saturado	9,41 bc	1,34	14,22
MUF 2 'H'	5,53 d	1,17	21,08

As médias na mesma coluna, seguidas pela letra minúscula mesmo caso, não são estatisticamente diferentes ao nível de 5% de probabilidade de acordo com o teste de Tukey.

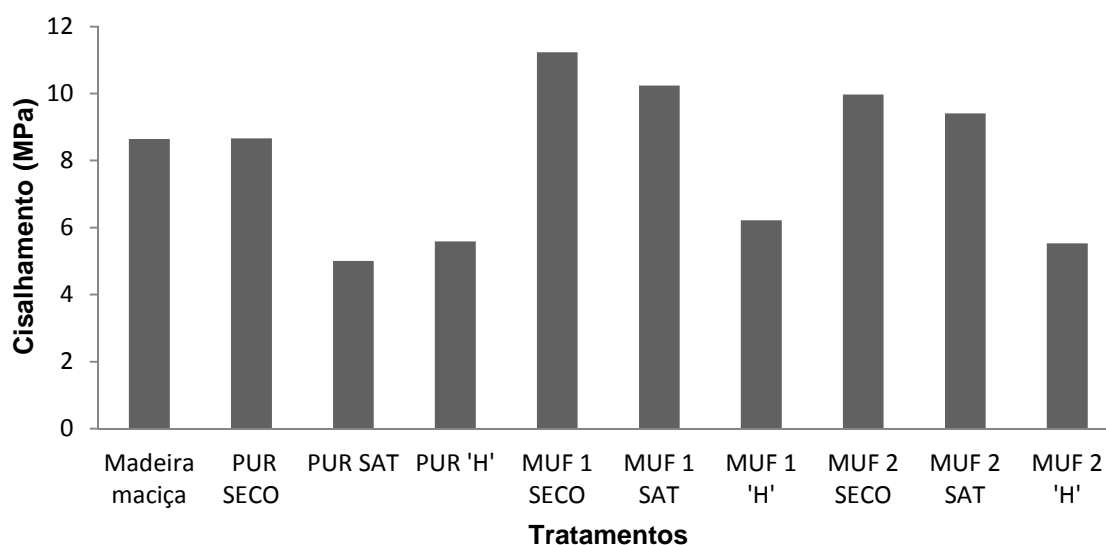


Figura 12 – Resistências médias dos tratamentos ao cisalhamento.

Para o cisalhamento o melhor resultado foi obtido com o MUF 1 tanto seco quanto saturado, o que indica a qualidade desse adesivo para aplicações externas, quando submetido a condições de umidade e intemperismos. O pior resultado foi obtido com o adesivo PUR na condição saturada, o que mostra que esse adesivo não é ideal para aplicações externas. As resistências ao

cisalhamento foram superiores com tratamento MUF 1, seguido pelo MUF 2 e por fim o PUR.

No ensaio de cisalhamento tipo 'H', tentou-se reproduzir o efeito do cisalhamento nas duas linhas de cola, observou-se que as rupturas ocorreram majoritariamente na madeira, no meio do corpo de prova. Isso pode dizer que de fato as linhas de colas resistiram às cargas solicitadas ou que houve um deslizamento do corpo de prova no momento do ensaio, o que pode ter favorecido a ruptura por esmagamento (Figura 13).



Figura 13 – Corpos de prova do tipo 'H', rompido na madeira (A) e intacto (B).

No cisalhamento tipo 'H', de um total de 24 corpos de prova, 58,3% romperam na madeira, ou seja, a linha de cola resistiu aos esforços mecânicos. 33,3% romperam na linha de cola e apenas 8,3% resistiram e não romperam.

Para o cisalhamento tipo 'H', os resultados deverão ser iguais ou exceder o valor de resistência ao cisalhamento da madeira que está sendo utilizada para sua fabricação, esperava que os resultados sejam equivalentes à madeira maciça. Quanto aos valores de resistência ao cisalhamento na linha de cola do MLC espera-se que o corpo de prova estrutural deva resistir a cisalhamento no mínimo o dobro do corpo de prova convencional, devido a possuir duas linhas de cola.

Foram feitas análises das falhas na linha de cola dos corpos de prova colados. Pode-se inferir que um maior percentual de falha na madeira está relacionado com uma maior eficiência do adesivo. A porcentagem de falha nas linhas de cola foram superiores com o adesivo PUR, seguido do MUF 2 e por fim o MUF 1, satisfazendo as condições da NBR 7190 (1997).

O percentual de falha na madeira (%) para os tratamentos aplicados encontra-se na Figura 14.

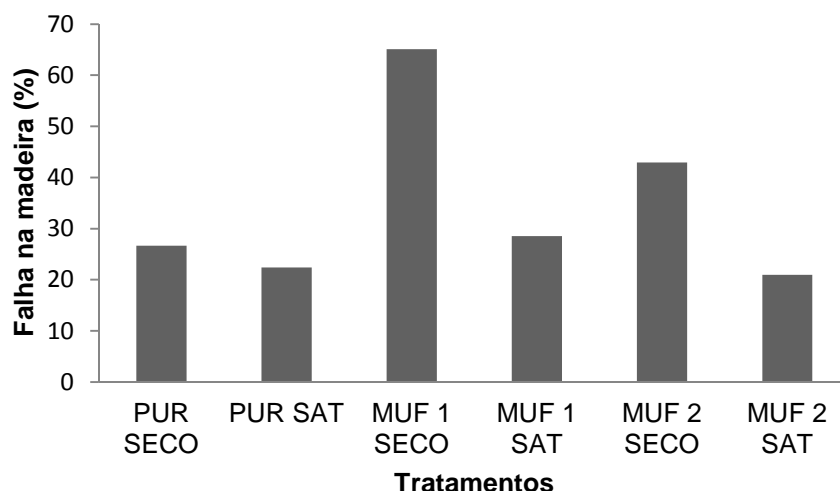


Figura 14 – Percentual de falha na madeira.

Por meio dos ensaios de flexão estática foram obtidos os valores do módulo de elasticidade (MOE) para todos os tratamentos, ou seja, os corpos de prova de madeira maciça, de MLC e MLC saturados. Os valores médios encontrados para os corpos de prova submetidos ao ensaio de flexão estática estão sumarizados na Tabela 5. A flexão estática fornece dados sobre a resistência à flexão e rigidez para tais usos como vigas em outras condições de projeto de estruturas de madeira. Os resultados para os valores de MOE de os corpos de prova de madeira maciça e os de MLC variaram de 7.584 a 10.379 MPa, respectivamente como mostrado na Tabela 6 e graficamente pode ser observado na Figura 15.

Tabela 6 – Módulo de elasticidade dos tratamentos

<b>Módulo de elasticidade – MOE (MPa)</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>CV (%)</b>
Madeira maciça	10.365 a	1.223	11,80
PUR Seco	10.379 a	1.103	10,63
PUR Saturado	7.662 b	598	7,81

As médias na mesma coluna, seguidas pela letra minúscula mesmo caso, não são estatisticamente diferentes ao nível de 5% de probabilidade de acordo com o teste de Tukey.

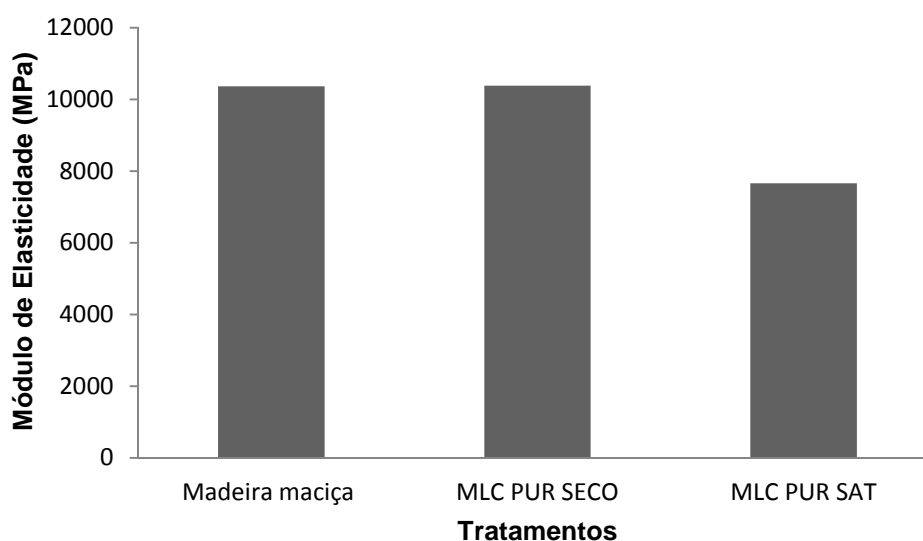


Figura 15 – Módulo de elasticidade à flexão estática.

Os dados mostraram que todos os parâmetros de compressão paralela às fibras, cisalhamento e flexão estática tiveram valores significativamente inferiores para madeira maciça e para os corpos de prova de MLC em condições saturada. Quanto ao MOE verificaram-se para os corpos de prova de MLC seco e madeira maciça valores significativamente maiores de resistência, comparativamente com ao MLC saturado. Um fator que chamou a atenção foi que a inevitável presença de alburno em alguns corpos de prova pode ter contribuído para o alto coeficiente de variação nos valores de resistência.

Kretschmann (2008) reporta que o módulo de elasticidade, a resistência à compressão paralela e normal, a flexão estática e a tração paralela e perpendicular às fibras são seriamente afetadas pela presença de madeira juvenil e de alburno.

Ouypornprasert et al. (2005) encontraram para *Acacia mangium*, na Malásia, com idade 10 e 15 anos um módulo de elasticidade de 14.489 MPa. Os mesmos autores obtiveram no ensaio de compressão axial 36,21 MPa, valor inferior aos 49,48 MPa obtidos para a madeira de *Acacia mangium* de 18 anos proveniente do Vale do Rio Doce.

A variação encontrada nos resultados pode ser explicada por vários fatores relacionados às características da madeira utilizada em estudo, como a variabilidade anatômica da madeira, associada à densidade e à porosidade na

madeira, que influenciaram a formação da ligação adesiva (ALBUQUERQUE; LATORRACA, 2000).

Os resultados obtidos indicam a eficiência do adesivo avaliado quando submetidos ao respectivo ensaio, porém pode-se inferir que a qualidade da colagem pode estar associada ao teor de extrativos presentes na madeira de *Acacia mangium*.

### 4.3 Ensaios de delaminação

A porcentagem de delaminação foi determinada pela relação entre o comprimento máximo de delaminação de uma linha de cola e o comprimento da linha de cola. O presente estudo encontrou valores de delaminação da ordem de  $11,44 \pm 15,68 \%$ , valores superiores ao encontrado por Fiorelli e Dias, (2005), como também superior ao máximo de 10% estipulado pela norma europeia EN 386 (EUROPEAN STANDARD, 2001). A elevada variação pode ser justificada pelo fato de que alguns corpos de prova praticamente não apresentarem aberturas de delaminação (Figura 16).



Figura 16 – Corpos de prova após ensaio de delaminação apresentando falha na linha de cola.

A avaliação da eficiência destes 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 (FIORELLI; DIAS, 2005).



Herawati; Massijaya e Nugroho (2010) obtiveram resultados não satisfatórios para o teste com os adesivos poliuretanos. Muitos resultados com baixa resistência ao cisalhamento surpreendentemente apareceram durante os testes. Relataram ainda que a razão de falha na madeira de *Acacia mangium* laminado foi de cerca de 49%.

Pode-se afirmar que a qualidade das linhas coladas com o adesivo poliuretano (PUR) utilizado para a confecção das vigas de MLC, poderia ser melhor já que apresentou um comportamento ineficiente quando submetidos a ensaios de delaminação.

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A madeira de *Acacia mangium* proveniente de florestas plantadas possui propriedades físicas e mecânicas que a tornam apta à manufatura de elementos estruturais de MLC.
- O adesivo poliuretano líquido (PUR) mostrou-se insuficiente para resistir a casos de exposição em ambientes saturados.
- O adesivo melamina-uréia-formaldeído (MUF) mostrou-se ser o mais viável para fabricação de elementos estruturais de madeira laminada colada (MLC) em ambientes secos e saturados.
- O ensaio de delaminação não comprovou uma boa resistência das linhas de cola do adesivo poliuretano líquido (PUR) empregado.

## 6 REFERÊNCIAS

ALAMSYAH, E. M.; YAMADA, M.; TAKI, K. Bondability of tropical fast-growing tree species III: curing behavior of resorcinol formaldehyde resin adhesive at room temperature and effects of extractives of *Acacia mangium* wood on bonding. **Journal of Wood Science** v. 54, p. 208–213, 2008.

ALBINO, 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, set. 2010.

ALBUQUERQUE, C. E. C; LATORRACA, J. V. F. Influência das características anatômicas da madeira na penetração e adesão de adesivos. **Revista Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 158-166, 2000.

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 905 – **Standard test method for strength properties of adhesive bonds in shear by compression loading**. Philadelphia, PA, 2009.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 143 – **Standard test methods for small clear specimens of timber**. Philadelphia, PA, 2000.

APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Product Guide: Glulam**. Tacoma, Washington, EUA, 2008. Disponível em: <<http://www.apawood.org/>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

APA – THE ENGINEERED WOOD ASSOCIATION. **Structural Panel and Engineered Wood Yearbook. APA Economics Report E175.** Disponível em: <<http://www.apawood.org>>. Acesso em: 2 mar. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **MB-26/40.** Ensaios físicos e mecânicos da madeira. Rio de Janeiro, 1940. 16p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190.** Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997. 107p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS – ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2012:** ano base 2011. Brasília, DF: ABRAF, 2012.

AZAMBUJA, M. dos A. **Estudo experimental de adesivos para fabricação de madeira laminada colada:** avaliação da resistência de emendas dentadas, da durabilidade e de vigas. 128p. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2006.

CHANS, D. O.; CIMADEVILA, J. E.; GUTIÉRREZ, E. M. Glued joints in hardwood timber. **International Journal of Adhesion and Adhesives.** v. 28, n. 8, p. 457-463, 2008.

CHOWDHURY, M. Q.; SHAMS, M. I.; ALAM, M. Effects of age and height variation on physical properties of mangium (*Acacia mangium* Willd) wood. **Australian Forestry,** v. 68, n.1, p. 17–19, 2005.

EUROPEAN STANDARD (EN 386). **Glued Laminated Timber:** Performance requirements and minimum production requirements, p. 16, 2001.

FIORELLI, J. **Estudo teórico e experimental de vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro.** 2005. 108p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2005.

FIORELLI, J; DIAS, A. A. Avaliação da delaminação em peças de madeira laminada colada reforçadas com fibra de vidro. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 241–249, 2005.

FRIHART, C. R.; HUNT, C. G. Adhesives with wood materials bond formation and performance. In: FOREST PRODUCTS LABORATORY. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 2010.

HERAWATI, E.; MASSIJAYA, M. Y.; NUGROHO, N. Performance of glue-laminated beams made from small diameter fast-growing tree species. **Journal of Biological Sciences**, v.10 n.1, p. 37-42, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. **Fichas de características das madeiras brasileiras**. 2.ed. São Paulo: IPT, 1989. 418p.

IWAKIRI, S. **Painéis de madeira reconstituída**. Curitiba: FUPEF, 2005. 247p.

KLITZKE, R. J. Secagem de madeira. In: **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro**. Eds.: OLIVEIRA, J. T. S.; FIEDLER, N. C.; NOGUEIRA, M. Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora, p.271-341, 2007.

KRETSCHMANN, D. E. The influence of juvenile wood content on shear parallel, compression, and tension perpendicular to grain strength and mode I fracture toughness of loblolly pine at various ring orientation. **Forest Productions Journal**, v. 58, n. 7/8, p. 89-96, 2008.

KRISNAWATI, H.; KALLIO, M.; KANNINEN, M. **Acacia mangium Willd.**: ecology, silviculture and productivity. CIFOR, Bogor, Indonesia. 2011.

LAURILA, R. Wood properties and utilization potential of eight fast-growing tropical plantation tree species. **Journal of Tropical Forest Products**, Malaysia, v.1, n.2, p. 209-221, 1995.

LIM, S. C.; GAN, K. S.; CHOO, K. T. The characteristics, properties and uses of plantation timbers – rubberwood and *Acacia mangium*. **Timber Technology Centre (TTC)**, FRIM, Kepong, Kuala Lumpur. n. 26. 2003.

LOKMAL N.; MOHD NOOR, A. G. Variation of specific gravity in *Acacia mangium*. **Journal Agrobiotech**, v.1, p. 69-78, 2010.

MIOTTO, J. L. **Estruturas mistas de madeira-concreto: avaliação das vigas de madeira laminada colada reforçadas com fibras de vidro**. 2009. 325p. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos. 2009.

MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica**, Edição Especial ENTECA 2009, p. 35-45, 2009.

MOODY, R. C.; HERNANDEZ, R. A guide for specifiers, designers and users. In: **Engineered Wood Products**. Madison, 1997, Wisconsin. Cap. 1 Glued-Laminated Timber. Wisconsin: PFS Research Foundation, p. 1-39, 1997.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Mangium and other fast-growing Acacias for the humid tropics**. National Academy Press, Washington, DC. 1983.

NUGROHO, W. D.; MARSOEM, S. N.; YASUE, K.; FUJIWARA, T.; NAKAJIMA, T.; HAYAKAWA, M.; NAKABA, S.; YAMAGISHI, Y.; JIN, H.; KUBO, T.; FUNADA, R. Radial variations in the anatomical characteristics and density of the wood of *Acacia mangium* of five different provenances in Indonesia. **Journal of Wood Science**, v. 58, n. 3, p.185-194, 2012.

OUIYORNPRASERT, W.; BOONYACHUT, S.; BOONYACHUT, S. *Acacia mangium* Willd as structural components and shear walls. **International Journal of Materials & Structural Reliability**, v. 3, n. 2, p 67-86, 2005.

PANSHIM, A. J.; DE ZEEUW, C. **Textbook of Wood Technology**, 2nd ed. McGraw-Hill, New York, 1964.

PARADIS, S.; GUIBAL, D.; VERNAY, M; BEAUCHÊNE, J; BRANCHERIAU, L; CHÂLON, I; DAIGREMONT, C; DÉTIENNE, P; FOUQUET, D; LANGBOUR, P; LOTTE, S; MÉJEAN, C; THÉVENON, M; THIBAUT, A; GÉRARD, J. **Cirad Tropix 7.0**: Caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées. Montpellier, France. CIRAD, 2011.

PLASTER, O. B.; OLIVEIRA, J. T. DA S.; ABRAHÃO, C. P.; BRAZ, R. L. Comportamento de juntas coladas da madeira serrada de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 251-258, 2008.

PURBOND. **Ficha Técnica dos Adesivos**. Disponível em: <<http://www.purbond.com>>. Acesso em: 10 jun. 2012.

ROKEYA, U.K.; HOSSAIN, M. A.; ALI, M. R.; PAUL, S. P. physical and mechanical properties of (*Acacia auriculiformis* x *A. mangium*) hybrid acacia. **Journal of Bangladesh Academy of Sciences**, v. 34, n. 2, p.181-187, 2010.

SAHRI, M. H., ASHAARI, Z.; KADERL, R. A.; MOHMOD, A. L. Physical and mechanical properties of *Acacia mangium* and *Acacia auriculiformis* from different provenances. **Pertanika J. Trop. Agric. Sci.** v.21, n.2, p. 73–81, 1998.

SATTAR, M. A., KABIR, M. F.; BHATTACHARJEE, D. K. Physical, mechanical and seasoning properties of *A. mangium* and *A. auriculiformis*. Bulletin 15, **Timber Physics Series**, BFRI, Chittagong, p. 6, 1993.

SELBO, M.L. **Adhesive bonding of wood**. U.S. Department of Agriculture, Technical bulletin. New York, n. 1512, p.1-122, 1975.

TELES, R. F. **Propriedades tecnológicas de vigas de madeira laminada colada produzidas com louro vermelho (*Sextonia rubra*)**. 118p. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2009.

TEREZO, R. F.; SZÜCS, C. A. Análise de desempenho de vigas em madeira laminada colada de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex. Ducke). **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 87, p. 471-480, 2010.

TIENNE, D. L. da C.; NASCIMENTO, A. M. do; GARCIA, R. A.; SILVA, D. B. Qualidade de adesão de juntas de madeira de pinus coladas em condições simuladas de serviço interna e externa. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n.1, p.16-29, 2011.

ZANGIÁCOMO, A.L. **Emprego de espécies tropicais alternativas na produção de elementos estruturais de madeira laminada colada**. 103p. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos. 2003.



## APÊNDICES

**Apêndice A** – Análise de variância entre as médias de resistência a compressão axial.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	18934,60	6	3155,77	193,88	0,00	2,16
Dentro dos grupos	2620,55	161	16,28			
Total	21555,16	167				

**Apêndice B** – Análise de variância entre as médias de resistência ao cisalhamento.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	1109	9	123,22	66,19	0,00	1,92
Dentro dos grupos	428,16	230	1,86			
Total	1537,15	239				

**Apêndice C** – Análise de variância entre as médias do módulo de elasticidade em flexão estática.

<b>Fonte da variação</b>	<b>SQ</b>	<b>gl</b>	<b>MQ</b>	<b>F</b>	<b>valor-P</b>	<b>F crítico</b>
Entre grupos	107762275	2	53881137.61	52.60	0.00	3.14
Dentro dos grupos	64535778.72	6	1024377.44			
Total	172298054	65				